

Wydział Budownictwa i Architektury

Katedra Geotechniki

Piotr Cichocki

ANALIZA WSPÓŁPRACY FUNDAMENTU PŁYTOWO-PALOWEGO
Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM Z UWZGLĘDNIENIEM OPORU
POBOCZNICY I PODSTAWY PAŁA WYWOŁANYCH OSIADANIEM

Rozprawa doktorska

Promotor:

prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer

Szczecin, 2018 r.

SPIS TREŚCI:

SPIS TREŚCI:	2
WYKAZ OZNACZEŃ	4
1. WSTĘP	7
2. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY	10
3. ANALIZA LITERATURY DOTYCZĄCEJ WSPÓŁPRACY PŁYTY I PALI	12
3.1. Wprowadzenie do analizy literatury	12
3.2. Metody analizy współpracy płyty fundamentowej z podłożem i grupą pali	16
3.3. Badania modelowe i terenowe fundamentów płytowo-palowych	40
3.4. Podsumowanie przeglądu literatury	65
4. OPIS MATEMATYCZNY ZJAWISKA WSPÓŁPRACY PŁYTY I PALI	69
4.1. Wprowadzenie do modelowania matematycznego	69
4.2. Założenia przyjęte do modelu matematycznego współpracy płyty i pali	70
4.3. Osiadanie sprężystej płyty na podłożu uwarstwionym	77
4.4. Osiadanie pala pojedynczego	79
4.5. Osiadanie pali w grupie zwieńczonych sprężystą płytą	82
4.6. Osiadanie sprężystej płyty na podłożu uwarstwionym i palach	85
4.7. Rozwiązanie modelu matematycznego współpracy płyty z podłożem i grupą pali	88
5. WERYFIKACJA MODELU MATEMATYCZNEGO	92
5.1. Estakada drogowa w ciągu ul. Elbląskiej w Gdańsku - fundament palowy	93
5.2. Zbiorniki Podczyszczalni ścieków w Tychach - fundament płytowo-palowy	100
6. PRZEGLĄD SYSTEMATYCZNY ROZWIĄZANIA	110
6.1. Sprężysta płyta na podłożu	110
6.2. Sprężysta płyta na podłożu i pojedynczym palu	116
6.3. Sprężysta płyta na podłożu i grupie pali (5 pali)	127

7. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE	142
7.1. Wprowadzenie do praktycznego wykorzystania modelu matematycznego	142
7.2. Fundament palowy	143
7.3. Fundament płytowo-palowy	147
7.4. Podsumowanie praktycznego wykorzystania opracowanego modelu	151
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	154
9. PROGRAM DALSZYCH BADAŃ	158
LITERATURA.....	159
NORMY	167
SPIS RYSUNKÓW I WYKRESÓW	168
SPIS TABEL	177
STRESZCZENIE	178
SUMMARY	179

WYKAZ OZNACZEŃ

Litery łacińskie

B	– wymiar płyty fundamentowej [m],
C	– parametr krzywej MK [mm/kN],
D	– średnica pala [m],
D_b	– sztywność płyty [kNm],
E_0	– moduł odkształcenia gruntu [MPa],
E_b	– moduł sprężystości betonu [MPa],
E_n	– moduł odkształcenia gruntu warstwy geotechnicznej $n=1,2,3$ [MPa],
E_q	– moduł odkształcenia gruntu pod podstawą pala [MPa],
E_{sr}	– średni moduł odkształcenia gruntu wzdłuż pobocznic i strefy aktywnej pala [MPa],
E_t	– średni moduł odkształcenia gruntu wzdłuż pobocznic pala [MPa],
h	– grubość płyty [m],
hp	– długość pala [m],
k	– sztywność pionowa podpór sprężystych modelujących podłoże i pale [kPa/m],
L	– odległość pomiędzy badanym profilem a punktem przyłożenia obciążenia [m],
m	– ilość pól elementarnych dyskretyzowanej płyty fundamentowej,
n	– ilość pali w grupie,
N_1	– opór podstawy pala / siła w podstawie pala [kN],
N_2	– siła w głowicy pala [kN],
N_{gr}	– nośność graniczna pala, odpowiadająca obciążeniu pala w głowicy wywołującemu osiadanie bez zmiany oporu - pionowa asymptota na krzywej obciążenie-osiadanie [kN],
q	– naprężenia kontaktowe płyta-podłoże w poziomie posadowienia fundamentu [kPa],
Q	– obciążenie gruntu polem dyskretyzowanej płyty w postaci siły skupionej [kN],
q_0	– pionowe obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni płyty [kPa],
q_c	– naprężenia w podstawie pala [kPa],
$q_{c,s}$	– opór podstawy sondy statycznej [kPa],
s	– osiadanie podłoża / pali oraz ugięcie płyty fundamentowej [m],

- T – sumaryczny opór poboczniczy pala, odpowiadający iloczynowi średniej wartości naprężenia stycznego wzdłuż poboczniczy i pola powierzchni poboczniczy pala [kN],
- x,y,z – osie prostokątnego układu współrzędnych.
- z_0 – zasięg strefy aktywnej naprężenia [m],
- z_{01} – zasięg strefy aktywnej naprężenia płyty fundamentowej [m],
- z_{02} – zasięg strefy aktywnej naprężenia pala [m].

Litery greckie

- γ – ciężar objętościowy gruntu [kN/m³],
- γ_n – ciężar objętościowy gruntu warstwy geotechnicznej $n=1,2,3$ [kN/m³],
- γ_q – ciężar objętościowy gruntu pod podstawą pala [kN/m³],
- κ – parametr krzywej MK [-],
- λ – obwód pala [m],
- ν – współczynnik Poissona [-],
- $\sigma_z(...)$ – składowa pionowa naprężenia w gruncie [kPa],
- $\sigma_r(...)$ – naprężenia krawędziowe [kPa],
- τ, t – naprężenia styczne wzdłuż poboczniczy pala [kPa],
- ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
- ϕ_n – kąt tarcia wewnętrznego gruntu warstwy geotechnicznej $n=1,2,3$ [°],
- ϕ_q – kąt tarcia wewnętrznego gruntu pod podstawą pala [°].

Macierze i wektory

- $[0]$ – macierz zerowa,
- $\{k_p\}$ – wektor sztywności pionowej podpór sprężystych modelujących pale,
- $\{k_R\}$ – wektor sztywności pionowej podpór sprężystych modelujących podłoże gruntowe,
- $\{N_1\}$ – wektor sił w podstawach pali,
- $\{N_2\}$ – wektor sił w głowicach pali,
- $\{R_p / s_p\}$ – wektor ilorazów naprężenia kontaktowego pól płyty z palami i osiadania pali w danym profilu obliczeniowym,
- $\{R_p\}$ – wektor naprężenia kontaktowego pól płyty z palami,

- $\{R_R/s_R\}$ – wektor ilorazów naprężenia kontaktowego pól płyty z podłożem i osiadania podłoża w danym profilu obliczeniowym,
- $\{R_R\}$ – wektor naprężenia kontaktowego pól płyty z podłożem,
- $\{s_P\}$ – wektor osiadania pali,
- $\{s_R\}$ – wektor osiadania podłoża w profilach obliczeniowych pól elementarnych płyty fundamentowej,
- $\{s_s\}$ – wektor osiadania pali wywołany obciążeniem pali sąsiednich,
- $\{s_w\}$ – wektor osiadania pali wywołany obciążeniem przyłożonym w głowicach pali,
- $\{\tau\}$ – wektor naprężenia na pobocznicach pali,
- $[WN_1P]$ – macierz współczynników wpływu sił w podstawach pali na osiadanie pali,
- $[WN_1R]$ – macierz współczynników wpływu sił w podstawach pali na osiadanie pól płyty,
- $[WN_2P]$ – macierz współczynników wpływu sił w głowicach pali na osiadanie pali,
- $[WRP]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia kontaktowego płyta-podłoże na osiadanie pali,
- $[WRR]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia kontaktowego płyta-podłoże na osiadanie pól płyty,
- $[W\tau P]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia na pobocznicach pali na osiadanie pali,
- $[W\tau R]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia na pobocznicach pali na osiadanie pól płyty.

Symbole

- (*) – wzór cytowany już w pracy

Oznaczenia użyte jednorazowo wyjaśniono w tekście.

1. WSTĘP

Budownictwo towarzyszy ludzkości od zarania dziejów. Możemy podziwiać zabytki średniowiecza, a nawet starożytności, które powstały bez zastosowania powszechnych dziś metod i narzędzi obliczeniowych. Paradoksalnie pomimo ciągłego obcowania z tematyką budownictwa naukowcy i projektanci nadal stawiają sobie wiele pytań, które pozostają bez odpowiedzi.

Jeden z poważniejszych dylematów towarzyszy analizie geotechnicznych warunków posadowienia, będącej nierozzerwalnym etapem większości inwestycji budowlanych. To właśnie od badań podłoża, jeszcze na etapie koncepcji, zaczynają się rozważania nad możliwościami zastosowania optymalnego rodzaju posadowienia. Powinno ono spełniać stawiane przed nim zadania, przy zachowaniu założonego współczynnika bezpieczeństwa oraz minimalizacji kosztów i czasu trwania budowy. Nieodłącznym elementem towarzyszącym wyborowi ostatecznego rozwiązania jest doświadczenie projektantów, którzy byłiby jednak bezsilni bez rozwoju metod obliczeniowych. Złożoność procesu decyzyjnego na etapie projektowania wymaga zarazem wiedzy o obiekcie, jego konstrukcji, ale także świadomości zjawisk i mechanizmów towarzyszących poszczególnym typom posadowienia w danych warunkach gruntowych. To one umożliwiają zaprojektowanie bezpiecznego i zarazem najkorzystniejszego pod względem technologicznym rozwiązania posadowienia obiektu budowlanego.

Powszechnie przyjęte podejście w analizie geotechnicznych warunków posadowienia obecnie nie zawsze spełnia stawiane przed nim oczekiwania. Mowa o podejściu zakładającym przekazywanie całego obciążenia z obiektu budowlanego za pomocą fundamentu bezpośredniego bądź pali. Powyższa sytuacja występuje chociażby na terenach wykazujących dotychczas przy ich użytkowaniu dostateczną nośność. Jednak rozwój i potrzeba przekazywania na podłoże coraz większych, skoncentrowanych obciążeń nowo wznoszonych budynków, przyczynia się do przekroczenia ich nośności lub przekroczenia dopuszczalnych wartości osiadania. W tej i analogicznych sytuacjach stosowanie fundamentów palowych przekazujących w całości obciążenie na podłoże wydaje się być niezasadne.

Uwzględnienie współpracy płyty i grupy pali w przekazywaniu obciążenia

umożliwia wypełnienie luki wśród konwencjonalnych rodzajów posadowienia. Korzyści płynące z udziału płyty w wielu warunkach gruntowych są zauważalne zarówno w aspekcie użytkowym, jak i ekonomicznym.

Do ogólnych korzyści z uwzględnienia płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże można zaliczyć [39]:

- o redukcję całkowitego osiadania konstrukcji,
- o redukcję nierównomiernego osiadania, w tym przechylenia obiektu,
- o zwiększenie nośności, a zatem i współczynnika bezpieczeństwa fundamentu,
- o redukcję obciążenia przekazywanego na pale, co umożliwia zmniejszenie całkowitej długości pali i czasu ich wykonania,
- o redukcję momentów zginających i sił poprzecznych płyt fundamentowych.

Powyższe czynniki mogą skłonić do powszechnego stosowania fundamentów płytowo-palowych we wszystkich pozwalających na to warunkach, a dodatkowym czynnikiem przemawiającym na korzyść omawianego posadowienia jest wspomniana optymalizacja kosztów i czasu trwania budowy, stanowiąca nierozdzielalną część procesu inwestycyjnego.

Za trudności wykorzystania nośności gruntu zalegającego w górnych obszarach podłoża, w przekazywaniu obciążenia z grupą palową, odpowiadają z jednej strony wciąż ograniczone możliwości realizacji badań terenowych, z drugiej zaś nieograniczona wyobraźnia i oczekiwania ludzi. Trudność ta polega na pełnym poznaniu mechanizmów zachodzących w ośrodku gruntowym pod płytą z uwzględnieniem jego podatności oraz wzajemnych oddziaływań płyty, pali i podłoża. Ponadto podczas analizy pracy fundamentów płytowo-palowych wymagana jest wiedza o realnej pracy płyty spoczywającej na podłożu oraz faktycznej pracy poszczególnych pali w nim osadzonych. Praca płyty i pali wpływa na rozdział obciążenia pomiędzy nimi oraz zachowanie całego fundamentu.

Nauka ma być użyteczna dla społeczeństwa, dostarczać mu wiedzy i umiejętności, dawać nowe możliwości. Badacze dokładając swoje cegiełki do rozwoju szeroko rozumianego poznania starają się spełnić ten wymóg. Wielcy naukowcy z zakresu geotechniki, a w tym przypadku ściślej fundamentów płytowo-palowych dokonali przełomowych odkryć, ustalili potrzebne algorytmy i modele obliczeniowe. Ciągły rozwój różnych metod, w tym m.in. służących analizie pracy pojedynczego pala w gruncie z badaniem mobilizacji oporu pobocznic i podstawy wywołanych osiadaniem, umożliwia opracowywanie nowych modeli matematycznych i metod

służących analizie fundamentów płytowo-palowych. Niniejsza praca stawia sobie za cel jedynie wyeliminowania kilku kolejnych ograniczeń w dotąd funkcjonujących rozwiązaniach.

2. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Cel pracy

Celem pracy jest analiza zagadnień związanych ze współpracą płyty fundamentowej, pod obciążeniem pionowym, z podłożem i grupą pali. Droga do realizacji powyższego celu prowadzi poprzez opracowanie założeń, a ostatecznie bazującego na nich modelu matematycznego. Proponowany model matematyczny ma umożliwić obliczanie omawianego typu posadowienia, z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością. Szczególny nacisk położono na zagadnienie rzeczywistej pracy pojedynczego pala w gruncie w pełnym zakresie obciążenia oraz faktycznej relacji obciążenie-osiadanie płyty o zadanej sztywności. W zagadnieniu analizy fundamentów płytowo-palowych, realna charakterystyka osiadań jest czynnikiem determinującym pracę całego układu fundament-podłoże, umożliwiając ostatecznie wyznaczenie osiadania i ugięcia płyty, udziału pali w przekazywaniu obciążenia oraz wyznaczenia sił wewnętrznych płyty.

Teza pracy

Istnieje możliwość wykorzystania z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością krzywej obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala w pełnym zakresie N_2 -s, do analizy krzywej obciążenie-osiadanie pala występującego w grupie pali pod płytą.

Przy analizie geotechnicznych warunków posadowienia fundamentów płytowych na palach istotną rolę pełni uwzględnienie faktycznej współpracy pala z gruntem oraz sprężystych własności płyty.

Zakres pracy obejmuje:

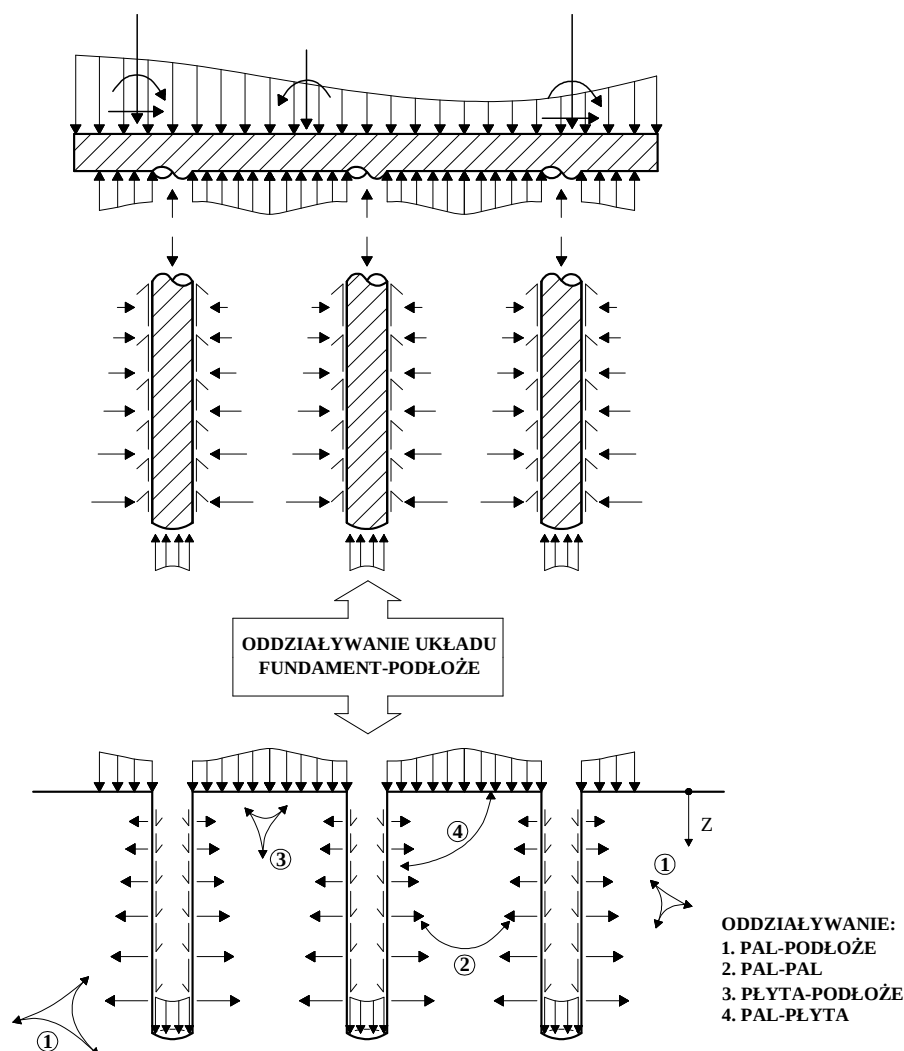
- o przegląd literatury z zakresu metod i badań, służących analizie współpracy płyt fundamentowych z podłożem i palami,
- o opracowanie założeń umożliwiających, z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, przeprowadzenie obliczeń rzeczywistych fundamentów spoczywających na podłożu i palach,

- o opracowanie modelu matematycznego omawianego typu posadowienia, z wyodrębnieniem badań nad:
 - fundamentem płytowym na podłożu uwarstwionym,
 - palem pojedynczym,
 - fundamentem płytowym na palach,
 - fundamentem płytowym na podłożu uwarstwionym i palach,
- o przygotowanie programu obliczeniowego realizującego obliczenia według proponowanego modelu matematycznego,
- o weryfikacja modelu matematycznego z wykorzystaniem istniejących badań terenowych,
- o przegląd i analiza uzyskiwanych wyników obliczeń, charakteryzujących pracę fundamentu,
- o praktyczne zastosowanie opracowanego modelu matematycznego,
- o podsumowanie, wnioski oraz program dalszych badań.

3. ANALIZA LITERATURY DOTYCZĄCEJ WSPÓŁPRACY PŁYTY I PALI

3.1. Wprowadzenie do analizy literatury

Przeprowadzenie analizy pracy fundamentów płytowo-palowych, wykorzystujących płytę w przekazywaniu obciążenia z grupą pali na podłoże, jest zagadnieniem złożonym. Wymaga wiedzy na temat wzajemnej interakcji płyty, pali i podłoża oraz mechanizmów zachodzących w ośrodku gruntowym pod płytą wywołanych osiadaniami (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Schemat współpracy układu fundament-podłoże oraz wzajemnych oddziaływań [31,40]

Wzajemne oddziaływania w istotny sposób wpływają na zachowanie całego fundamentu, tzn. na średnie i nierównomierne osiadanie, rozkład i wartości oporu płyty oraz mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali. Dodatkową trudność stanowi

określenie faktycznej pracy poszczególnych pali tworzących fundament oraz wiarygodnej relacji obciążenie-osiadanie płyty, które bezpośrednio wpływają na rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale, a w konsekwencji na pracę całego fundamentu.

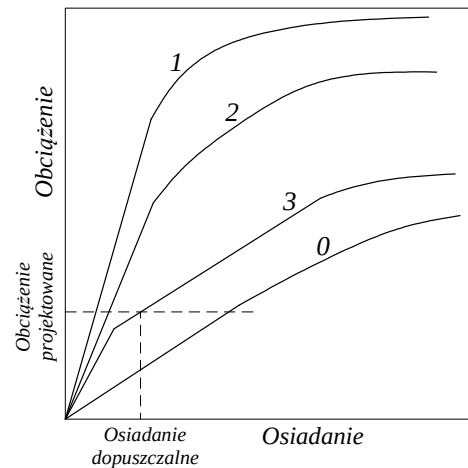
W związku z powyższym na etapie analizy geotechnicznej posadowienia wymagana jest wiedza na temat warunków współpracy płyty fundamentowej z grupą pali oraz możliwości i sposobu jej adaptacji do konkretnych zadań inżynierskich. Trzy podstawowe podejścia wykorzystania fundamentów płytowo-palowych usystematyzował Randolph [83]:

- o *konwencjonalne* zakładające analizę posadowienia jako grupy palowej przekazującej większość obciążenia, przy jednoczesnej możliwości udziału płyty w przekazaniu pozostałej części obciążenia,
- o *pali pełzających* podejście autorstwa Hansbo i Jendebý, zakładające projektowanie pali dla których pod obciążeniem roboczym rozpoczyna się stan pełzania, tzn. dla obciążenia stanowiącego 70-80 % nośności granicznej, w podejściu tym pale mają ograniczyć naprężenia kontaktowe płyta-podłoże do wartości nieprzekraczającej naprężenia prekonsolidującego grunt,
- o *kontroli nierównomierności osiadania* podejście zakładające świadome, nierównomierne usytuowanie pali na planie płyty w obszarach maksymalnych osiadań, wywołanych podatnością podłoża gruntowego bądź lokalną koncentracją obciążenia konstrukcji. Koncepcja ta w przeciwieństwie do dwóch powyższych nie jest ukierunkowana na ograniczenie średniej wartości osiadania lecz na minimalizację różnic osiadania, a w konsekwencji momentów zginających w płycie fundamentowej.

Poulos [80] zaproponował ponadto modyfikację podejścia *pali pełzających*. Polegała ona na projektowaniu części bądź wszystkich pali na obciążenie robocze odpowiadające ich nośności granicznej. Takie podejście ukierunkowane jest przede wszystkim na wykorzystanie pali jako reduktorów osiadania, przyczyniających się jednocześnie do zwiększenia nośności granicznej całego fundamentu. Na rysunku 3.2 przedstawiono krzywe obciążenie-osiadanie charakterystyczne dla różnych podejść projektowania fundamentów płytowo-palowych. Krzywa 0 prezentuje zachowanie płyty spoczywającej na podłożu bez udziału pali. Dla projektowanego obciążenia osiadanie płyty wykracza poza wartość dopuszczalną. Krzywa 1 odpowiada *konwencjonalnej* koncepcji projektowania, polegającej na uwzględnieniu udziału płyty w przekazywaniu

obciążenia z grupą pali przenoszących jej zasadniczą część. W tym podejściu grupa palowa jest projektowana z wykorzystaniem współczynników bezpieczeństwa stosowanych w obliczaniu grup palowych bez udziału płyty. Takie podejście charakteryzuje się pracą przede wszystkim w liniowym zakresie krzywej i uchodzi za dość asekuracyjne. Krzywa 2 odpowiada natomiast fundamentom wykorzystującym *pale pełzające*, projektowanych z użyciem niższych współczynników bezpieczeństwa. Fundamenty te charakteryzują się mniejszą ilością pali oraz większym udziałem płyty w przekazywaniu obciążenia.

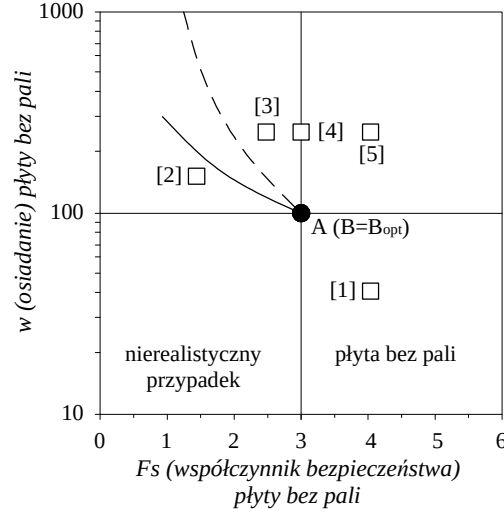
Ostatnia krzywa 3 przedstawia zachowanie fundamentu wykorzystującego strategiczne usytuowanie pali jako reduktorów osiadania. Dla projektowanego obciążenia pale wykorzystują pełną nośność a fundament może pracować w nieliniowym zakresie krzywej, pomimo odpowiedniego współczynnika bezpieczeństwa całego fundamentu. Ostatnie podejście jest najbardziej korzystne ekonomicznie.



Rys. 3.2. Krzywe obciążenie-osiadanie dla różnych koncepcji projektowania fundamentu [80]

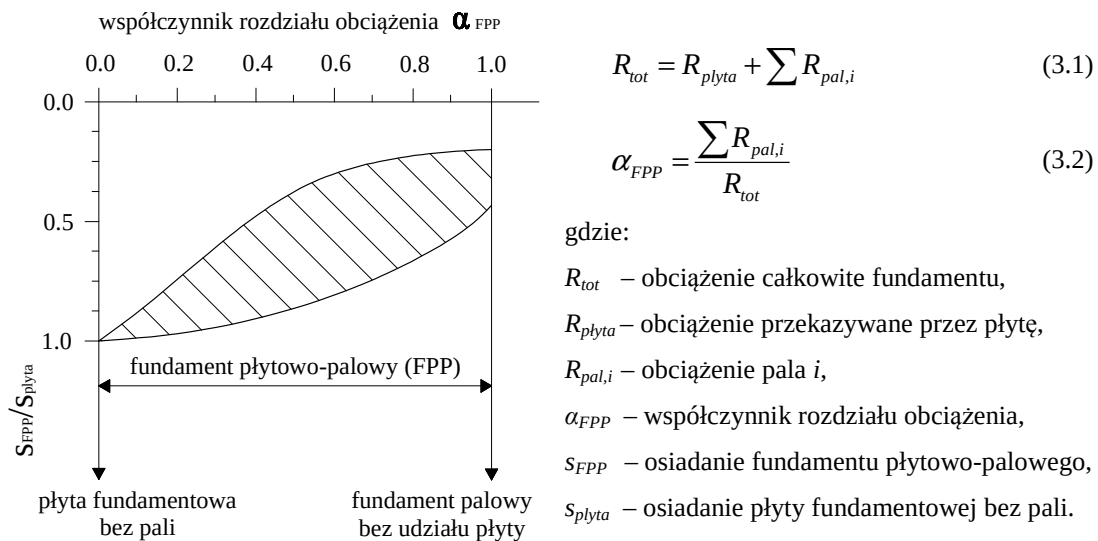
Mandolini i in. [54] przedstawili schemat i ogólną analizę geotechnicznych warunków posadowienia z naciskiem na dobór typu posadowienia oraz odpowiadającego zaistniałym warunkom podejścia projektowego. Założono, że współczynnik bezpieczeństwa nie może być mniejszy od 3, a dopuszczalna wartość osiadania wynosi 100 mm. Na rysunku 3.3 punkt A odpowiada optymalnemu posadowieniu płyty fundamentowej bez pali. Punkt 1 odpowiada płycie fundamentowej spoczywającej na gruncie z dostatecznym zapasem bezpieczeństwa i akceptowalnym poziomem osiadania. W takich warunkach możliwe jest wykonanie samej płyty fundamentowej posadowionej bezpośrednio na gruncie. Płyty odpowiadające punktom 2 i 3 cechują się zarówno niewystarczającym współczynnikiem bezpieczeństwa jak i niedopuszczalnym osiadaniem. W takiej sytuacji pale pełnią dwójaką rolę, tzn. zapewniają wymaganą nośność fundamentu oraz redukują osiadania. Ponadto w punkcie 2 reprezentującym płytę o niskim współczynniku bezpieczeństwa zalecane jest zaprojektowanie konwencjonalnej grupy palowej bez udziału płyty. W analizie płyty o wyższym współczynniku bezpieczeństwa ($2 \leq FS < 3$) można ją uwzględnić

w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Płyty fundamentowe spoczywające na podłożu o dostatecznej nośności, a w wyniku przyłożonego obciążenia ulegające nadmiernym osiadaniom (punkty 4 i 5), wymagają stosowania pali jedynie do ich redukcji.



Rys. 3.3. Schemat wyboru odpowiedniego podejścia projektowego płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali w oparciu o analizę osiadania i współczynnika bezpieczeństwa [54]

Powyższe podejścia do projektowania fundamentów płytowo-palowych nierozdzielnie związane są z udziałem pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Udziałem wyrażonym współczynnikiem rozdziału obciążenia α_{FPP} [31]. Współczynnik ten wyraża stosunek obciążenia przekazywanego przez pale do całkowitego obciążenia przekazywanego przez fundament na podłoże. Omawiany współczynnik rozdziału obciążenia wynosi 0 dla płyt fundamentowych przekazujących obciążenia na podłoże bez udziału pali, natomiast w sytuacji grupy palowej przekazującej w całości obciążenie na podłoże współczynnik ten wynosi 1 (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Schemat wpływu udziału pali na redukcję osiadania [41]

W celu oszacowania nośności granicznej płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali, na etapie przedprojektowym bądź wstępnym etapie projektowania, należy wziąć pod uwagę niższą z wartości odpowiadających dwóm potencjalnym modelom zniszczenia [80], tzn.:

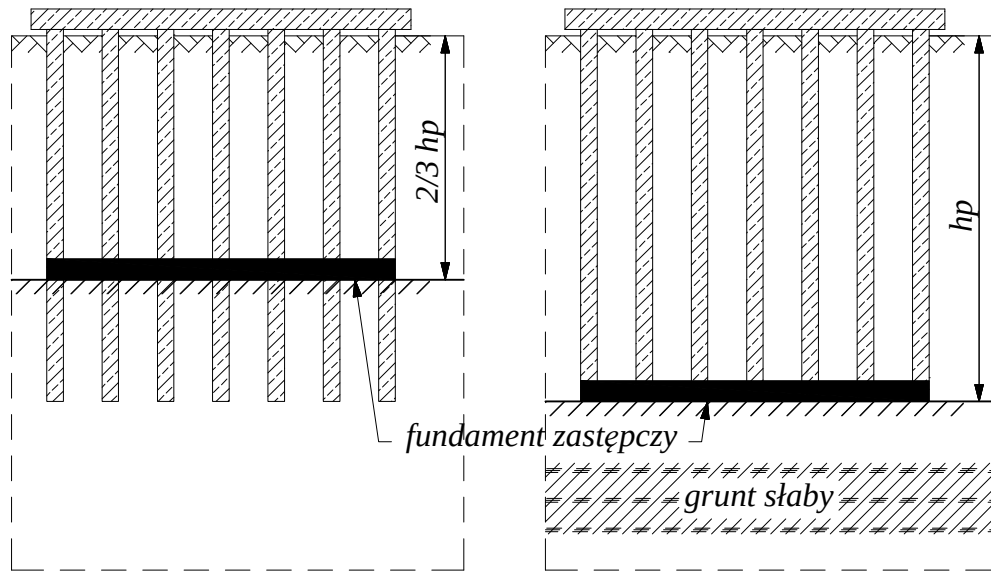
- a) sumy nośności granicznej płyty i wszystkich pali,
- b) nośności bloku gruntowo-palowego z uwzględnieniem powierzchni płyty znajdującej się poza obszarem bloku.

W przeprowadzonym przeglądzie literatury nie prezentowano metod i badań dotyczących analizy pracy pala pojedynczego i grup palowych w ośrodku gruntowym. Liczne metody ich analizy oraz wyniki badań doświadczalnych zostały bogato przedstawione w krajowej literaturze m.in. w pracach [17,26,27,92,93,109]. Poniżej skoncentrowano się na podjętym w rozprawie temacie badań dotyczących fundamentów płytowo-palowych, uwzględniających udział płyty w przekazywaniu obciążenia z grupą pali na podłoże gruntowe.

3.2. Metody analizy współpracy płyty fundamentowej z podłożem i grupą pali

Uprozczone metody analizy fundamentów płytowych spoczywających na podłożu i grupie pali, umożliwiają wstępną ocenę zachowania posadowienia bez konieczności stosowania programów komputerowych. Dlatego też metody te cieszą się dużą popularnością na etapie koncepcji, stadium wykonalności i przedprojektowym.

Jedną z podstawowych i stosunkowo prostych metod uproszczonych obliczania osiadania grup pali jest metoda fundamentu zastępczego, zaproponowana przez **Terzaghiego i Pecka** [17,26,97]. Polega ona na obliczaniu osiadania grupy pali w sposób odpowiadający obliczeniom fundamentów bezpośrednich. W tym celu grupę pali zastępuje się fundamentem bezpośrednim usytuowanym na głębokości wynoszącej $2/3$ długości pali bądź usytuowanym w poziomie ich podstaw w zależności od zaistniałych warunków gruntowych (rys. 3.5). Pierwszy schemat odpowiada palom osadzonym w jednorodnym ośrodku gruntowym i przekazujących obciążenie przede wszystkim poprzez opór pobocznic. Drugi schemat natomiast stosujemy w sytuacji występowania poniżej podstaw pali warstw o dużej odkształcalności.



Rys. 3.5. Schemat usytuowania fundamentu zastępczego [17]

Omawiana metoda doczekała się licznych modyfikacji m.in. w pracach [82,98], a poszczególne podejścia różnią się między sobą poziomem posadowienia fundamentu zastępczego, jego wielkością, uwzględnieniem oporu wokół wytworzonego bloku bądź kolumny czy głębokością strefy aktywnej odpowiadającej miąższości podłoża ulegającej odkształceniu pod wpływem przyłożonego obciążenia. Powyższą metodę, przy odpowiednich założeniach projektowych tzn. odpowiedniej ilości pali, ich rozstawie i długości, można także wykorzystać do oszacowania osiadania fundamentu płytowo-palowego.

Poulos i Davis [82] przedstawili uproszczoną metodę obliczania fundamentów płytowo-palowych. Metoda obowiązuje w zakresie liniowej teorii sprężystości i oparta została na współczynnikach wpływu poszczególnych elementów tworzących fundament. Fundament podzielono na sztywne pojedyncze elementy płyty z palem, a ich oddziaływanie określono współczynnikiem, w postaci:

$$\alpha_r = \frac{\text{dodatkowe osiadanie spowodowane sąsiednimi elementami płyta-pal}}{\text{osiadanie pojedynczego elementu płyta-pal}} \quad (3.3)$$

Osiadanie poszczególnych elementów tworzących fundament, z uwzględnieniem wzajemnych oddziaływań, wyrażono zależnością:

$$\rho_i = \rho_1 \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left(\bar{P}_j \alpha_{rij} \right) + \bar{P}_i \right] \quad (3.4)$$

gdzie:

- α_{rij} - współczynnik wpływu, o wartościach zależnych od wielkości płyty względem średnicy pala oraz odległości pomiędzy poszczególnymi elementami płyta-pal,
- $\bar{P}$ - obciążenie pionowe pojedynczego elementu płyty z palem,
- $\bar{\rho}_1$ - osiadanie pojedynczego elementu płyty z palem pod obciążeniem jednostkowym, wyznaczono ze wzoru:
- $$\bar{\rho}_1 = R_C \cdot \rho_1 \quad (3.5)$$
- ρ_1 - osiadanie pojedynczego pala pod obciążeniem jednostkowym,
- R_C - stosunek osiadania elementu płyta-pal do osiadania pojedynczego pala, o wartościach zależnych od wielkości płyty względem średnicy pala oraz od długości i średnicy pala.

Omawiana metoda pozwala analizować fundament płytowo-palowy w dwóch przypadkach. W pierwszym płyta fundamentowa jest równomiernie obciążona i nie uwzględniamy jej sztywności, a wyniki osiadań poszczególnych elementów płyta-pal wyznaczamy bezpośrednio z równania (3.4). W drugim przypadku analizujemy sztywny fundament płytowo-palowy rozwiązując układ równań, składający się z równania podstawowego (3.4) dla poszczególnych elementów płyta-pal oraz dodatkowo równania równowagi. Rozwiązaniem układu równań są wówczas obciążenia przekazywane przez każdy element płyta-pal oraz średnie osiadanie całego fundamentu.

Randolph [12,83] przedstawił metodę analizy sztywnych fundamentów płytowo-palowych, bazując na rozwiązaniach liniowej teorii sprężystości. Opracowaną metodę oparł na niezależnej analizie fundamentu płytowego i grupy palowej, a ich wzajemne oddziaływanie zostało wyrażone zależnością:

$$\begin{Bmatrix} w_p \\ w_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/k_p & \alpha_{pr}/k_r \\ \alpha_{rp}/k_p & 1/k_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_p \\ P_r \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

gdzie:

- w_p - średnie osiadanie grupy pali w fundamencie płytowo-palowym,
- w_r - średnie osiadanie płyty w fundamencie płytowo-palowym,
- k_p - sztywność grupy pali (bez udziału płyty),
- k_r - sztywność płyty (bez udziału pali),
- P_p - obciążenie przekazywane przez grupę pali w fundamencie płytowo-palowym,
- P_r - obciążenie przekazywane przez płytę w fundamencie płytowo-palowym,
- α_{pr} - współczynnik oddziaływania płyty na grupę pali,
- α_{rp} - współczynnik oddziaływania grupy pali na płytę.

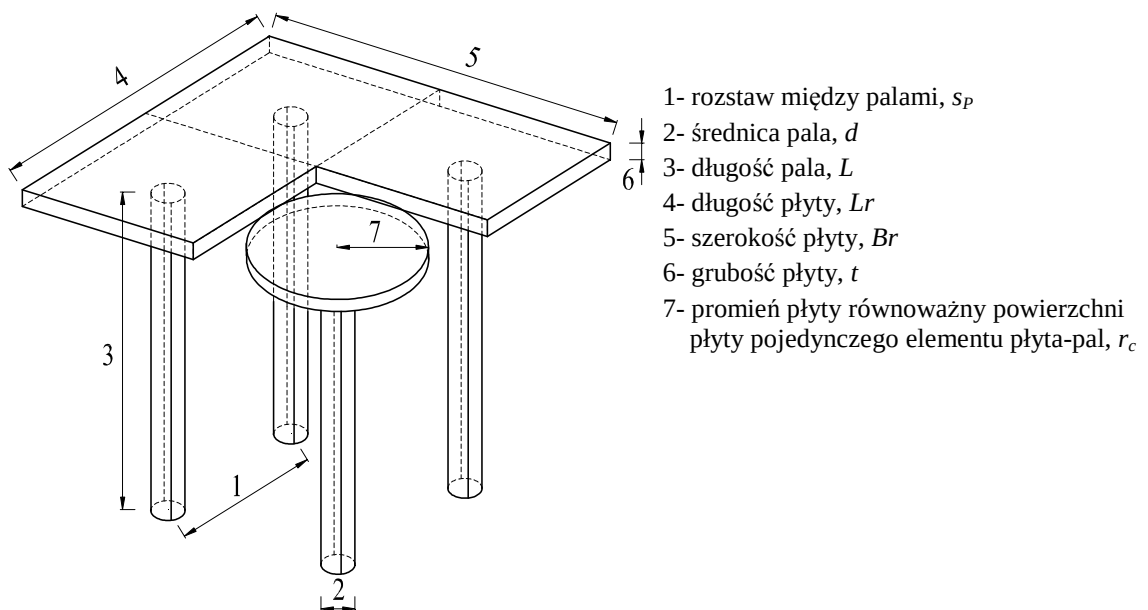
Współczynniki wzajemnych oddziaływań płyty i grupy pali zostały wyznaczone na podstawie analizy pojedynczego elementu płyta-pal (rys. 3.6), uzyskując następujące zależności:

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{k_r}{k_p} \quad (3.7)$$

$$\alpha_{rp} \approx 1 - \frac{\ln(r_c/r_o)}{\ln(2r_m/d)} \quad (3.8)$$

gdzie:

- r_c - promień płyty równoważny powierzchni płyty pojedynczego elementu płyta-pal,
- r_o - promień pala,
- r_m - promień wpływu pala zależny od jego długości i stopnia jednorodności podłoża,
- d - średnica pala.



Rys. 3.6. Wydzielenie pojedynczego elementu płyta-pal z fundamentu [12]

Metoda obowiązuje dla sztywnych fundamentów w zakresie liniowej ich pracy. Umożliwia, przy założeniu równych osiadań grupy pali i płyty oraz uzupełnieniu układu równań (3.6) o równanie równowagi pionowej, wyznaczenie średniego osiadania fundamentu płytowo-palowego oraz rozdziału obciążenia przekazywanego przez płytę i pale. Ponadto autor metody przedstawił zależności umożliwiające wyznaczenie rozdziału obciążenia i sztywności fundamentu płytowo-palowego, odpowiednio w postać:

$$\frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_p + (1 - 2\alpha_{rp})k_r} \quad (3.9)$$

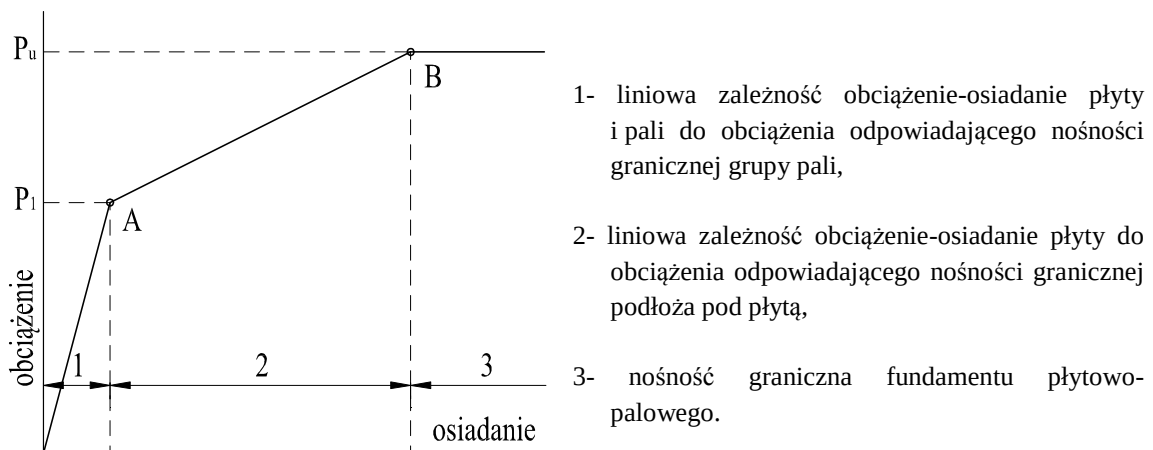
$$k_{pr} = \frac{k_p + (1 - 2\alpha_{rp})k_r}{1 - \alpha_{rp}^2(k_r/k_p)} \quad (3.10)$$

W prowadzonych badaniach Randolph także zaobserwował, że wraz ze wzrostem grupy palowej współczynnik oddziaływania grupy pali na płytę zmierza do stałej wartości wynoszącej 0.8 ($\alpha_{rp}=0.8$). Umożliwia to stosunkowo łatwe wykorzystanie powyższych wzorów, w celu oszacowania rozdziału obciążenia oraz sztywności fundamentu płytowo-palowego.

Poulos, Davis i Randolph [79] opracowali natomiast metodę PDR, służącą analizie fundamentów płytowych spoczywających na podłożu i grupie pali. Bazuje ona na założeniu, że nośność graniczna fundamentu płytowo-palowego równa jest mniejszej z wartości:

- sumy nośności granicznej podłoża pod płytą i grupy pali,
- sumy nośności granicznej kolumny zastępczej oraz części płyty znajdującej się poza obszarem pali.

Zachowanie badanego fundamentu pod obciążeniem pionowym przedstawiono na podstawie liniowego wykresu osiadania w postaci linii łamanej 0-A-B (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Uproszczona relacja obciążenie-osiadanie fundamentu płytowo-palowego [82]

Rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale oszacowano na podstawie rozwiązań Randolpha (3.9) i (3.10).

Metody numeryczne nierozzerwalnie związane są ze współczesnym stanem wiedzy i rozwojem techniki. Umożliwiają one tworzenie algorytmów, które dają szansę numerycznego rozwiązania zadań matematycznych. Metody komputerowe umożliwiają analizowanie zjawisk z predykcją ich skutków, dla zagadnień o stopniu skomplikowania wykraczającym poza zakres stosowania metod analitycznych. Twórcy danej metody umożliwiają ponadto selektywne podejście to czynników istotnie wpływających na przebieg badanego zjawiska, co bezpośrednio przekłada się na jej złożoność i dokładność. Niewątpliwie zalety wykorzystania metod numerycznych w analizie współpracy układu fundament-podłoże, w tym także fundamentów na podłożu i palach, przyczyniły się do ich licznego rozwoju.

Poniżej przedstawiono metody z uwzględnieniem prac pionierskich, które umożliwiły wypracowanie sposobu myślenia o złożoności mechanizmów zachodzących pod płytą fundamentową. Poszczególne prace różnią się przyjętymi założeniami, zakresem stosowania oraz celem dla którego zostały opracowane. Metody numeryczne można podzielić na dwie grupy: przybliżone i szczegółowe. Przybliżone metody opisują stan naprężenia i odkształcenia w ośrodku gruntowym wykorzystując rozwiązania Boussinesqa lub Mindlina. Metodami tymi analizuje się płytę spoczywającą na podłożu i palach, z uwzględnieniem przede wszystkim pionowej składowej naprężenia w gruncie. Szczegółowe metody natomiast wykorzystuje się do analizy pracy układu fundament-podłoże na modelach rozpatrujących konstrukcje w złożonym stanie naprężenia, dostarczając dodatkowych informacji o zjawiskach zachodzących pod płytą w ośrodku gruntowym.

Szczegółowe analizy prowadzono początkowo na podstawie autorskich modeli bazujących przede wszystkim na metodzie elementów skończonych. Rozwój techniki przyczynił się do powszechnej dostępności komercyjnych systemów obliczeniowych, w tym dedykowanych analizie geotechnicznej, które stały się dodatkowym narzędziem w pracy badawczej, a w ostatnim okresie także projektowej. Programy te wykorzystują przede wszystkim wspomnianą metodę elementów skończonych, ale także metodę różnic skończonych i metodę elementów brzegowych. Dysponują bogatą bazą modeli konstytutywnych pozwalających na liniową i nieliniową analizę pracy konstrukcji. Analizy bazujące na komercyjnych programach, pomimo pozornej łatwości stosowania, wymagają szerokiej wiedzy o przyjętych uproszczeniach, założeniach oraz ograniczeniach poszczególnych modeli konstytutywnych podłoża. Złożoność modeli opisujących podłoże oraz ich ciągły rozwój [14,24] wymaga dla ich właściwego opisu

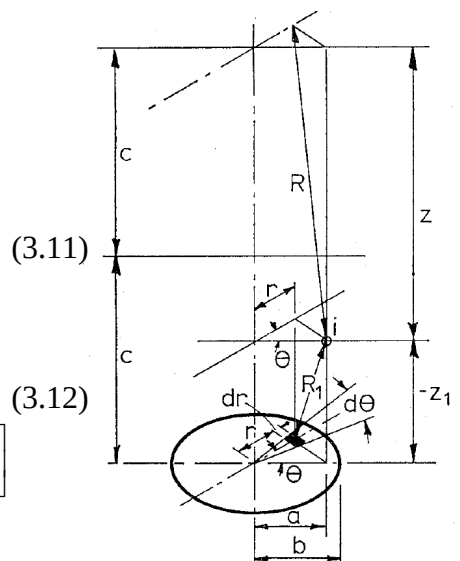
nowych parametrów a zatem i konieczności wykonania w tym celu dodatkowych badań laboratoryjnych [49,101]. Właściwe odzwierciedlenie pracy posadowienia wymaga nierzadko stosowania różnych modeli konstytutywnych dla poszczególnych warstw podłoża. Powszechną praktyką jest także przeprowadzanie analizy wstecznej zachowania konstrukcji, w zbliżonych bądź takich samych warunkach, w celu aktualizacji poszczególnych parametrów podłoża. Takie analizy pomimo swojego skomplikowania nie dają wyraźnej poprawy w odzwierciedlaniu współpracy fundamentów palowych i gruntu, ale w trudnych warunkach geotechnicznych oraz przy skomplikowaniu rozwiązań konstrukcyjnych mogą być jedynym narzędziem pozwalającym z dostateczną dokładnością przeprowadzenie analizy posadowienia. Takie sytuacje występują chociażby na terenach zurbanizowanych w bliskim sąsiedztwie budynków istniejących bądź występujących pod ziemią tuneli, linii metra - Katzenbach, Vrettos [41,104], ale także przy uwzględnianiu dodatkowych technologii wzmacniających warstwy ściśliwe podłoża w celu minimalizacji ich negatywnych oddziaływań na fundamenty palowe - Gwizdała, Cudny [28,29].

Przybliżone metody numeryczne analizy sztywnej płyty spoczywającej na podłożu i palach

Brown i Wiesner [6] przedstawili przybliżoną metodę analizy pasma fundamentu spoczywającego na podłożu i palach. W celu uwzględnienia wzajemnych oddziaływań fundamentu, pali i podłoża wykorzystano rozwiązanie Mindlina i zależność wyznaczającą przemieszczenie dowolnego punktu od pionowej siły wewnątrz półprzestrzeni sprężystej:

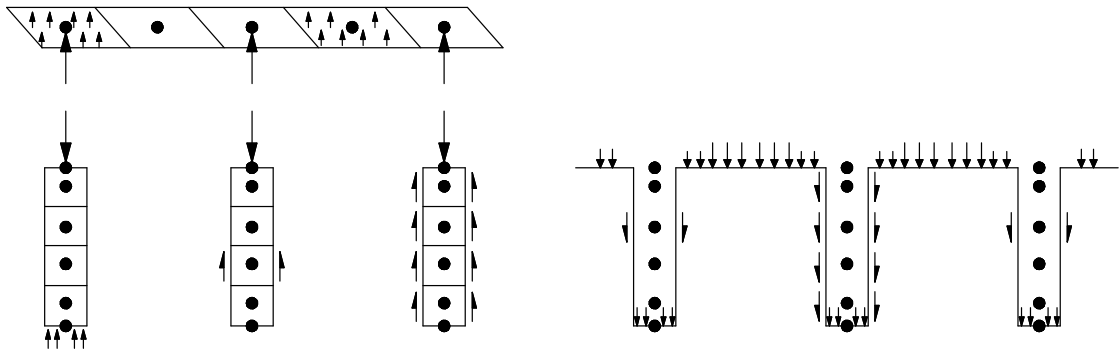
$$\rho_{ib} = \int_0^{2\pi} \int_0^b p_b I r dr d\theta \quad (3.11)$$

$$I = \frac{1+\nu}{8\pi(1-\nu)E_s} \left[\frac{z_1^2}{R_1^3} + \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{5-12\nu+8\nu^2}{R} + \dots \right. \\ \left. + \frac{(3-4\nu)z^2 - 2cz + 2c^2}{R^3} + \frac{6cz^2(z-c)}{R^5} \right] \quad (3.12)$$



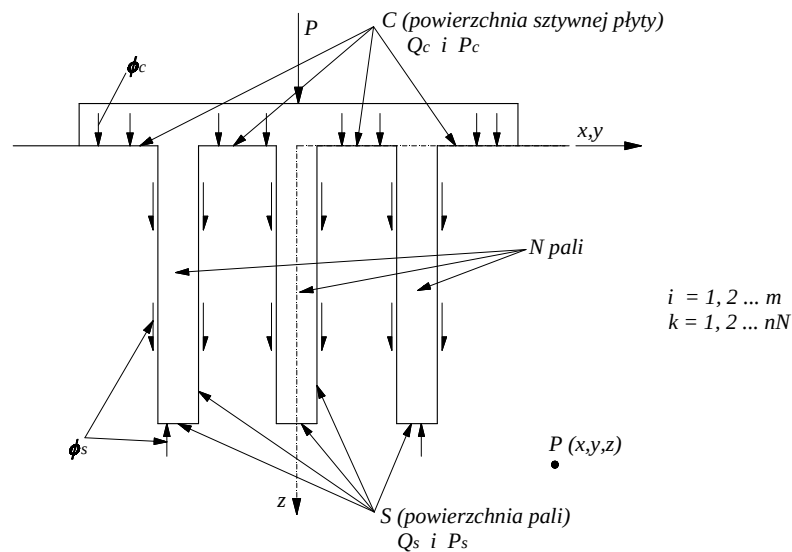
Rys. 3.8. Całkowanie równania Mindlina [6]

Omawiana metoda polega na wyznaczeniu takiego rozkładu naprężenia kontaktowego pod sztywnym pasmem, aby osiadania poszczególnych elementów ją tworzących były takie same.



Rys. 3.9. Naprężenia kontaktowe pasmo fundamentowe z podłożem i palami [6]

Butterfield i Banerjee [7] opracowali metodę pozwalającą analizować sztywną płytę spoczywającą na jednorodnej półprzestrzeni sprężystej i palach, z możliwością uwzględnienia ich ściśliwości.



Rys. 3.10. Schemat fundamentu [8]

W wyniku prowadzonych badań nad grupą pali, autorzy metody zaobserwowali nieznaczny wpływ zgodności przemieszczeń radialnych na uzyskiwane wyniki. W związku z powyższym nie zostały one uwzględnione w metodzie obliczania fundamentów płytowo-palowych. Wzajemne oddziaływanie poszczególnych elementów fundamentu na siebie wyrażono w postaci osiadań cząstkowych, uzyskanych przez całkowanie równania Mindlina i przedstawionych równaniami:

$$W(P_C)_i = \sum_{j=1}^m (\phi_C)_j K(P_C, Q_C)_{ij} + \sum_{j=1}^{nN} (\phi_S)_j K(P_C, Q_S)_{ij} \quad (3.13)$$

$$W(P_S)_k = \sum_{j=1}^m (\phi_C)_j K(P_S, Q_C)_{kj} + \sum_{j=1}^{nN} (\phi_S)_j K(P_S, Q_S)_{kj} \quad (3.14)$$

gdzie:

$W(P_C)_i/W(P_S)_k$ - przemieszczenie pionowe pola dyskretyzowanej powierzchni płyty/pali,

ϕ_C/ϕ_S - naprężenie kontaktowe w polu dyskretyzowanej powierzchni płyty/pali,

P_C/P_S - środek ciężkości elementarnego pola powierzchni płyty/pali,

Q_C/Q_S - środek ciężkości pola płyty/pali przekazującego obciążenie,

K - współczynnik wpływu w oparciu o rozwiązanie Mindlina,

N - ilość pali,

m, n - ilość pól podziału płyty i pojedynczego pala.

Ostatecznie prezentowany model matematyczny przedstawiono w postaci macierzowej:

$$\{W\} = [K]\{\phi\} \quad (3.15)$$

gdzie:

$\{W\}$ - wektor przemieszczeń pionowych pól dyskretyzowanej powierzchni płyty i pali,

$[K]$ - macierz współczynników wpływu wzajemnych oddziaływań,

$\{\phi\}$ - wektor naprężeń kontaktowych pól powierzchni płyty i pali.

Wykorzystując iteracyjne obliczenia bazujące na metodzie różnic skończonych, uwzględniono ściśliwość pali używając do ich opisu równanie:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = - \frac{P_z}{A_p E_p} \quad (3.16)$$

Knabe [46,47] opracował metodę analizy współpracy sztywnej płyty fundamentowej z podłożem gruntowym i ściśliwymi palami. Metoda polega na znalezieniu takiego rozkładu naprężenia pod płytą, na pobocznicach i pod podstawami pali, aby były spełnione warunki brzegowe dotyczące przemieszczeń i rozkładu naprężeń, co zostało wyrażone zależnością:

$$\{F\} = \left([IN] - \frac{4\delta^2}{E_p d} [K] \right)^{-1} \{B\} \quad (3.17)$$

gdzie:

$\{F\}$ - macierz naprężeń,

$[IN]$ - macierz współczynników wpływu dla przemieszczeń gruntu,

δ - długość elementu pobocznicy,

$[K]$ - macierz współczynników dla przemieszczeń elementów pali,

E_p - moduł sprężystości pala,
 d - średnica pala,
 $\{B\}$ - macierz przemieszczeń elementów płyty.

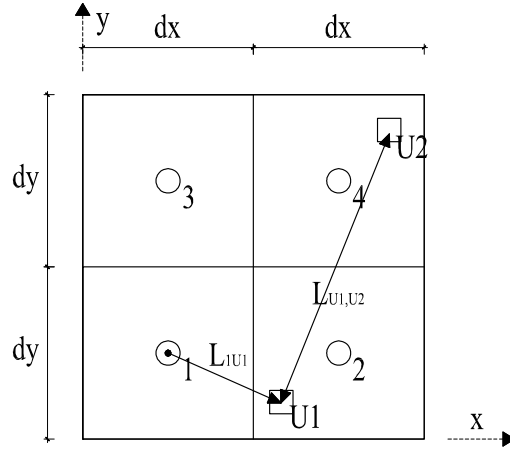
Macierz współczynników wpływu dla przemieszczeń gruntu wyznaczono bazując na rozwiązaniu Mindlina, natomiast ściśliwość pali uwzględniono wykorzystując metodę różnic skończonych. Metoda pozwala analizować fundamenty na jednorodnym izotropowym ośrodku liniowo sprężystym.

Zagadnienie analizy osiadania fundamentów płytowo-palowych przedstawił także **Kuwabara** [51]. W opracowanej metodzie fundament spoczywa na jednorodnej półprzestrzeni sprężystej i poddany jest pionowemu obciążeniu o wartości niewykraczającej poza liniowy zakres pracy posadowienia. W swoich badaniach Kuwabara przeprowadził także analizę porównawczą zachowania grup palowych i fundamentów płytowo-palowych. Stwierdził, że udział płyty w nieznacznym stopniu wpływa na redukcję osiadania w porównaniu z osiadaniem grupy pali, pomimo przenoszenia przez nią od 20 % do 40 % obciążenia całkowitego przyłożonego na fundament.

Meyer i Chruściewicz [60,61] zaproponowali metodę analizy sztywnych fundamentów płytowo-palowych. Badania skoncentrowano wokół analizy wpływu stanu naprężenia pod płytą na osiadanie fundamentu. Stan naprężenia w ośrodku gruntowym oraz wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża oparto na liniowej teorii Boussinesqa. Rodzaj podłoża uwzględniano poprzez wprowadzenie współczynnika koncentracji naprężenia Fröhlicha κ :

$$\sigma_z(Q) = \frac{\kappa \cdot Q \cdot z^\kappa}{2\pi \cdot R^{\kappa+2}}, \quad L = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad R = \sqrt{L^2 + z^2} \quad (3.18)$$

Model matematyczny osiadania fundamentu sprowadza się do rozwiązywania układu równań liniowych. Przedstawiono go za autorami na poniższym przykładzie, przy podziale płyty na cztery pola i wykorzystaniu dwóch pali (rys. 3.11). Układ ten składa się z równań opisujących osiadanie w pionach obliczeniowych w polach dyskretyzowanej płyty fundamentowej, osiach pali oraz ostatniego równanie równowagi sił.



Rys. 3.11. Płyta fundamentowa na dwóch palach [11]

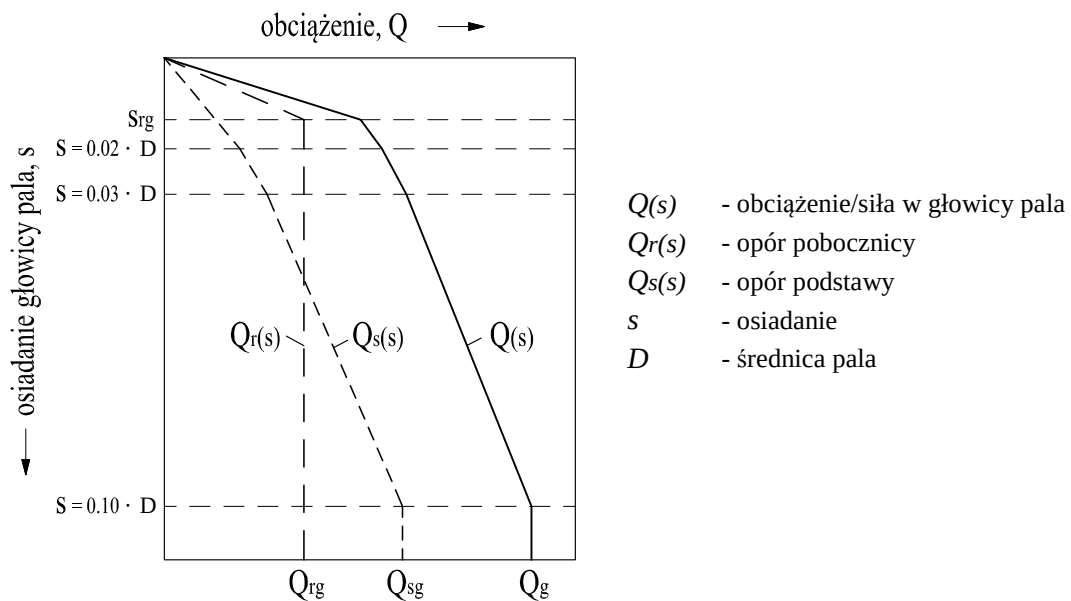
$$\begin{cases}
 s_1 = 1.25 \frac{r_1 dy}{E} f(\kappa) M + \frac{r_2 dx dy}{\pi E} f_1(L_{1-2}, \kappa) M + \frac{r_3 dx dy}{\pi E} f_1(L_{1-3}, \kappa) M + \frac{r_4 dx dy}{\pi E} f_1(L_{1-4}, \kappa) M + \frac{U_1}{\pi E} f_2(h_{p1}, L_{1-U1}, \kappa) + \frac{U_2}{\pi E} f_2(h_{p2}, L_{1-U2}, \kappa) \\
 s_2 = \frac{r_1 dx dy}{\pi E} f_1(L_{2-1}, \kappa) M + 1.25 \frac{r_2 dy}{E} f(\kappa) M + \frac{r_3 dx dy}{\pi E} f_1(L_{2-3}, \kappa) M + \frac{r_4 dx dy}{\pi E} f_1(L_{2-4}, \kappa) M + \frac{U_1}{\pi E} f_2(h_{p1}, L_{2-U1}, \kappa) + \frac{U_2}{\pi E} f_2(h_{p2}, L_{2-U2}, \kappa) \\
 s_3 = \frac{r_1 dx dy}{\pi E} f_1(L_{3-1}, \kappa) M + \frac{r_2 dx dy}{\pi E} f_1(L_{3-2}, \kappa) M + 1.25 \frac{r_3 dy}{E} f(\kappa) M + \frac{r_4 dx dy}{\pi E} f_1(L_{3-4}, \kappa) M + \frac{U_1}{\pi E} f_2(h_{p1}, L_{3-U1}, \kappa) + \frac{U_2}{\pi E} f_2(h_{p2}, L_{3-U2}, \kappa) \\
 s_4 = \frac{r_1 dx dy}{\pi E} f_1(L_{4-1}, \kappa) M + \frac{r_2 dx dy}{\pi E} f_1(L_{4-2}, \kappa) M + \frac{r_3 dx dy}{\pi E} f_1(L_{4-3}, \kappa) M + 1.25 \frac{r_4 dy}{E} f(\kappa) M + \frac{U_1}{\pi E} f_2(h_{p1}, L_{4-U1}, \kappa) + \frac{U_2}{\pi E} f_2(h_{p2}, L_{4-U2}, \kappa) \\
 s_{U1} = \frac{r_1 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p1}, L_{U1-1}, \kappa) M + \frac{r_2 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p1}, L_{U1-2}, \kappa) M + \frac{r_3 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p1}, L_{U1-3}, \kappa) M + \frac{r_4 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p1}, L_{U1-4}, \kappa) M + \dots \\
 \quad + 1.25 \frac{U_1}{Eb_1} f(\kappa) + \frac{U_2}{\pi E} f_4(h_{p1}, h_{p2}, L_{U1-U2}, \kappa) \\
 s_{U2} = \frac{r_1 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p2}, L_{U2-1}, \kappa) M + \frac{r_2 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p2}, L_{U2-2}, \kappa) M + \frac{r_3 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p2}, L_{U2-3}, \kappa) M + \frac{r_4 dx dy}{\pi E} f_3(h_{p2}, L_{U2-4}, \kappa) M + \dots \\
 \quad + \frac{U_1}{\pi E} f_4(h_{p1}, h_{p2}, L_{U2-U1}, \kappa) + 1.25 \frac{U_2}{Eb_2} f(\kappa) \\
 \sigma_0 ab = r_1 dx dy + r_2 dx dy + r_3 dx dy + r_4 dx dy + U_1 + U_2
 \end{cases}$$

gdzie: (3.19)

- a, b - wymiary płyty fundamentowej [m],
- σ_0 - obciążenie zewnętrzne równomiernie rozłożone [kPa],
- E - moduł odkształcenia gruntu [MPa],
- h_{pi} - długość pala i [m],
- $L_{i,j}$ - odległość pomiędzy pionem obliczeniowym i punktem działania siły [m],
- M - współczynnik uwzględniający niejednorodność podłoża gruntowego,
- r_i - odpór sztywnej płyty [kPa],
- s_i - osiadanie cząstkowe w poszczególnych pionach obliczeniowych [m],
- U_i - nośność pala i [kN].

Funkcje $f_i(\dots)$ wyrażające wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża są wynikiem całkowania rozkładu naprężenia w gruncie opisanego wzorem (3.18), dla danego rodzaju podłoża wyrażonego współczynnikiem κ .

El Gendy, Hanisch i Kany [18] są autorami metody służącej analizie współpracy sztywnych fundamentów płytowo-palowych z podłożem. W metodzie wykorzystano empiryczne zależności opisujące zachowanie pojedynczego pala pod obciążeniem przyłożonym w głowicy zgodnie z normą DIN 4014 [110]. Zależności oraz wytyczne zawarte w normie umożliwiają, w oparciu o wyniki badań podłoża, wyznaczenie relacji obciążenie-osiadanie pojedynczego pala z określeniem oporu pobocznicy i podstawy. Norma ta pozwala ostatecznie przedstawić graficznie zachowanie pala w gruncie zgodnie z rysunkiem 3.12.



Rys. 3.12. Relacja obciążenie-osiadanie pojedynczego pala zgodnie z normą DIN 4014 [110]

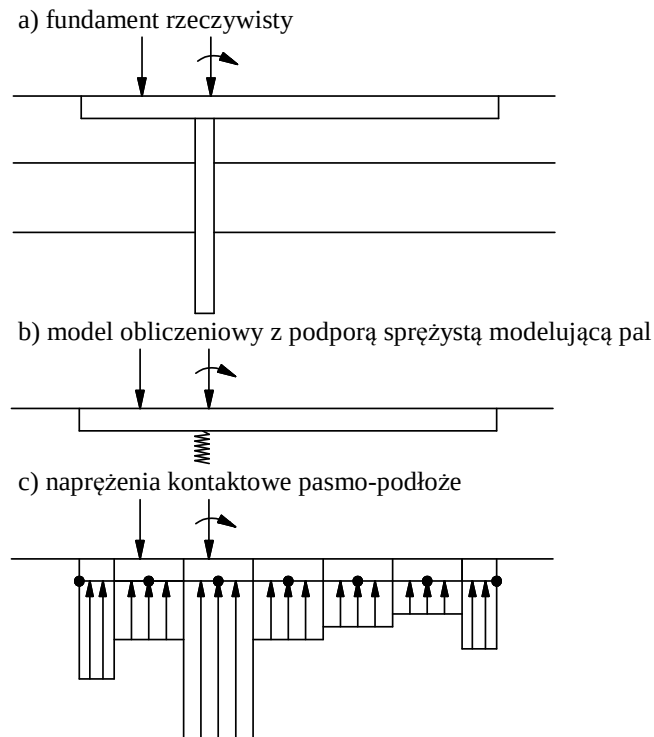
Natomiast wzajemną interakcję płyty, pali i podłoża wyrażono w postaci osiadań cząstkowych wykorzystując, w celu opracowania współczynników wpływu, rozwiązanie Mindlina. Ostatecznie metoda polega na iteracyjnym wyznaczeniu, z założoną dokładnością, zgodnego osiadania płyty, pali i podłoża.

Metodę analizowania sztywnych fundamentów płytowo-palowych przedstawiono także w pracy **Meyera i Cichockiego** [63]. Bazowała ona na analizie stanu naprężenia, a jej modyfikacja umożliwiła wyznaczenie oporu wzdłuż pobocznicy pala w gruncie niespoistym w oparciu o naprężenia pionowe i stan parcia gruntu [62].

Przybliżone metody numeryczne analizy sprężystej płyt spoczywającej na podłożu i palach

Poulos [77] zaproponował metodę analizy fundamentów płytowo-palowych na podstawie wydzielonego pasma płyty z palami. Istotą metody jest analiza elementu

belkowego, modelującego pasmo płyty fundamentowej, spoczywającego na sprężystych podporach o zadanej sztywności (rys. 3.13). Wzajemne oddziaływanie układu pasmo-pale-podłoże wyznaczono bazując na rozwiązaniu Mindlina. Opracowana metoda analizy pasma płyty, umożliwia w przybliżony sposób uwzględnienie wpływu płyty usytuowanej poza badanym obszarem. Dokonano tego przez uwzględnienie dodatkowych przemieszczeń podłoża wywołanych obciążeniem przyłożonym do płyty poza wydzielonym pasmem.



Rys. 3.13. Fundament pasmowo-palowy [77]

Pomimo uproszczeń przyjętych w metodzie autor wykazał dużą zgodność wyników z bardziej złożonymi badaniami. Do niewątpliwych ograniczeń metody należy wymienić nieuwzględnienie dwukierunkowego zginania płyty oraz rozbieżności uzyskiwanych wyników osiadań w punktach przecięcia różnie ukierunkowanych pasm płyty.

Hongladaromp, Chen i Lee [35] wykorzystując metodę różnic skończonych przedstawili metodę obliczania fundamentu płytowego spoczywającego na podłożu i palach. W metodzie tej płyta spoczywa na półprzestrzeni sprężystej oraz palach traktowanych jako niezależne podpory sprężyste. Ugięcie sprężystej płyty wyraża macierzowo zależność:

$$\{w\} = [K^*]^{-1} \{q\} \quad (3.20)$$

$$[K^*] = [K] + \gamma[\bar{K}] + \beta[K_p] \quad (3.21)$$

gdzie:

- $\{w\}$ - wektor osiadania płyty,
- $\{q\}$ - wektor obciążenia na powierzchni płyty,
- $[K^*]$ - macierz sztywności płyty na podłożu i palach,
- $[K]$ - macierz sztywności płyty,
- $[\bar{K}]$ - macierz sztywności podpór modelujących podłoże,
- $[K_p]$ - macierz sztywności podpór modelujących pale,
- γ - współczynnik sztywności podpór modelujących podłoże,
- β - współczynnik sztywności podpór modelujących pale.

Przedstawiona metoda obowiązuje w zakresie liniowej pracy fundamentu oraz nie uwzględnia części oddziaływań występujących w podłożu. Naprężenia kontaktowe płyta-podłoże wyznaczono nie uwzględniając wpływu pali na podatność ośrodka gruntowego, co wpływa na zawyżenie ich wartości. Naprężenia na powierzchni półprzestrzeni sprężystej wyznaczono bazując na rozwiązaniu Boussinesqa. Ponadto prezentowana metoda zakłada równomierne obciążenie przekazywane przez poszczególne pale niezależnie od sztywności płyty, co jest niezgodne z rzeczywistą pracą grup palowych i stanowi znaczne jej ograniczenie.

Dokładniejszą analizę badanego posadowienia wykorzystującą natomiast metodę elementów skończonych do opisu płyty opracowali **Hain i Lee** [30]. Badania przeprowadzono dla sprężystej płyty spoczywającej na ściśliwych palach i półprzestrzeni sprężystej modelującej jednorodny oraz opisane modelem Gibsona ośrodek gruntowy [20].

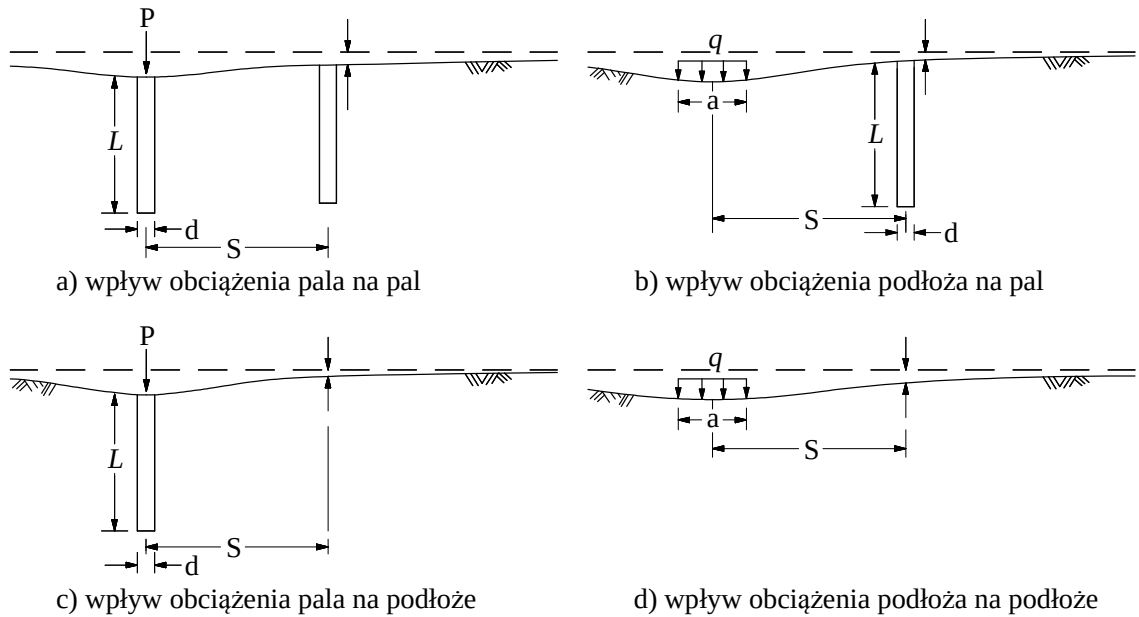
Do wyznaczenia oddziaływań poszczególnych elementów fundamentu, przedstawionych na rysunku 3.14, wykorzystano równanie Mindlina oraz zasadę superpozycji naprężenia. Oddziaływania wyrażono w postaci osiadań, co przedstawiają równania (3.22) i (3.23) określające odpowiednie osiadanie węzłów dyskretyzowanej płyty, w miejscu usytuowania podłoża i pali:

$$\omega_k = \omega_1(k) \sum_{j=1}^n \beta_s(k, j) P_j + \sum_{j=n+1}^m f(k, j) p_j A_j \quad (3.22)$$

$$\omega_i = \rho_1(i) \sum_{j=1}^n \alpha(i, j) P_j + \rho_1(i) \sum_{j=n+1}^m \beta_p(i, j) p_j A_j \quad (3.23)$$

gdzie:

- m - ilość węzłów dyskretyzowanej płyty,
- n - ilość węzłów dyskretyzowanej płyty w miejscu kontaktu płyta-pal,
- $\rho_1(i)$ - osiadanie pala wywołane jednostkowym obciążeniem,
- $\alpha(i, j)$ - współczynnik osiadania pala i wywołanego obciążeniem pala j ,
- P_j - obciążenie pala j ,
- $\beta_p(i, j)$ - współczynnik osiadania pala i wywołanego obciążeniem pola płyty j ,
- p_j - obciążenie równomiernie rozłożone pod polem płyty j ,
- A_j - powierzchnia elementarnego pola płyty j ,
- $\omega_1(k)$ - osiadanie podłoża w węźle k wywołane jednostkowym obciążeniem,
- $\beta_s(k, j)$ - współczynnik osiadania podłoża k wywołanego obciążeniem pala j ,
- $f(k, j)$ - osiadanie podłoża k wywołane jednostkowym obciążeniem pola płyty j .



Rys. 3.14. Interakcja płyty, pali i podłoża w badaniach Hain i Lee [30]

Powyższe równania posłużyły do wyznaczenia macierzy sztywności układu podłoże-grupa pali stanowiące posadowienie płyty $|K_{fp}|$. Sprężyste własności płyty wyrażono natomiast macierzą sztywności pionowej płytowych elementów skończonych ją tworzących $|K'_R|$. Ostatecznie pozwoliło to sprowadzić zagadnienie analizy sprężystej płyty na podłożu i grupie pali do układu równań:

$$\{W\} = |K'_R + K_{fp}| \{w\} \quad (3.24)$$

gdzie:

$\{W\}$ - wektor obciążeń zewnętrznych,

$\{w\}$ - wektor przemieszczeń poszczególnych węzłów płyty.

Hain i Lee w prowadzonych badaniach dokonali także bogatego przeglądu uzyskiwanych wyników, co dostarczyło cennych informacji na temat zachowania fundamentów płytowo-palowych.

Poulos [78] w analizie sprężystej płyty przedstawił rozwiązanie bazujące na metodzie różnic skończonych. Poddano w niej badaniu płytę na uwarstwionym podłożu sprężystym oraz podporach sprężystych modelujących pale. W metodzie wprowadzono warunek określający wartość graniczną naprężenia kontaktowego płyta-podłoże oraz uwzględniono wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża, w postaci osiadań cząstkowych wywołanych naprężeniami generowanymi w gruncie od poszczególnych elementów fundamentu.

Metoda polega na wyznaczeniu takiego rozkładu naprężenia kontaktowego pod płytą, aby jej ugięcia były zgodne z występującym pod nią osiadaniami podłoża. W związku z powyższym ugięcie płyty o stałej sztywności oraz osiadanie podłoża wyrażono przyrostowymi formułami odpowiednio w postaci:

$$[D_p]\{\Delta\rho_r\} = \frac{\{\Delta q\}}{D} - \frac{\{\Delta p\}}{D} \quad (3.25)$$

$$\{\Delta\rho_s\} = [I_s]\{\Delta p\} + \{\Delta S_0\} \quad (3.26)$$

gdzie:

$\{\Delta\rho_r\}$ - wektor przyrostu osiadania płyty,

$\{\Delta\rho_s\}$ - wektor przyrostu osiadania podłoża,

$[D_p]$ - macierz współczynników metody różnic skończonych,

$\{\Delta q\}$ - wektor przyrostu obciążenia zewnętrznego płyty,

$\{\Delta p\}$ - wektor przyrostu naprężenia kontaktowego pomiędzy płytą a podłożem,

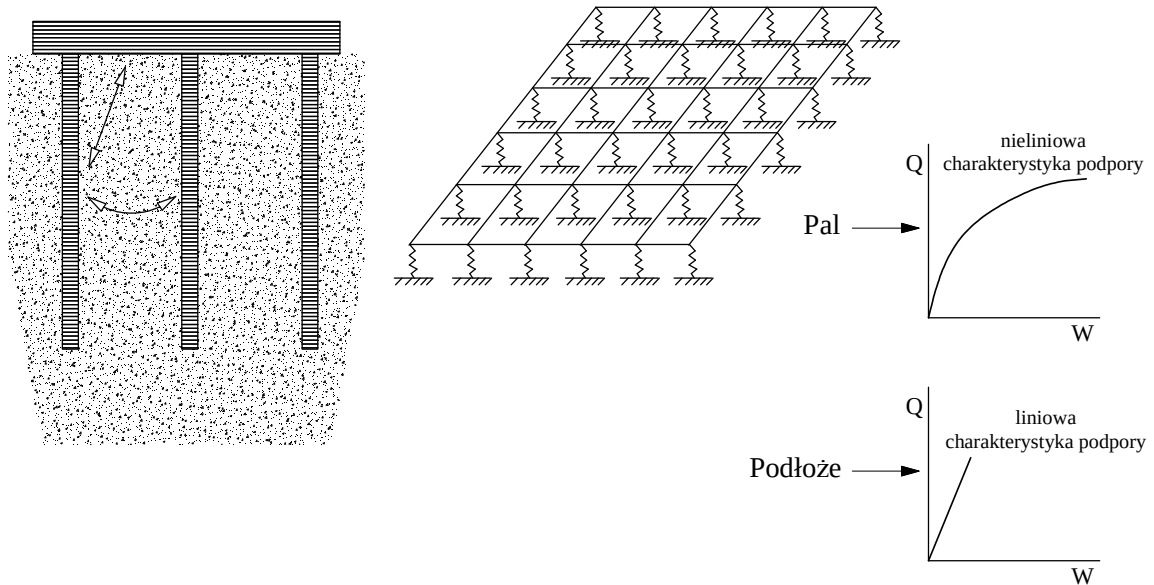
D - sztywność płyty na zginanie,

$[I_s]$ - macierz współczynników wpływu osiadania podłoża,

$\{\Delta S_0\}$ - wektor przyrostu dodatkowych osiadań np. wywołanych konsolidacją.

Russo [87] zaproponował wykorzystanie metody elementów skończonych w obliczaniu płyty fundamentowej na podporach sprężystych, modelujących podłoże i pale (rys. 3.15) oraz klasycznego podejścia w analizie stanu naprężenia w ośrodku

gruntowym traktowanym jako półprzestrzeń sprężystą. W metodzie tej wzajemne oddziaływanie pomiędzy elementami płyty wyznaczono wykorzystując równanie Boussinesqa. Do opisu osiadania pala pod obciążeniem przyłożonym w głowicy wykorzystano krzywą China, która umożliwia nadanie nieliniowej charakterystyki podpór palowych. Do uwzględnienia wzajemnych oddziaływań pomiędzy palami oraz pali z płytą posłużyły natomiast rozwiązania teorii sprężystości, z uwzględnieniem badań Randolpha i Wrotha [84].



Rys. 3.15. Podstawowa charakterystyka modelu fundamentu płytowo-palowego [87]

W metodzie przyjęto uproszczenie, że współczynnik wpływu obciążenia przekazywanego przez pale na elementy płyty jest taki sam, jak elementów płyty na pale. Nie uwzględniono ponadto wpływu mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali na wzajemną interakcję układu płyta-pale-podłoże.

Clancy, Griffiths i Randolph [12,23] wykorzystali w analizie fundamentów płytowo-palowych metodę elementów skończonych do opisu płyty i pali na podporach sprężystych modelujących podłoże oraz klasyczne podejście w analizie mechanizmów zachodzących pod płytą (rys. 3.16). W prezentowanym podejściu uwzględniono jedynie pionową składową naprężenia w gruncie. Autorzy w prowadzonych badaniach wykorzystali metodę Chowa [10], służącą obliczaniu grup palowych. W metodzie tej pale modelowane są jako jednowymiarowe prętowe elementy skończone o charakterystyce podpór sprężystych wyznaczonych w oparciu o rozwiązanie Randolpha i Wrotha [84] dla pobocznic i podstawy pala, pod obciążeniem przyłożonym w jego głowicy, wyrażonych odpowiednio wzorami:

$$k_s = \frac{2\pi \cdot G \cdot L}{\ln(r_m/r_0)} \quad (3.27)$$

$$k_b = \frac{4 \cdot G \cdot r_0}{1 - \nu} \quad (3.28)$$

gdzie:

k_s - sztywność podpór sprężystych modelujących opór pobocznicy pła,

k_b - sztywność podpór sprężystych modelującej opór podstawy pała

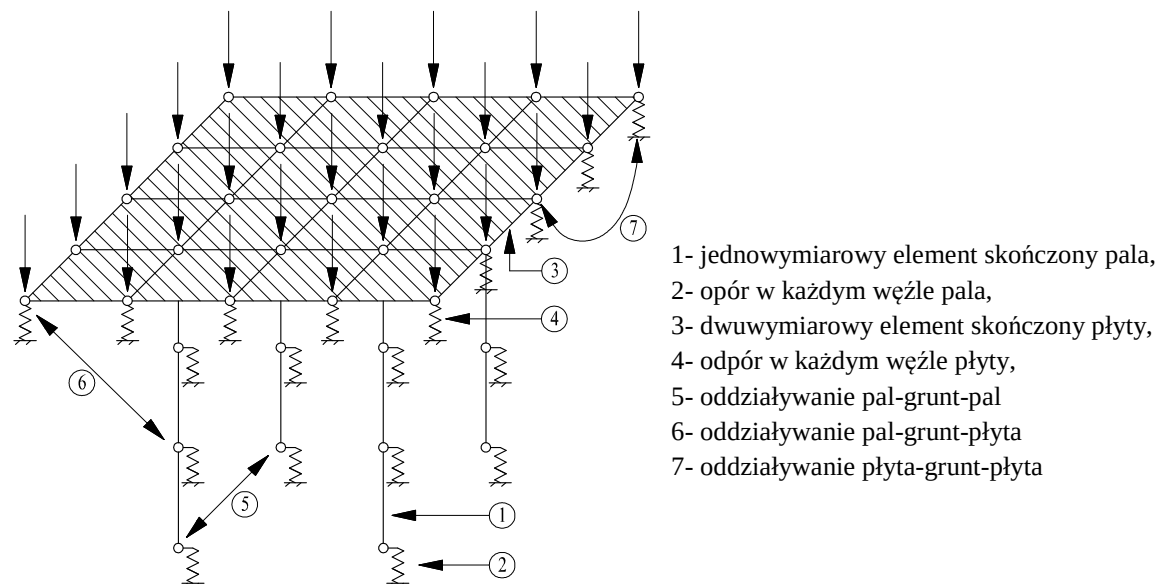
G - moduł odkształcenia postaciowego,

L - długość pojedynczego elementu skończonego,

r_m - granica oddziaływania pala,

r_0 - promień pala,

ν - współczynnik Poissona.

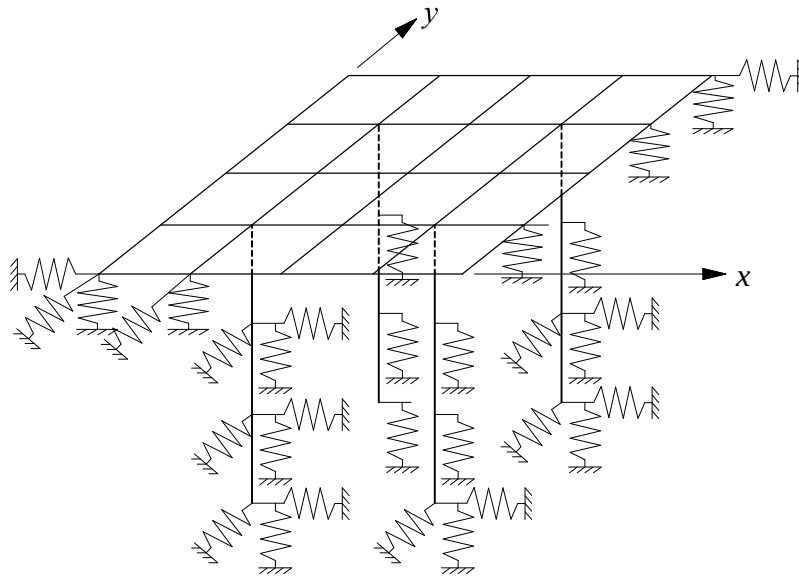


Rys. 3.16. Dyskretny model fundamentu płytowo-palowego [12]

Uwzględnienie wzajemnych oddziaływań węzłów poszczególnych pali na siebie dokonano wykorzystując rozwiązanie Mindlina, które w omawianej metodzie posłużyło także do wyznaczenia wzajemnych oddziaływań pomiędzy węzłami płyty i pali. Płyta natomiast została opisana dwuwymiarowymi płytowymi elementami skończonymi, o trzech stopniach swobody w węzłach tj. jednym przemieszczeniu translacyjnym prostopadłym do powierzchni płyty i dwóm rotacyjnym.

Metodę obliczania fundamentów płytowo-palowych pod obciążeniem pionowym i poziomym przedstawili **Kitiyodom i Matsumoto** [56]. Wykorzystano w niej metodę elementów skończonych do opisu konstrukcji fundamentu bazując na elementach

płytowych i belkowych modelujących odpowiednio płytę i pale. Zachowanie ośrodka gruntowego wyrażają podpory o pionowych i poziomych własnościach sprężystych odzwierciedlających opory pobocznic i podstaw pali oraz odpór płyty. Wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża, zarówno dla sił pionowych jak i poziomych, wyznaczono w oparciu o rozwiązanie Mindlina. Autorzy metody posłużyli się także liniowo sprężystym idealnie plastycznym modelem charakteryzującym ośrodek gruntowy.



Rys. 3.17. Numeryczny model fundamentu płytowo-palowego [56]

W oparciu o powyższą metodę **Kitiyodom i Matsumoto** [42] zaproponowali także metodę obliczania płyt fundamentowych spoczywających na podłożu i dużej ilości przekraczającej sto pali. W tym rozwiązaniu analizie poddano płytę na podporach sprężystych o sztywności podpór modelujących podłoże i pale. Wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża wyznaczono jak w metodzie podstawowej. Omawiana metoda, polegająca na zastąpieniu elementów belkowych podporami sprężystymi, ograniczyła długość trwania obliczeń.

Tejchman, Gwizdała, Krasiński i Słabek [94,96] opracowali inżynierską metodę obliczania fundamentów płytowo-palowych. Wykorzystano w niej komercyjny program do analizy statycznej płyt na sprężystym podłożu, co umożliwia powszechne jej stosowanie w projektowaniu. Metoda polega na analizie płyty na podporach sprężystych, modelujących pale i podłoże.

W celu wyznaczenia charakterystyk sprężystych podpór palowych K_{zp} , uwzględniających pracę pali w grupie, autorzy wykorzystali metodę Dyki [17]

(dopuszczając także stosowanie innych metod, jak Poulosa [82] bądź Chowa [10]) określając:

$$K_{zp} = \frac{Q_{pi}}{s_{pi}} \quad (3.29)$$

gdzie:

Q_{pi} - siła przypadająca na pal i ,

s_{pi} - osiadanie pala i w grupie.

Sprężystość podpór modelujących podłoże gruntowe k_{zg} między palami wyznaczono na podstawie obliczeń osiadań podłoża metodą odkształceń jednoosiowych, uwzględniając jego podatność pod wiotką płytą fundamentową. Płytę podzielono na pola. Analizując ich osiadanie z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania pod obciążeniem zewnętrznym, zróżnicowano sprężystość podpór modelujących podłoże wykorzystując zależność:

$$k_{zg} = \frac{q_{gj}}{s_{gj}} \quad (3.30)$$

gdzie:

q_{gj} - siła przypadająca na powierzchnię zebraną w punkcie j ,

s_{gj} - osiadanie podłoża gruntowego w punkcie j .

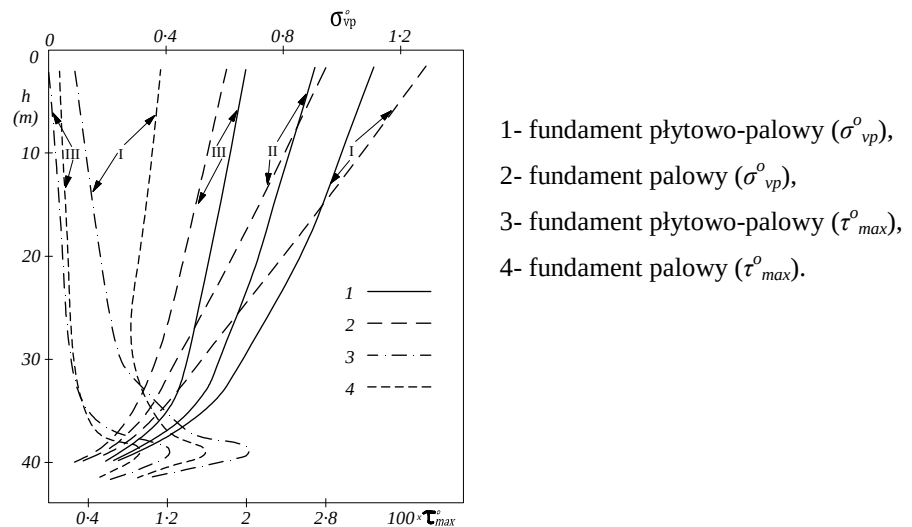
Istota metody polega na iteracyjnym obliczeniu płyty na podporach sprężystych, jednym z dostępnych programów realizujących powyższe zadanie, do których zaliczamy m.in.: Robot Structural Analysis, ABC Płyta. W pierwszym kroku obliczeń założono jednakową charakterystykę podpór palowych wg wzoru (3.29) oraz podpór modelujących podłoże gruntowe wg wzoru (3.30), przy założeniu przemieszczeń płyty do 50 mm. Na podstawie uzyskanych wyników sił w palach oraz obciążenia podłoża gruntowego obliczono osobno osiadanie pali w grupie (metoda Dyki) oraz osiadanie pól podzielonej płyty (metoda odkształceń jednoosiowych), co umożliwiło wyznaczenie nowych wartości charakteryzujących podpory sprężyste. Obliczenia prowadzone są do uzyskania założonej zbieżności wyników. Ostateczne obliczenia płyty są wykonywane dla rzeczywistych obciążeń z odpowiednimi współczynnikami bezpieczeństwa.

Szczegółowe metody numeryczne analizy sprężystych fundamentów płytowo-palowych

Ottaviani [72] przedstawił analizę zachowania fundamentu płytowo-palowego pod obciążeniem pionowym, wykorzystując trójwymiarowe elementy skończone. Model

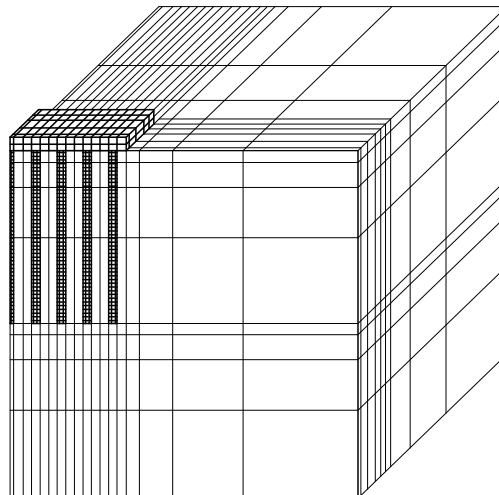
sprowadzony został do układu osiowo-symetrycznego, a zbudowany z ośmiowęzłowych elementów sześciennych. Badania przeprowadzono opisując fundament oraz jednorodne podłoże liniowymi modelami materiałowymi.

W pracy zwrócono uwagę na różnice mechanizmów zachodzące w ośrodku gruntowym w analizie posadowienia bez i z udziałem płyty w przekazywaniu obciążenia (rys. 3.18). Udział płyty wpływa na redukcję naprężeń ścinających (τ_{max}^o) w górnych częściach pali, jednocześnie zwiększając wartość naprężenia pionowego (σ_{vp}^o) na ich niższych odcinkach.



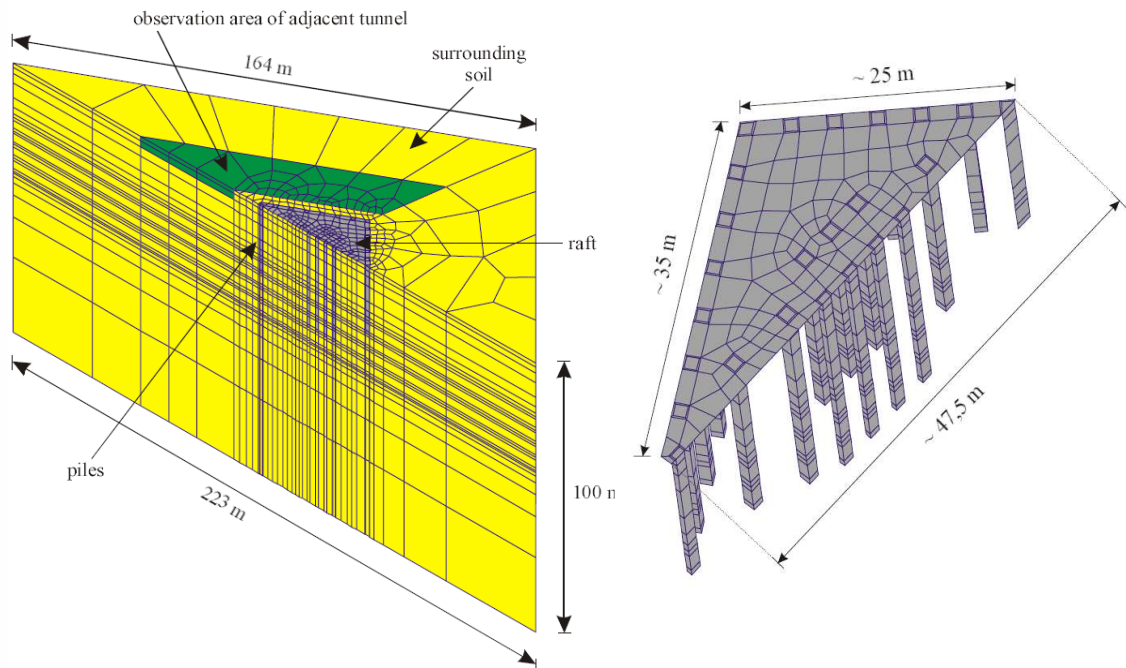
Rys. 3.18. Wpływ płyty na rozkład naprężenia wzdłuż pobocznic pali na przykładzie grupy palowej 3x3 (pal narożny I, pal krawędziowy II, pal centralny III) [72]

Lee [52] na podstawie przestrzennego modelu konstrukcji z podłożem przeprowadził analizę wpływu nadbudowy na zachowanie płyty fundamentowej oraz fundamentu płytowo-palowego. Badania przeprowadzono na modelu osiowo-symetrycznym, złożonym z ośmiowęzłowych elementów skończonych (rys. 3.19), uwzględniając dodatkowo nieliniowy model konstytutywny podłoża.



Rys. 3.19. Trójwymiarowy model płyty na podłożu i palach [52]

Badania teoretyczne nad fundamentami płytowo-palowymi prowadzi także **Katzenbach** z zespołem [40,41], wykorzystując zaawansowane systemy obliczeniowe. Badania prowadzono dla wieżowców we Frankfurcie nad Menem, z jednoczesnym rozbudowanym programem badań terenowych. Analizę współpracy płyt fundamentowych z podłożem i grupą pali przeprowadzono na przestrzennych modelach MES, opracowanych w programie ABAQUS (rys. 3.20).



Rys. 3.20. Przykładowy model MES fundamentu płytowo-palowego [41]

Wyniki obliczeń uzyskano dla sprężystych modeli fundamentów i sprężysto-plastycznego cap modelu podłoża zbudowanego z iłów frankfurckich. Uzyskane wyniki pomiarów terenowych umożliwiły ponadto przeprowadzanie analiz wstecznych w celu aktualizacji parametrów modeli. Umożliwiło to przeprowadzenie szczegółowych analiz i optymalizację posadowień nowobudowanych wieżowców.

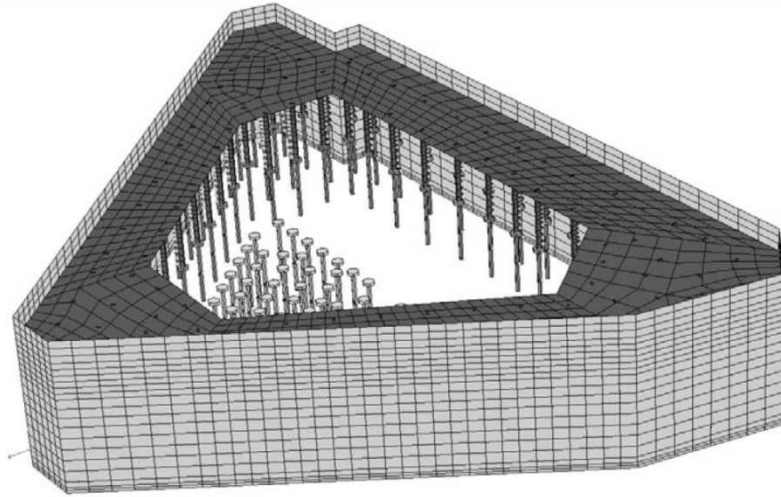
Katzenbach i in. [5] dokonali także porównania metody PDR, szczegółowej metody numerycznej wykorzystując program FLAC-3D (bazujący na metodzie różnic skończonych), z wynikami badań laboratoryjnych. Badania przeprowadzono do uzyskania obciążenia stanowiącego niemal dwukrotną wartość obciążenia granicznego obliczonego równaniami Vesica i Coylea z Castelloa. Na podstawie wyników analizy można wywnioskować, że metoda PDR w zakresie obciążenia roboczego wykazuje dużą i akceptowalną zgodność odpowiednio dla osiadania i rozdziału obciążenia. Wraz

z przekroczeniem obciążenia roboczego traci ona praktyczne zastosowanie, w przeciwieństwie do metody szczegółowej uwzględniającej nieliniową charakterystykę podłoża.

Reul i Randolph [85,86] także prowadzili badania wykorzystujące trójwymiarowe modele fundamentów płytowo-palowych, stanowiące posadowienie wieżowców frankfurckich. Do ich opracowania posłużył program ABAQUS. Model MES został zbudowany z elementów powłokowych modelujących płytę fundamentową oraz ze skończonych elementów bryłowych modelujących podłoże i pale. Nieliniową charakterystykę podłoża opisano wykorzystując sprężysto-plastyczny cap model. Weryfikację i aktualizację parametrów opracowanych modeli przeprowadzono wykorzystując wyniki badań terenowych. Umożliwiło to wykorzystanie tych modeli w dalszych badaniach nad optymalizacją rozwiązań projektowych fundamentów spoczywających na podłożu i palach [86]. Jeden z ważniejszych wniosków informuje, że przy wykorzystaniu jednakowej całkowitej długości pali, mniejszą średnią wartość osiadania uzyskamy dla dłuższych pali niż przy ich większej liczbie.

Topolnicki, Sołtys, Kwiatkowski [99] przedstawili przestrzenną analizę MES posadowienia wieżowca z uwzględnieniem wzajemnych oddziaływań płyty fundamentowej, ścian szczelinowych i wzmocnionego wgłębnym zagęszczeniem podłoża. Analizę posadowienia przeprowadzono programem PLAXIS 3D. **Truty** [100] natomiast wykorzystując program ZSoil przeprowadził trójwymiarową analizę MES posadowienia płyty fundamentowej spoczywającej na podłożu wzmocnionym kolumnami CFA.

Truty i Podleś [102] poddali analizie współpracę złożonego konstrukcyjnie posadowienia budynku z podłożem, bazując na trójwymiarowym modelu MES opracowanym w programie ZSoil. Szczegółowy model numeryczny pozwolił przeprowadzić analizę posadowienia złożonego ze ścian szczelinowych rozpartych stropami, łącznie z płytą fundamentową. Płyta spoczywa na podłożu z wykonanymi palami konstrukcyjnymi i tymczasowymi, stanowiącymi podpory dla częściowego oparcia stropu (rys. 3.21). W badaniach wykorzystano model HS-s uwzględniający silną zmianę sztywności w zakresie małych odkształceń.



Rys. 3.21. Trójwymiarowy model pali i ścian szczelinowych rozpartych stropem [102]

Obecna tendencja analizowania fundamentów płytowo-palowych w trudnych warunkach geotechnicznych jest ukierunkowana na opracowywanie przestrzennych modeli numerycznych, wykorzystujących takie programy jak ABAQUS, PLAXIS 2D/3D, FLAC 2D/3D, ZSOIL oraz Midas GTS. W komercyjnych systemach obliczeniowych badania skupiają się na poszukiwaniu optymalnych modeli konstytutywnych, z uwzględnieniem badań podłoża umożliwiających ich opisanie oraz wykorzystaniu elementów, w tym kontaktowych pal-podłoże, tworzących model. Poza pracami wymienionymi powyżej, badaniami zachowania fundamentów płytowo-palowych w oparciu o komercyjne systemy obliczeniowe zajmują się także m.in. autorzy prac [2,15,21,38,71,75,81,89,103].

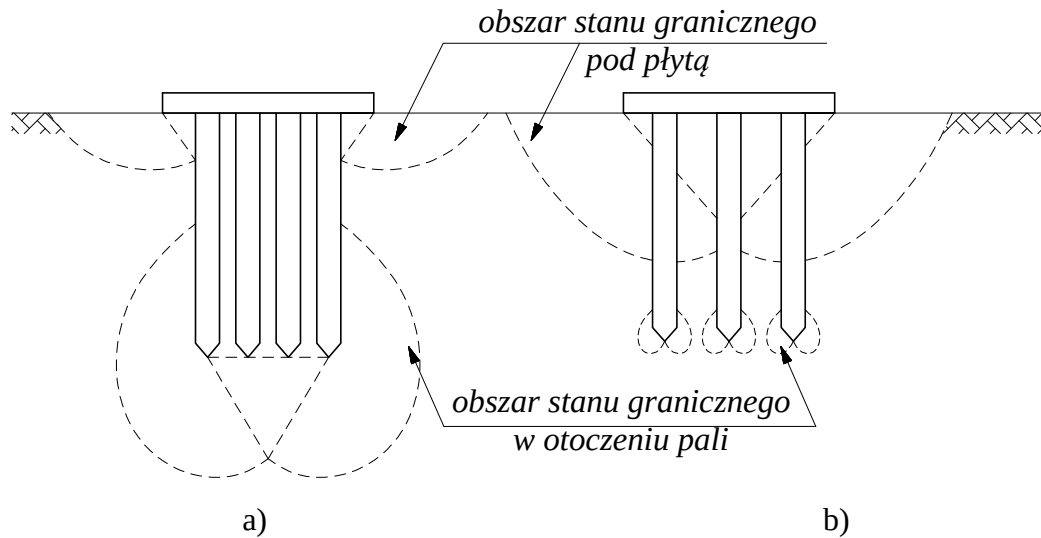
Podsumowując przegląd metod numerycznych można stwierdzić, że metody przybliżone ze względu na stosunkowy brak skomplikowania powinny pełnić podstawową rolę w zakresie analizowania i ewentualnego projektowania posadowienia. Zakres stosowania poszczególnych metod ograniczony jest ich założeniami, co wymaga dodatkowo wiedzy na temat warunków i zakresu ich stosowania. Ponadto wymagają, przed wcześniejszym ich praktycznym wykorzystaniem, przeprowadzenia weryfikacji poprawności przyjętych założeń i rozwiązań na podstawie wyników pomiarów zachowania rzeczywistych obiektów. Natomiast w warunkach uniemożliwiających powszechne ich stosowanie mogą a niekiedy powinny pełnić rolę pomocniczą we wstępnym stadium opracowywania założeń projektowych oraz weryfikacji modeli szczegółowych.

3.3. Badania modelowe i terenowe fundamentów płytowo-palowych

Badania modelowe fundamentów płytowo-palowych

Badania wykonywane w małej skali oraz skali półtechnicznej, pomimo swoich ograniczeń, pełnią istotną rolę poznawczą, pozwalając lepiej zrozumieć mechanizmy zachodzące pod płytą spoczywającą na podłożu i palach. Nie są one w stanie zastąpić badań w skali naturalnej, jednak ich użyteczność w zrozumieniu wpływu wzajemnych oddziaływań układu płyta-pale-podłoże oraz w racjonalnym planowaniu badań terenowych jest niezaprzeczalna. Badania modelowe fundamentów spoczywających na podłożu i palach przede wszystkim skoncentrowane są na pomiarach rozdziału obciążenia pomiędzy płytę i pale z uwzględnieniem ich usytuowania na planie płyty, przy jednoczesnym pomiarze osiadania. Analizie poddawany jest także wpływ udziału płyty na nośność pali bądź wpływ udziału pali na nośność płyty, wyrażonych współczynnikami efektywności. Poszczególne badania różnią się przede wszystkim stanem i rodzajem wykorzystanego ośrodka gruntowego, geometrią elementu badawczego fundamentu tzn. średnicą, długością pali, ich rozstawem, usytuowaniem na planie płyty, kształtem płyty ale także sposobem osadzenia w ośrodku gruntowym. Poniżej opisano wybrane badania modelowe o szerokim zakresie pomiarów i istotnych poznawczo wniosków.

Kishida i Meyerhof [74] stwierdzili, że kontakt płyty z podłożem w istotny sposób wpływa na nośność grupy palowej. Wykazali, że nośność fundamentu płytowo-palowego może być oszacowana na podstawie nośności wolnostojącej grupy palowej i uwzględnieniu wpływu płyty. Wyodrębnili dwa schematy obszarów stanu granicznego pod płytą wynikające z zaistniałego modelu zniszczenia uwarunkowanego rozstawem pali i warunkami gruntowymi (rys. 3.22). W pierwszym, prezentującym przekroczenie nośności bloku gruntowo-palowego, uwzględniono we wzroście nośności grupy pali powierzchnię płyty znajdującą się poza obszarem bloku. W drugim schemacie, prezentującym przekroczenie nośności poszczególnych pali tworzących fundament, całkowita nośność fundamentu składa się z nośności wolnostojącej grupy pali, całej powierzchni płyty oraz jej wpływu na opór podstaw pali.



Rys. 3.22. Schemat obszarów stanu granicznego pod płytą spoczywającą na podłożu i grupie palowej [74]

Garg [19] przeprowadził badania terenowe nad grupą pali wierconych w piasku. Skoncentrował się na wyznaczeniu współczynnika efektywności, wyrażającego stosunek obciążenia przekazywanego przez grupę pali do iloczynu ilości pali w grupie i obciążenia pojedynczego pala, uzyskanych przy jednakowym osiadaniu. Badania przeprowadzono dla grupy pali wolnostojących oraz z uwzględnieniem udziału płyty w przekazywaniu obciążenia. Autor badań wykazał, że udział płyty zwiększa sztywność fundamentu redukując osiadanie w porównaniu z grupą pali wolnostojących. Garg stwierdził ponadto, że współczynnik efektywności rośnie wraz ze wzrostem rozstawu pomiędzy palami dla grupy pali współpracującej z płytą w przekazywaniu obciążenia oraz że maleje wraz ze wzrostem ilości pali w grupie zarówno wolnostojącej jak i współpracującej z płytą.

Autorem pierwszych a zarazem najobszerniejszych badań krajowych nad zagadnieniem płyt spoczywających na podłożu i palach jest **Knabe** [45]. Początkowo prowadząc badania modelowe nad nośnością graniczną ławy fundamentowej posadowionej na krótkich palach w podłożu piaszczystym wyraził ją ogólnym wzorem:

$$Q_T = \xi Q_p + \eta Q_C \quad (3.31)$$

gdzie:

Q_T - nośność graniczna fundamentu płytowo-palowego,

Q_p - nośność graniczna grupy pali,

Q_C - nośność graniczna fundamentu bezpośredniego,

ξ - współczynnik efektywności płyty fundamentowej na nośność pali,

η - współczynnik efektywności pali na nośność płyty.

Na podstawie analizy wyników badań przeprowadzonych na suchym gruziarnistym piasku zaobserwowano, że wpływ płyty na nośność pali jest niewielki. Wpływ pali natomiast na wzrost nośności płyty rośnie wraz z długością pali aż do ich długości równej 1.47 szerokości ławy. Stwierdzono ponadto wzrost współczynnika η wraz ze wzrostem rozstawu poprzecznego między palami oraz jego redukcję wraz ze wzrostem rozstawu podłużnego, co odzwierciedla zmniejszającą się obecność pali pod ławą w strefie wypierania gruntu spod fundamentu. Ostatecznie współczynniki efektywności, przy długości pali większej niż 1.47 szerokości ławy, zostały wyrażone w postaci:

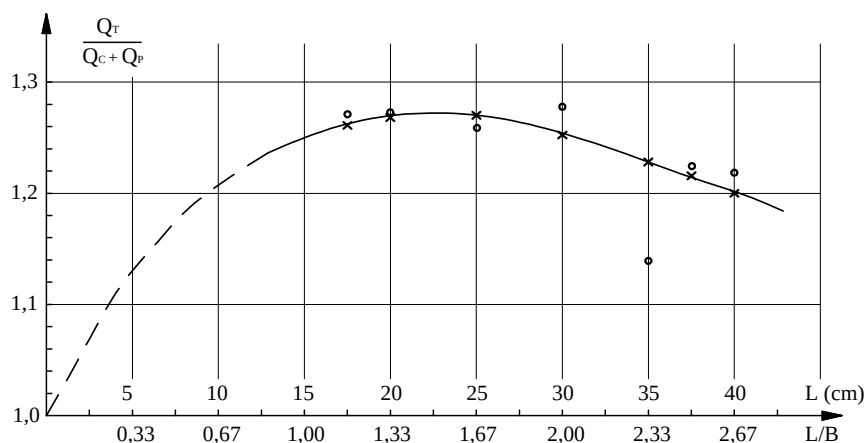
$$\xi = 1.0 \quad (3.32)$$

$$\eta = 0.73 \cdot \left(\frac{t-d}{b} \right)^{-1.2} \left(\frac{s}{b} \right)^{0.5} \left(1 + 1.35 \frac{h}{b} \right) + 1 \quad (3.33)$$

gdzie:

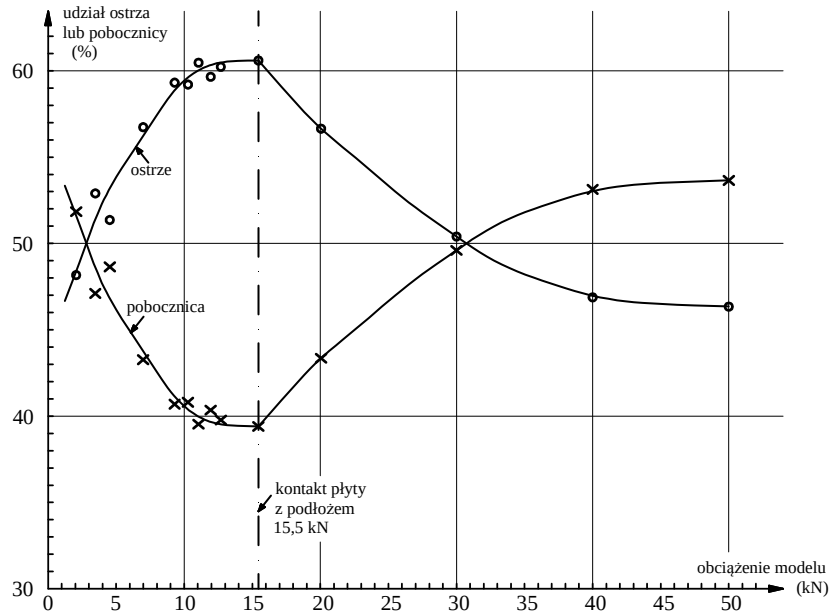
- t - rozstaw pali wzdłuż ławy fundamentowej,
- $2s$ - rozstaw poprzeczny pali,
- d - średnica pali,
- b - szerokość ławy fundamentowej,
- h - głębokość posadowienia ławy fundamentowej.

W późniejszych badaniach modelowych **Knabe** [48] zaobserwował maksymalny wzrost nośności fundamentu płytowo-palowego o 27 % w porównaniu do sumy algebraicznej nośności granicznej płyty i grupy pali o długości stanowiącej 1.3 do 1.7 szerokości płyty (rys. 3.23).



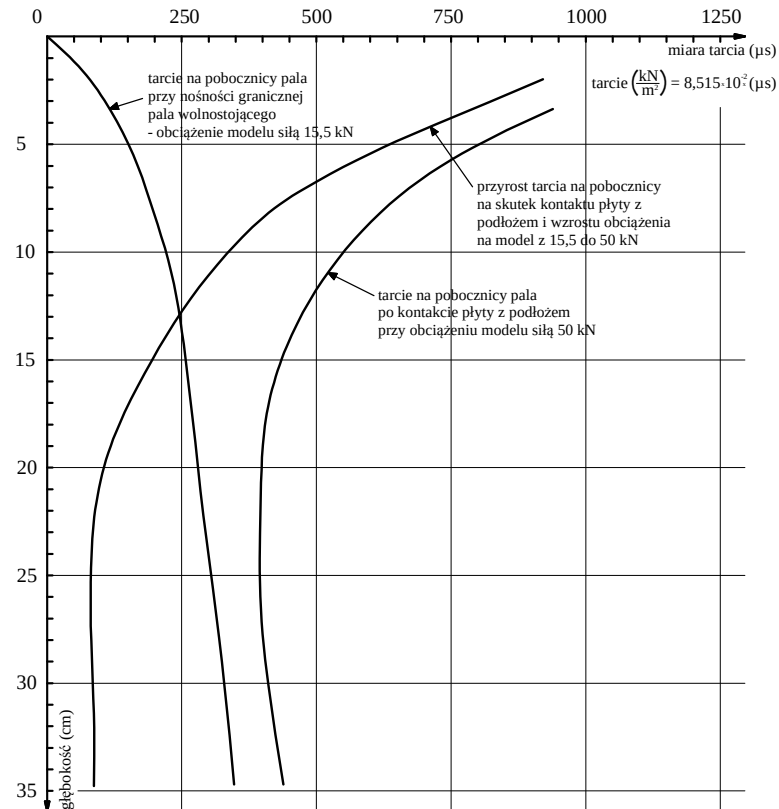
Rys. 3.23. Współczynnik efektywności fundamentu płytowo-palowego [48]

W badaniach tych element doświadczalny był wibrowany w średnio zagęszczony piasek, a nie obsypywany jak w badaniach wcześniejszych, co było najprawdopodobniej przyczyną niewykazania wpływu pali na nośność graniczną płyty. Wyraźnie natomiast zaznaczył się wpływ płyty na wzrost nośności pali oraz odmienny charakter mobilizacji oporu pobocznic i podstawy w porównaniu z grupą pali bez kontaktu płyty z podłożem (rys. 3.24).



Rys. 3.24. Mobilizacja oporu pobocznic i podstawy pała przed i po kontakcie płyty z podłożem [48]

Jest to efekt odmiennego stanu naprężenia wzdłuż pobocznic i pod podstawą pali wywołanych naprężeniem generowanym przez udział płyty, przyczyniając się przede wszystkim do znacznego wzrostu nośności pobocznic pała bezpośrednio pod płytą (rys. 3.25).



Rys. 3.25. Rozkład tarcia na pobocznicy po kontakcie płyty z podłożem [48]

Akinmusuru [1] jest autorem badań modelowych nad nośnością graniczną płyty spoczywającej na suchym niespoistym podłożu i palach. Zaobserwował on, że nośność graniczna analizowanego posadowienia na skutek wzajemnego oddziaływania płyty, pali i podłoża nie jest algebraiczną sumą nośności płyty i grupy pali wolnostojących. Wzajemne oddziaływanie przyczynia się do jednoczesnej zmiany nośności granicznej płyty i grupy pali, co zostało przedstawione wzorem:

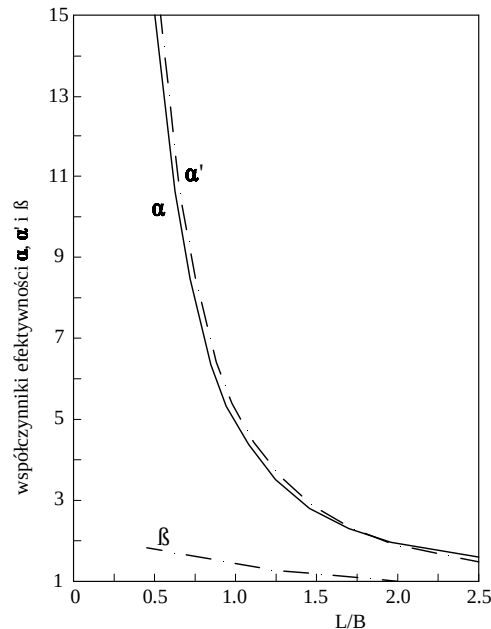
$$Q_t = \alpha Q_p + \beta Q_c \quad (3.34)$$

gdzie:

- Q_t - nośność graniczna fundamentu płytowo-palowego,
- Q_p - nośność graniczna grupy pali wolnostojących (bez udziału płyty),
- Q_c - nośność graniczna fundamentu bezpośredniego (bez pali),
- α - współczynnik efektywności płyty fundamentowej na nośność pali,
- β - współczynnik efektywności pali na nośność płyty.

Na podstawie przeprowadzonych badań modelowych uzyskane wartości współczynników α , β przedstawiono graficznie na rysunku 3.26. Wynika z niego, że udział płyty w przekazywaniu obciążenia przyczynia się do wzrostu nośności płyty

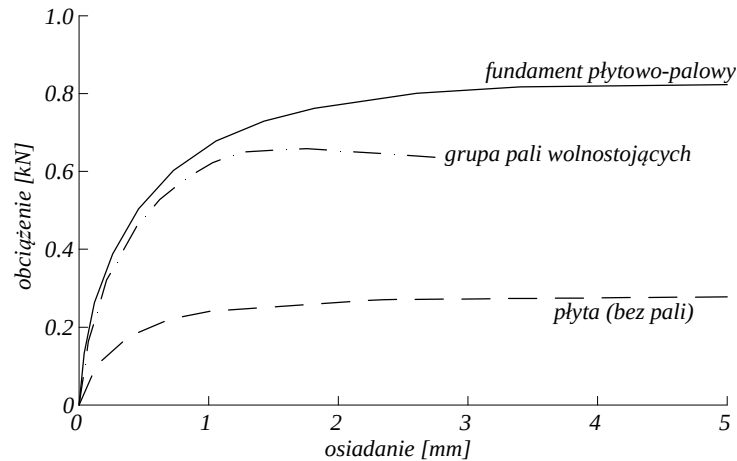
i pali, ze szczególnym uwzględnieniem znacznego wpływu na nośność pali krótkich. Odzwierciedla to istotną zmianę stanu naprężenia w podłożu bezpośrednio pod płytą, wywołanego naprężeniami kontaktowymi płyta-podłoże oraz redukcją tego wpływ wraz z głębokością. Autor badań stwierdził, że zmiany w nośności płyty i pali zależą od wielkości płyty oraz długości pali.



Rys. 3.26. Współczynniki efektywności α i β płyty spoczywającej na podłożu i palach [1]

Cooke [13] wykonał badania laboratoryjne nad płytą spoczywającą na podłożu, grupą pali wolnostojących oraz płytą spoczywającą na podłożu i palach w zwartym ośrodku spoistym. Potwierdził wcześniejsze badania Whitakera [105] stwierdzające, że blokowe zniszczenie grupy pali w gruncie spoistym występuje dla rozstawu pomiędzy palami mniejszego od pewnej wartości krytycznej oraz że dla grupy palowej współpracującej z płytą wartość krytycznego rozstawu pali, warunkującego wystąpienie blokowego zniszczenia, jest większa niż dla wolnostojącej grupy palowej.

Autor badań zaobserwował, że dla elementu doświadczalnego fundamentu płytowo-palowego wymagane jest większe obciążenie w porównaniu z grupą pali wolnostojących w celu uzyskania jednakowych osiadań (rys. 3.27). Różnica w przekazywanym obciążeniu dla obu elementów doświadczalnych przy jednakowym osiadaniu jest nieduża pod obciążeniem roboczym i znacznie rośnie dla wartości granicznej obciążenia. Powyższe zjawisko jest wynikiem przede wszystkim mobilizacji oporów wokół pali w pierwszym etapie obciążenia, natomiast wraz ze wzrostem obciążenia, przekraczającego mobilizację oporów wokół pali, uwidocznienia się udział płyty.



Rys. 3.27. Krzywe obciążenie-osiadanie dla płyty fundamentowej, grupy 49 pali wolnostojących oraz fundamentu płytowo-palowego [13]

Cooke na podstawie przeprowadzonych badań modelowych zaobserwował, że redukcja osiadania elementu doświadczalnego występuje wraz ze wzrostem ilości pali pod płytą do pewnej wartości granicznej, uzyskanej przy rozstawie pali wynoszącym ich cztery średnice. Mniejszy rozstaw pali nie wpływa istotnie na redukcję osiadania. Osiadanie fundamentów płytowo-palowych zależy także od stosunku długości pali do szerokości spoczywającej na nich płyty. Autor badań zaobserwował ponadto różnice w przekazywanym obciążeniu przez pale w zależności od ich usytuowania na planie płyty. Pale narożne i krawędziowe przenoszą odpowiednio około dwukrotnie i półtorakrotnie większe obciążenie od pali wewnętrznych.

Phung [74] analizował zachowanie fundamentu płytowo-palowego pod obciążeniem w luźnym, średnio zagęszczonym i zagęszczonym piasku. Na podstawie przeprowadzonych badań w skali półtechnicznej wyraził nośność płyty spoczywającej na podłożu i palach w postaci:

$$P_{ft} = n (\eta_{1s} \eta_{4s} P_{ss} + \eta_{1b} \eta_{4b} P_{sb}) + \eta_6 P_c \quad (3.35)$$

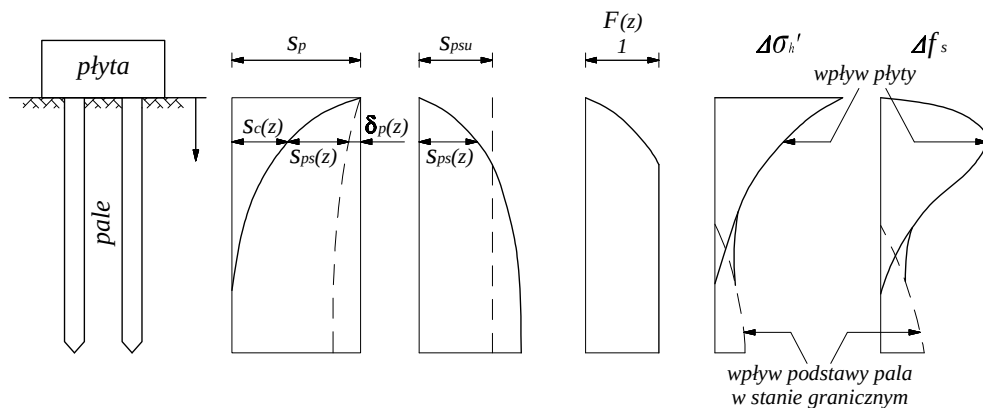
gdzie:

- n - ilość pali w grupie,
- η_{1s}, η_{1b} - współczynnik oddziaływania pomiędzy palami na nośność ich pobocznicy i podstaw,
- $\eta_{4s}, \eta_{4b}, \eta_6$ - współczynnik oddziaływania pomiędzy płytą i palami na nośność pobocznicy i podstaw pali oraz nośności płyty,
- P_{ss}, P_{sb} - nośność pobocznicy i podstawy pala pojedynczego,
- P_c - nośność bezpośrednio posadowionej płyty fundamentowej.

Autor badań stwierdził, że współczynniki η_{1s} , η_{1b} zależą od technologii wykonania pali. Współczynnik η_{1s} wynosi 1.0 dla średnio zagęszczonych i zagęszczonych piasków oraz jest większy od jedności dla piasków luźnych. Współczynnik η_{1b} jest natomiast większy od jedności, nawet dla grup palowych cechujących się dużym rozstawem pomiędzy palami. Współczynnik η_{4b} dla pali krótkich jest prawdopodobnie większy od jedności, jednak może być przyjmowany jako 1 dla pali o długości większej od 1.5 do 2.0 szerokości płyty. Phung wnioskuje, że najważniejszym współczynnikiem jest η_{4s} , który wyraża wzrost nośności pobocznicy pala na skutek naprężeń kontaktowych płyta-podłoże. Współczynnik ten zależy od wielkości płyty oraz cechuje się liniowym wzrostem wraz z osiadaniem. Z dokładnością dostateczną dla celów praktycznych można przyjąć, że udział pali nie wpływa na nośność płyty w piaskach luźnych ($\eta_6=1.0$) oraz że zmniejsza jej wartość w średnio zagęszczonych i zagęszczonych piaskach ($\eta_6=0.9$).

Phung analizując rozdział obciążenia pomiędzy płytą i pale zaobserwował, że w istotny sposób zależy on od osiadania. W początkowej fazie pale przejmują większą część obciążenia. W momencie osiągnięcia osiadanie powodującego pełną mobilizację oporów pobocznic i podstaw pali, płyta zaczyna przenosić znaczną część dodatkowego obciążenia na podłoże do pewnej wartości stabilizującej rozdział obciążenia. Od tej wartości osiadania rozdział obciążenia pomiędzy płytą i pale jest w przybliżeniu stały.

Phung zilustrował ponadto mechanizmy zachodzące pod płytą wywołującą zmianę stanu naprężenia, a zatem i oporu wzdłuż pobocznicy pala (rys. 3.28). Różnica w formowaniu się oporu pobocznicy pala, w porównaniu z grupą pali wolnostojących występuje w jej górnej części. Spowodowane jest to wzrostem poziomej składowej naprężenia w gruncie bezpośrednio pod płytą na skutek przekazywanego przez nią obciążenia oraz wywołanego nim osiadania.



Rys. 3.28. Wzrost oporu pobocznicy pala wywołanego udziałem płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże [74]

Opór poboczny wyrażono wzorem:

$$f_s(z) = \sigma_h'(z) \cdot F(z) \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3.36)$$

gdzie:

$\sigma_h'(z)$ - składowa pozioma naprężenia efektywnego w gruncie na głębokości z ,

δ - kąt tarcia gruntu o poboczną palę,

$F(z)$ - poziom mobilizacji poboczny pala, wyrażony warunkowo:

- $F(z) = s_{ps}(z) / s_{psu}$ dla $s_{ps} < s_{psu}$
- $F(z) = 1$ dla $s_{ps} \geq s_{psu}$

s_{psu} - przemieszczenie pala względem gruntu w pełni mobilizujące opór poboczny pala,

$s_{ps}(z)$ - przemieszczenie pala względem gruntu na głębokości z , wyrażone w postaci:

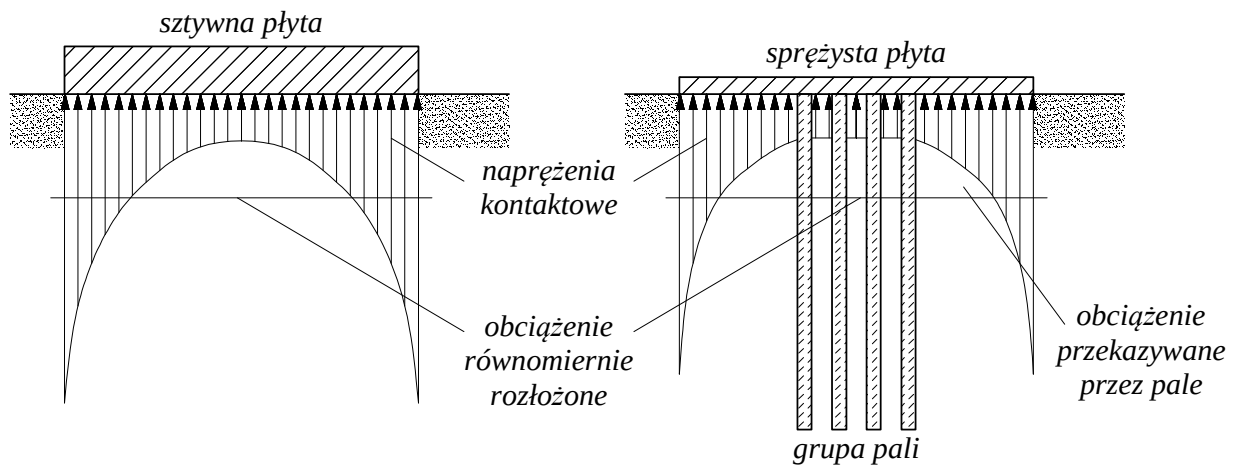
$$s_{ps}(z) = s_p - s_c(z) - \delta_p(z) \quad (3.37)$$

s_p - osiadanie głowicy pala,

$s_c(z)$ - osiadanie gruntu wywołane naprężeniem kontaktowym płyta-podłoże na głębokości z ,

$\delta_p(z)$ - ściśliwość pala na głębokości z .

Wpływ usytuowania małej grupy pali w centralnej części płyty na zachowanie elementu doświadczalnego fundamentu płytowo-palowego w gruncie spoistym w wirówce przeprowadzili **Horikoshi i Randolph** [36,37]. Badania skoncentrowano na wpływie pali na redukcję osiadania, nierównomiernym osiadaniu oraz rozdziale obciążenia pomiędzy płytę i pale (rys. 3.29).



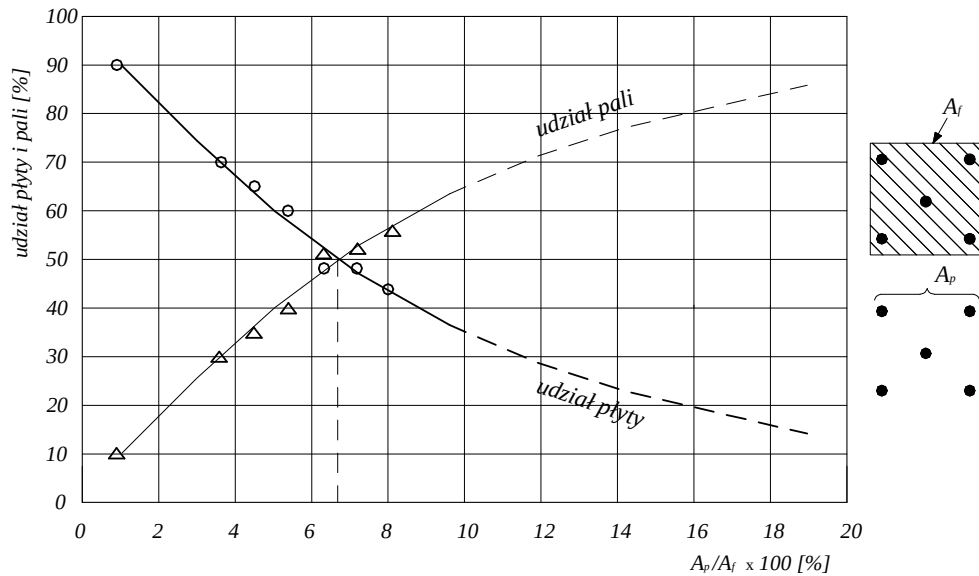
Rys. 3.29. Schemat wpływu usytuowania pali na redukcję nierównomiernego osiadania [36]

Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że nawet mała grupa pali przekazująca nieznaczną część obciążenia na podłoże, w sposób znaczący może zredukować nierównomierne osiadania płyty. Zaobserwowano, że grupa dziewięciu pali (stanowiąca zaledwie 13 % wolnostojącej grupy palowej) redukuje nierównomierne osiadanie o 30 % w porównaniu z płytą posadowioną bezpośrednio na gruncie, nie wpływając istotnie na średnie osiadanie fundamentu. Autorzy badań sformułowali ponadto wytyczne pozwalające optymalnie projektować pale służące redukcji nierównomiernego osiadania płyty równomiernie obciążonej na powierzchni, w postaci:

- * pale powinny być usytuowane w centralnej części płyty, stanowiącej 16 do 25 % jej powierzchni,
- * sztywności grupy pali i bezpośrednio posadowionej płyty (bez pali) powinny być takie same,
- * nośność graniczna pala powinna stanowić 40 do 70 % obciążenia projektowego, z uwzględnieniem współczynnika grupy pali i współczynnika Poissona gruntu.

Słabek [90] przeprowadził badania modelowe płyty na podłożu i palach w luźnym równoziarnistym piasku. Element doświadczalny osadzano w niespoistym ośrodku gruntowym podczas jego upłynnienia, a po odcięciu dopływu wody w wyniku sedimentacji pozostawiano grunt w stanie luźnym. Taka procedura umożliwiła przeprowadzenie wszystkich serii pomiarów dla jednakowego ośrodka gruntowego o nienaruszonej strukturze.

Autor badań na podstawie analizy uzyskanych pomiarów przedstawił procentowy wpływ udziału pali w powierzchni płyty na rozdział obciążenia przekazywanego przez płytę i pale (rys. 3.30). Z przedstawionego schematu można wnioskować, że wraz z procentowym wzrostem udziału pali w powierzchni płyty zwiększa się ich udział w przekazywaniu obciążenia na podłoże, redukując zarazem udział płyty. Przedstawia on ponadto tendencję zmniejszającego się udziału pali wraz z procentowym wzrostem ich powierzchni, tendencją odgrywającą istotną rolę w ekonomicznym projektowaniu badanego posadowienia. Czynnikiem istotnie wpływającym na udział pali w przekazywaniu obciążenia poza ich ilością jest także usytuowanie. Zaobserwowano większy procentowy udział pali dla elementów badawczych z palem w centralnej strefie pod płytą. Można to tłumaczyć najmniejszą wartością naprężenia kontaktowego w centralnej strefie pod płytą spoczywającą na podłożu oraz jego ewentualnym mniejszym wpływem na mobilizację oporów pobocznic i podstaw pali.

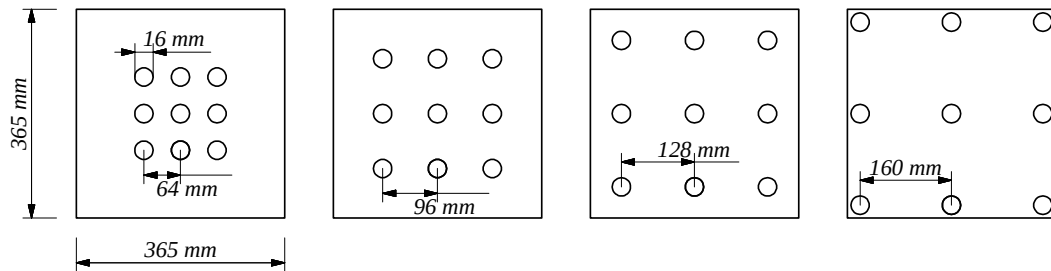


Rys. 3.30. Rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale [90]

Badania modelowe przeprowadzono także dla płyty bez pali, pala pojedynczego oraz grupy palowej. Wyniki tych pomiarów posłużyły określeniu zmian obciążenia przekazywanego przez płytę bądź pale fundamentu płytowo-palowego w porównaniu z obciążeniem przekazywanym przez samą płytę bądź grupę pali wolnostojących dla danego osiadania. Autor badań zaobserwował, że obciążenie przekazywane jedynie przez płyty na palach jest inne niż płyty bezpośrednio spoczywającej na podłożu. Zależy ono od usytuowania pali na planie płyty (co zgodnie z badaniami Knabe może wpływać na ograniczenie wypierania gruntu spod płyty) oraz od ilości pali, których wzrost z kolei ogranicza jej zdolność do przenoszenia obciążenia. Wzrost nośności pali w skutek udziału płyty w przekazywaniu obciążenia jest natomiast wyraźny w porównaniu z grupą pali wolnostojących i rośnie wraz ze wzrostem rozstawu między palami. Przyczyn powyższego zjawiska szukać należy w większym udziale płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże, a zatem i jej większemu oddziaływaniu na pale.

W omawianych badaniach potwierdzono, że nośność fundamentu płytowo-palowego jest większa od sumy algebraicznej nośności płyty i grupy palowej, uzyskując maksymalny wzrost nośności do 40 % dla elementu badawczego z czterema palami.

Lee i Chung [53] przeprowadzili szereg badań laboratoryjnych mających na celu analizę wpływu oddziaływania płyty i wbijanych pali na siebie w zależności od ich usytuowania i rozstawu (rys. 3.31). Prowadzono analizy porównawcze z płytą bezpośrednio posadowioną na podłożu i grupą pali wolnostojących.



Rys. 3.31. Elementy badawcze fundamentu płytowo-palowego [53]

Autorzy stwierdzili, że udział płyty wpływa na obciążenie przekazywane przez poszczególne pale, w porównaniu z grupą pali wolnostojących, w zależności od ich usytuowania i rozstawu. Pal centralny wykazuje największą efektywność dla małego rozstawu pali wynoszącego 2-3 średnice pala oraz cechuje się wyraźną redukcją efektywności (<1) wraz ze wzrostem rozstawu pali równemu 4-5 średnic pala. Współczynnik efektywności pali krawędziowych i narożnych dla poszczególnych elementów badawczych nie wykazuje wyraźnych różnic. Zaobserwowano ponadto, że obciążenie przekazywane przez płytę współpracującą z grupą pali i bezpośrednio posadowioną na podłożu jest jednakowe. Można to tłumaczyć oddziaływaniem pali na płytę w postaci redukcji jej odporu w otoczeniu pali oraz z niwelującym tą redukcję wzrostem zagęszczenia podłoża wynikającego z technologii wykonania pali (pale wbijane).

Balakumar [4] zrealizował obszerny program badań modelowych nad fundamentami płytowo-palowymi osadzonymi w luźnych, średnio zagęszczonych i zagęszczonych piaskach dla płyty w kształcie koła, kwadratu i prostokąta. Stwierdził, że sztywność badanego fundamentu rośnie wraz ze wzrostem średnicy, długości pali oraz powierzchni grupy pali. Długość pali w wyraźny sposób wpływa na zmianę sztywności fundamentu do ich długości stanowiącej 80 % wymiaru poziomego płyty (szerokość/średnica). Ilość pali natomiast w sposób istotny wpływa na sztywność fundamentu do pewnej wartości granicznej wyrażonej stosunkiem powierzchni pali i płyty równym 6 %. Na podstawie wykonanych badań autor stwierdził, że optymalny udział pali, pod względem redukcji osiadania i rozdziału obciążenia, wynosi 5-6 % powierzchni płyty.

Podczas analizy rozdziału obciążenia pomiędzy płytę i pale wraz z osiadaniem zaobserwowano, że wydzielają się trzy jego fazy. Pierwsza charakteryzuje się większym udziałem pali w przekazywaniu obciążenia i występuje do osiadanie stanowiącego

około 1 % poziomego wymiary płyty. W drugiej fazie mieszczącej się w zakresie osiadania stanowiącego około 1 % do 3 % poziomego wymiaru płyty, obserwujemy zmniejszenie udziału pali na rzecz płyty. W trzeciej ostatniej fazie można przyjąć, że rozdział obciążenia jest stały.

Badania modelowe w wirówce z analizą wpływu technologii wykonania pali przeprowadził **Giretti** [21]. Wykonano je dla sztywnej okrągłej płyty spoczywającej na drobnym piasku w stanie luźnym i dwóch typach pali, tj. przemieszczeniowych i nieprzemieszczeniowych. Na podstawie badań płyty na palach nieprzemieszczeniowych zaobserwowano, że oddziaływanie pomiędzy palami wpływa na wolniejszą mobilizację oporu pobocznic pali, w porównaniu z wolnostojącym palem pojedynczym. Powyższe zjawisko uwypukla zwiększenie liczby pali bądź zmniejszenie rozstawu pomiędzy stałą liczbą pali pod płytą. W elementach badawczych fundamentów wykonanych z pali przemieszczeniowych, przyczyniających się do wzrostu zagęszczenia gruntu wraz ze wzrostem radialnych naprężeń wokół pali, mobilizacja oporów wzdłuż pobocznic jest zbliżona bądź większa w porównaniu z palem pojedynczym. Zaobserwowano ponadto, że sztywność fundamentu płytowo-palowego zależy od sztywności grupy pali, rośnie wraz ze wzrostem sztywności grupy pali oraz maleje wraz ze zmniejszeniem rozstawu między palami dla stałej ich ilości.

Giretti dokonał analizy wpływu oddziaływania płyty i pali na zmianę ich nośności, porównując z pojedynczym palem i płytą posadowioną bezpośrednio na gruncie. Wywnioskował, że współczynnik efektywności podstawy pala jest większy od jedności w całym zakresie osiadania ze względu na oddziaływanie pomiędzy palami oraz dla pali przemieszczeniowych ze względu na zagęszczenie podłoża w wyniku ich wbijania. Współczynnik efektywności pobocznicy pala zależy natomiast od technologii wykonania i tak dla pali przemieszczeniowych jest większy od jedności w całym zakresie osiadania, natomiast dla pali nieprzemieszczeniowych przy niedużych osiadaniach jest mniejszy od jedności i rośnie wraz z osiadaniem, uzyskując w wyniku zwiększania wpływu oddziaływania płyty wartości większe od jedności. Dla małych grup palowych współczynnik efektywności płyty jest równy jeden i maleje wraz ze wzrostem liczby pali pod płytą i zmniejszeniem rozstawu między nimi.

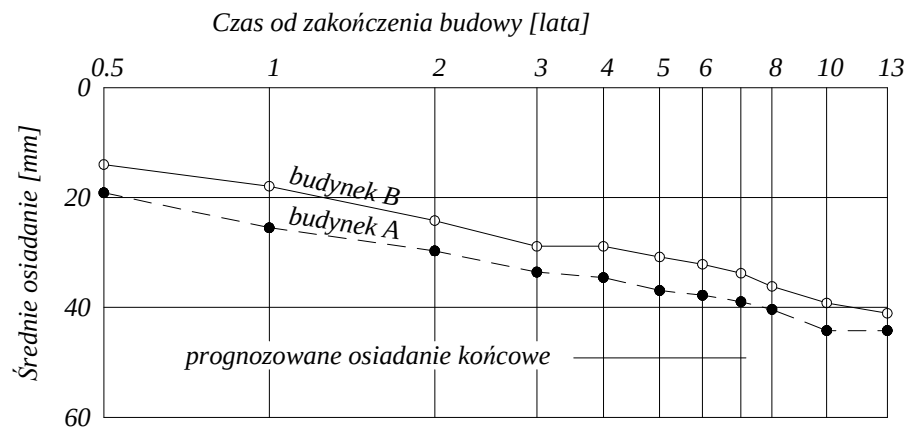
Badania terenowe fundamentów płytowo-palowych

Badania terenowe polegające na oprzyrządowaniu rzeczywistych fundamentów nowo wykonywanych konstrukcji z monitoringiem uzyskiwanych wyników pomiarów, podczas wznoszenia budowli i po jej zakończeniu, są najcenniejsze poznawczo. Badania tego typu pozwalają zrozumieć mechanizmy zachodzące pod płytą spoczywającą na podłożu i palach w warunkach docelowej ich pracy, tzn. wolnej od efektu skali i antropogenicznego ośrodka gruntowego towarzyszącego badaniom modelowym. Badania terenowe powszechnie sprowadzają się do analizy pracy pojedynczego pala na podstawie próbnego obciążenia statycznego. Badania rekomendowanego przez normę Eurokod 7 jako jedna z metod projektowania, niewątpliwie dostarczającego wiarygodnych danych na temat charakterystyki pracy pojedynczego pala w gruncie w zadanych warunkach gruntowych. Uzyskana podczas tego badania relacja obciążenie-osiadanie głowicy pala nie odpowiada jednak jego charakterystyce podczas pracy w grupie palowej, niezależnie od uwzględnienia współpracy płyty w przekazywaniu obciążenia. Powyższe zjawisko związane jest z nachodzeniem się stref oddziaływań pali i ewentualnie płyty. Zależy ono m.in. od: warunków gruntowych, przekazywanego obciążenia, technologii wykonania pali, ich ilości, rozstawu, usytuowania w grupie oraz sztywności płyty. Badania fundamentów w skali naturalnej należą do rzadkości i w przeważającej większości sprowadzają się do geodezyjnego monitoringu osiadania. Dlatego też poniżej zostaną przedstawione wybrane przykłady, które ze względu na swój zakres w istotny sposób wpisały się w obecny stan wiedzy o pracy fundamentów palowych i płytowo-palowych.

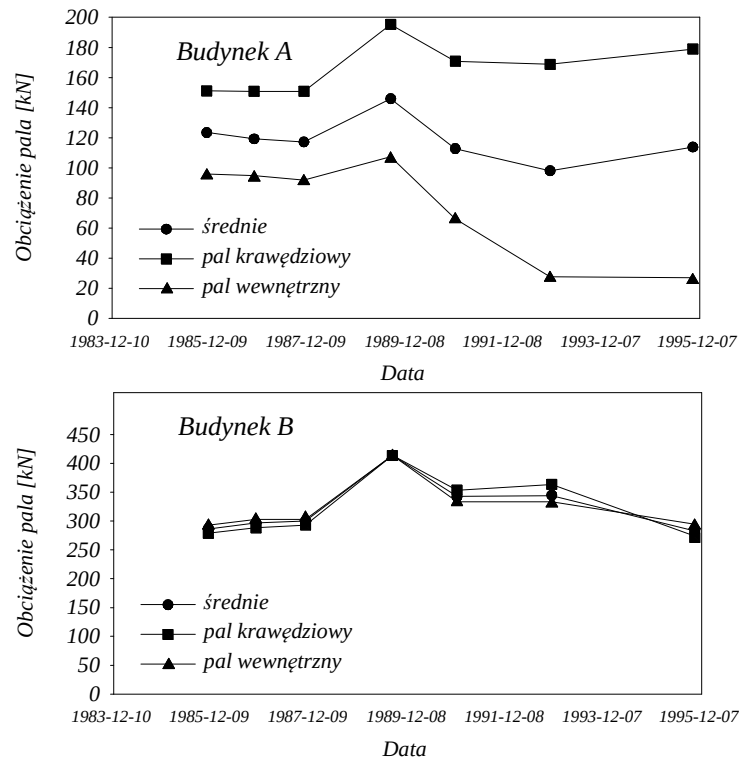
Od początku lat osiemdziesiątych XX wieku **Hansbo i Jendeby** [32,33] przeprowadzili szereg badań terenowych nad uwzględnieniem udziału płyty w przekazywaniu obciążenia z grupą pali zawieszonych w plastycznych gruntach spoistych. Założenie projektowe polegało na wyznaczeniu maksymalnego obciążenia przekazywanego przez płytę bez pali Q_1 , o wartości nie przekraczającej naprężenia prekonsolidującego grunt. Przyjęto, że w sytuacji projektowania konstrukcji o obciążeniu całkowitym Q większym od Q_1 , uzyskana różnica obciążenia zostanie przekazana przez "pale pełzające", tzn. pale rozpoczynające stan pełzania pod założonym obciążeniem stanowiącym 60-70 % wytrzymałości na ścinanie gruntu bez odpływu.

Hansbo i Jendeby zestawili wyniki pomiarów uzyskanych dla dwóch budynków,

usytuowanych w jednakowych warunkach gruntowych. Posadowienie pierwszego budynku (A) zaprojektowane i wykonane zostało jako fundament palowy w całości przekazujący obciążenie na podłoże. W posadowieniu drugiego budynku (B) uwzględniono współpracę płyty i pali w przekazywaniu obciążenia. Budynek A, przy całkowitym obciążeniu wynoszącym 65 kN/m^2 dla wymiarów fundamentu $50 \times 14 \text{ m}$, posadowiono na 211 palach drewnianych o długości 18 m połączonych od góry 10 metrowymi palami żelbetowymi o przekroju $275 \times 275 \text{ mm}$. Budynek B natomiast, przy nieco mniejszym całkowitym obciążeniu równym 60 kN/m^2 dla wymiarów fundamentu $75 \times 12 \text{ m}$, posadowiono na 104 palach drewnianych o długości 18 m połączonych od góry 8 metrowymi palami żelbetowymi o średnicy wynoszącej 300 mm. Rysunek 3.32 przedstawiający średnie pomierzone osiadanie obu budynków nie prezentuje wyraźnych różnic w ich wielkościach. W prowadzonych badaniach dokonano także pomiaru sił w głowicach pali. Pozwoliło to poddać analizie wpływ czasu oraz rodzaju posadowienia na wartość obciążenia przekazywaną przez poszczególne pale w zależności od ich usytuowania (rys. 3.33).



Rys. 3.32. Wpływ czasu i typu posadowienia na osiadanie budynków [33]



Rys. 3.33. Wpływ czasu i typu posadowienia na wartość obciążenia przekazywanego przez pale [33]

Dla budynku A obciążenie pali zależy od ich usytuowania, charakteryzując się przekazywaniem większego obciążenia przez pale krawędziowe. Warto zwrócić uwagę, że posadowienie budynku A projektowano jako fundament palowy o współczynniku bezpieczeństwa równym 3, przy średnim obciążeniu pali wynoszącym 210 kN. Badania terenowe pozwoliły ustalić, że w zadanych warunkach gruntowych poszczególne pale przenoszą znacznie mniejsze średnie obciążenie równe 120 kN. Budynek B uwzględniający współpracę płyty z grupą pali charakteryzuje się równomiernym rozkładem obciążenia poszczególnych pali oraz ze względu na założenia projektowe większym ich obciążeniem (średnio 320 kN). Autorzy badań stwierdzili, że w zadanych warunkach gruntowych, uwzględnienie udziału płyty w przekazywaniu obciążenia pozwala zredukować ilość pali o około dwie trzecie.

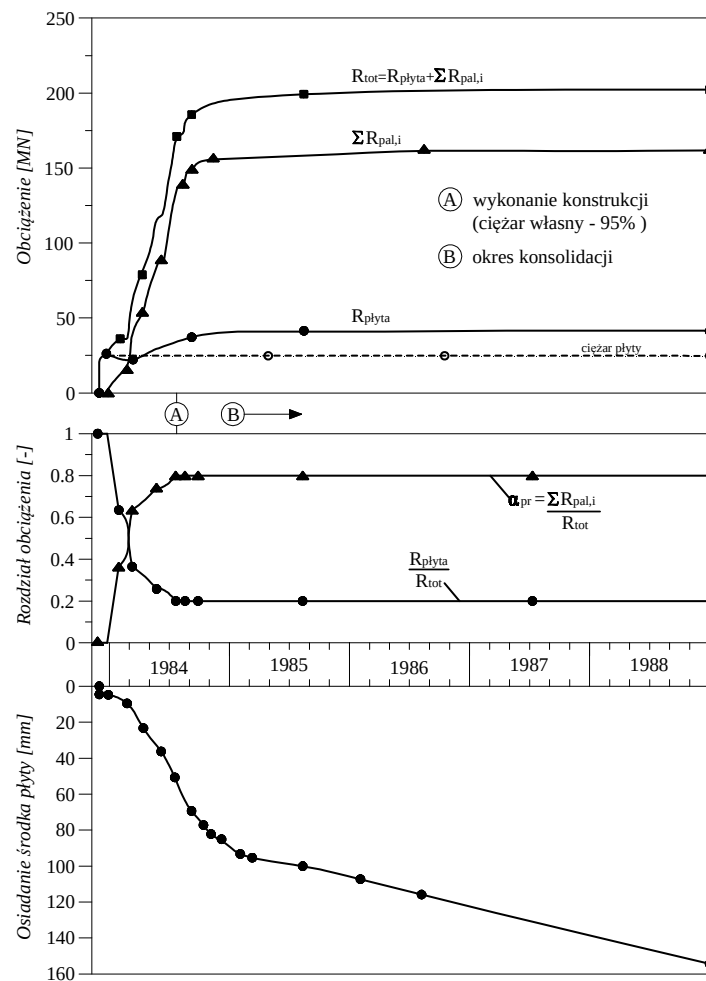
Na szczególną uwagę zasługują badania posadowień nowobudowanych wieżowców przeprowadzone we Frankfurcie nad Menem autorstwa m.in. **Sommerera, Franke i Katzenbacha**. Podczas ich realizacji wykorzystano bogatą gamę oprzyrządowania mającego na celu przybliżenie współpracy fundamentu z podłożem. Poza monitoringiem osiadania fundamentów powszechnie wykorzystywano: czujniki nacisku pod płytą, czujniki ciśnienia porowego, ekstensometry oraz inklinometry.

Analiza geotechnicznych warunków posadowienia 30-kondygnacyjnego budynku **Messe-Torhaus** (rys. 3.34) na łąkach frankfurckich przy uwzględnieniu dużej smukłości budynku oraz sąsiedztwa mostu kolejowego wymusiły wykorzystanie pali w celu ograniczenia osiadania, minimalizując niekorzystne oddziaływanie wieżowca na otoczenie [31,34]. Budynek posadowiono na dwóch niezależnych płytach fundamentowych o wymiarach 17.5x24.5 m i grubości 2.5 m. Płyty przekazujące obciążenie równe 200 MN każda, spoczywają na podłożu i 42 palach wielkośrednicowych o średnicy 0.9 m i długości 20 m.

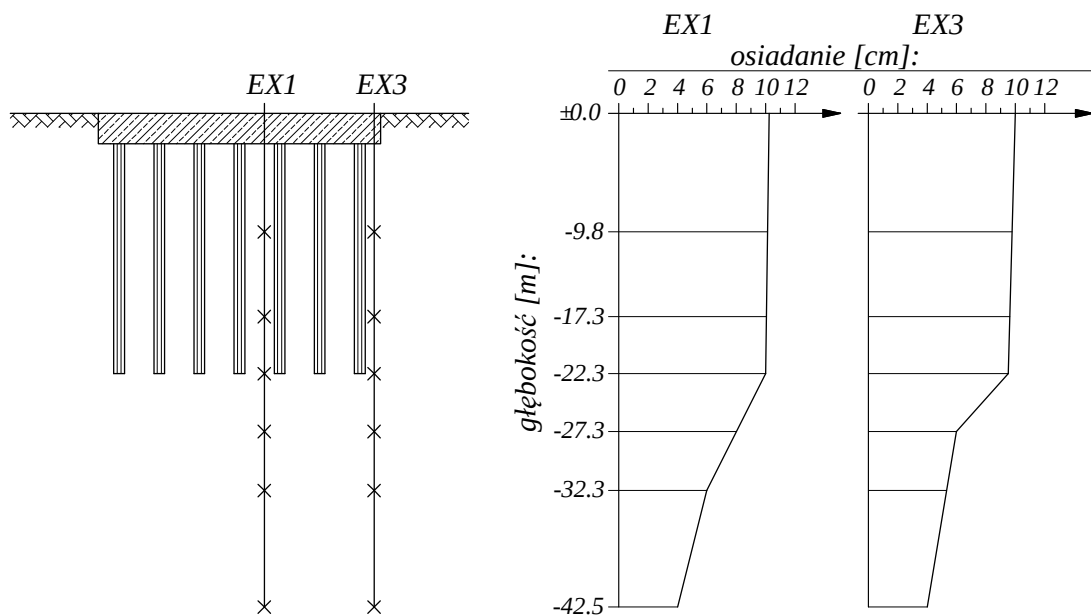
Była to pierwsza realizacja fundamentu płytowo-palowego w Niemczech, dlatego nie dziwi fakt wyraźnego asekuracyjnego podejścia na etapie założeń, projektu i realizacji. Obserwujemy to na rysunku 3.35, przedstawiającym niewiele większy niż ciężar własny udział płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Uzyskanie równomiernego przemieszczania podłoża pod płytą na długości pali (rys. 3.36), wynika z wzajemnej interakcji płyty, pali i podłoża oraz ze względu na nieduży rozstaw pomiędzy palami może świadczyć o pracy fundamentu jako bloku gruntowo-palowego.



Rys. 3.34. Budynek Messe-Torhaus, Frankfurt

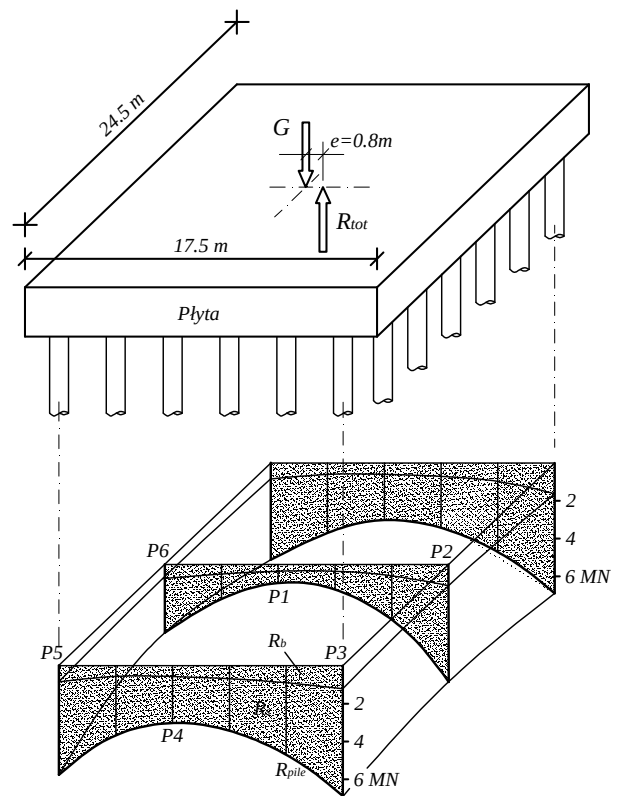


Rys. 3.35. Wpływ czasu na rozdział obciążenia i osiadanie [34]

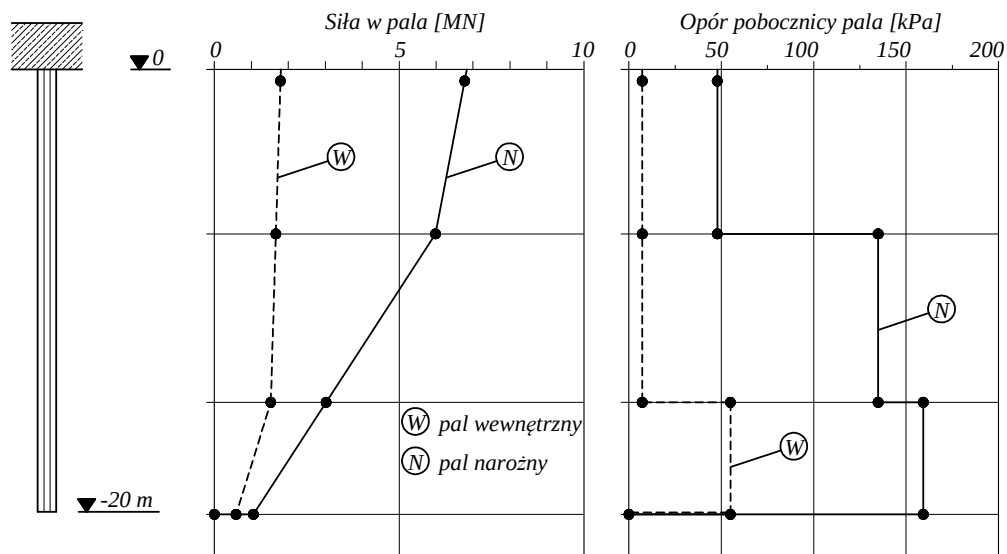


Rys. 3.36. Wpływ głębokości i usytuowania profilu pomiarowego na przemieszczanie podłoża pod płytą [34]

Na rysunku 3.37 przedstawiono obciążenie poszczególnych pali pracujących w grupie. Zaobserwowano największe obciążenie pali narożnych i krawędziowych z ich redukcją w kierunku środka fundamentu. Nierównomierny rozkład obciążenia świadczy o podatności ośrodka gruntowego na skutek panującego tam stanu naprężenia oraz sztywności płyty wyrównującej osiadanie pali tworzących grupę. W związku z powyższym uzyskany pomiar dystrybucji siły w trzonie pala wewnętrznego i narożnego jest zgodny z oczekiwaniami (rys. 3.38). Mobilizacja oporu pobocznicy i podstawy rośnie wraz ze wzrostem osiadania pala względem otaczającego go gruntu, dlatego też najmniejszą mobilizację oporu obserwujemy dla pali wewnętrznych.



Rys. 3.37. Obciążenie poszczególnych pali pracujących w grupie zwieńczonych płytą [34]



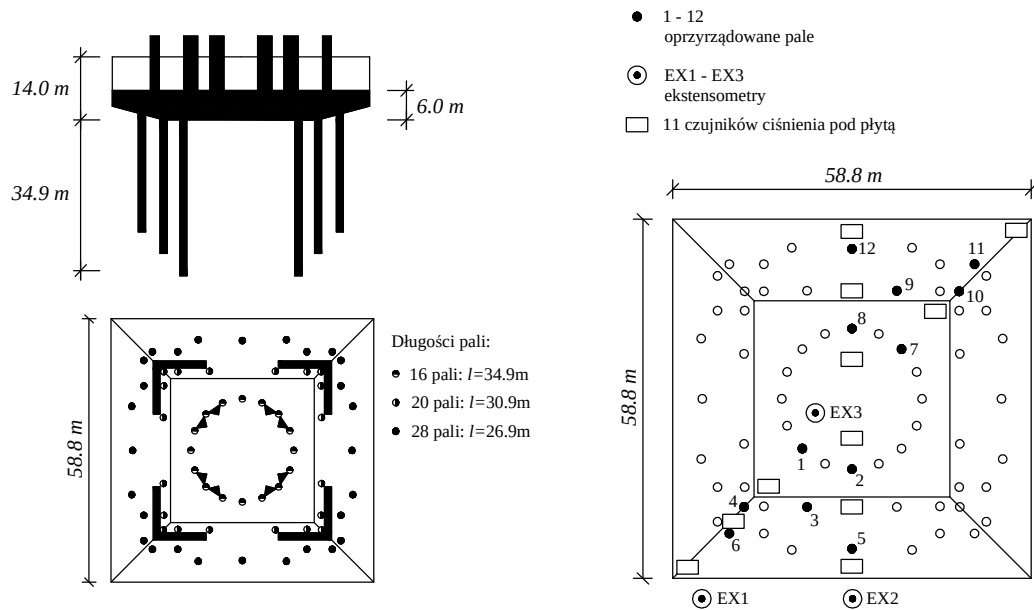
Rys. 3.38. Wpływ usytuowania pala na dystrybucję siły w trzonie oraz mobilizację oporu pobocznicy [31,34]

Powyższe wyniki badań i zdobyte doświadczenie wykorzystano podczas realizacji budynku **Messturm**, również posadowionego na łożach frankfurckich [34,39,93]. Analiza geotechnicznych warunków bezpośredniego posadowienia wieżowca o ciężarze 1900 MN, pozwoliła oszacować osiadanie na poziomie 40 cm. Wyznaczone osiadania, ryzyko przechylenia oraz duża smukłość wieżowca zaważyły o konieczności wykonania fundamentu płytowo-palowego.



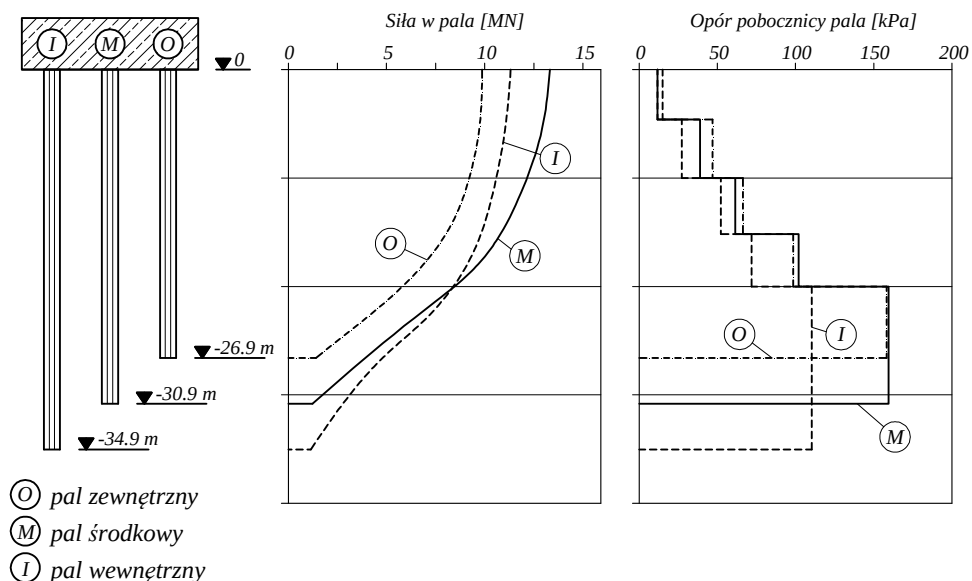
Rys. 3.39. Budynek Messturm, Frankfurt

Płyta fundamentowa, o wymiarach 58.8x58.8 m i grubości od 6 m w środku do 3 m na krawędziach, spoczywa na podłożu i 64 wielkośrednicowych palach o średnicy 1.3 m. Pale ułożono w charakterystyczny układ trzech pierścieni, różnicując długości pali, odpowiadające obciążeniom przekazywanym przez trzypiętiowo-szkieletowy układ konstrukcyjny budynku [73]. Najdłuższe pale o długości 34.9 m usytuowane są w wewnętrznym pierścieniu pod trzonem wieżowca. Pale środkowego pierścienia o długości 30.9 m, usytuowano w obrysie ścian zewnętrznych budynku, natomiast najkrótsze o długości 26.9 m znajdują się poza częścią wieżową. Powyższy układ pali miał na celu redukcję sił wewnętrznych i momentów zginających w płycie fundamentowej.



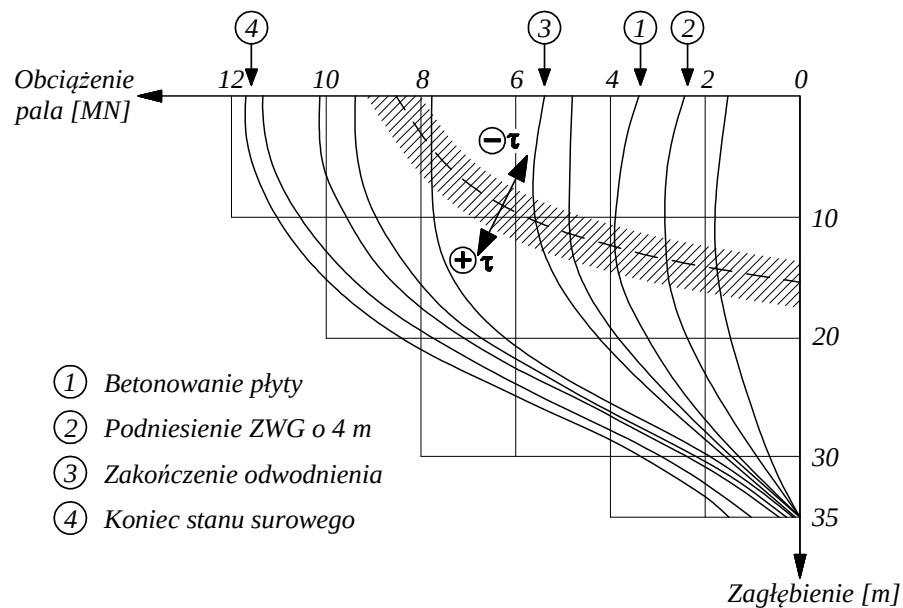
Rys. 3.40. Schemat fundamentu i planu palowania wieżowca Messeturm [34]

Udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże ustabilizował się na poziomie 55% obciążenia całkowitego. Założenia projektowe oraz plan palowania pozostawiający centralną część płyty fundamentowej bez pali, przyczynił się do znacznego udziału płyty w przekazywaniu obciążenia. W związku z powyższym układ pali ogranicza ich wzajemne oddziaływanie, w porównaniu ze względnie niedużym rozstawem występującym w budynku Torhaus, co przyczynia się dodatkowo do wzrostu mobilizacji oporów pobocznic pali wewnętrznych w porównaniu obu wieżowców (rys. 3.38 i 3.41).



Rys. 3.41. Wpływ usytuowania pala na dystrybucję siły w trzonie oraz mobilizację oporu pobocznic [31,34]

Znaczne gabaryty płyty fundamentowej, wygenerowały podczas betonowania naprężenia kontaktowe na podłożu na poziomie 150 kPa, powodując wywołanie negatywnego tarcia wzdłuż górnych odcinków pobocznic pali. Tarcie negatywne obserwowane początkowo do głębokości wynoszącej 10-15 m, malało wraz z postępem robót tzn. wraz z obciążeniem i osiadaniem fundamentu (rys. 3.42). Znik stref tarcia negatywnego zaobserwowano dopiero podczas kończenia budowy wieżowca. Powyższe zjawisko potwierdza konieczność stosowania pali o długości większej niż bezpośrednie oddziaływanie płyty w celu zwiększenia ich efektywności oraz że przy jednakowej długości pali korzystniej stosować mniejszą ilość dłuższych pali.

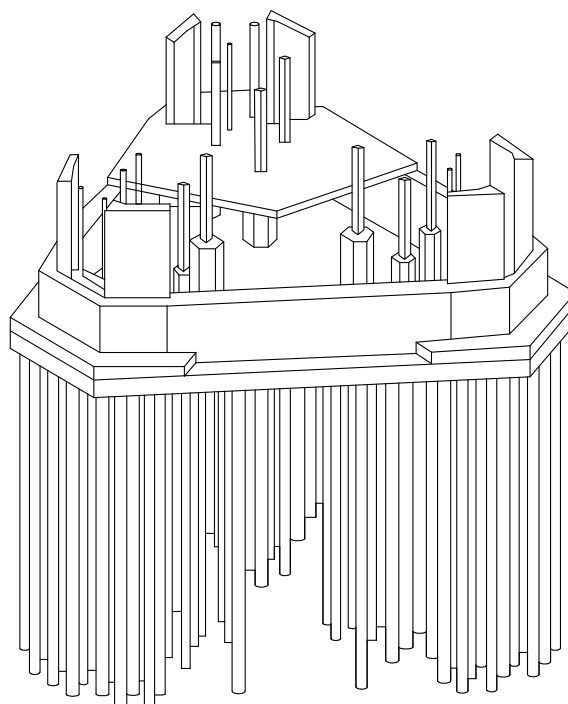


Rys. 3.42. Wpływ postępu robót na strefę tarcia negatywnego [93]

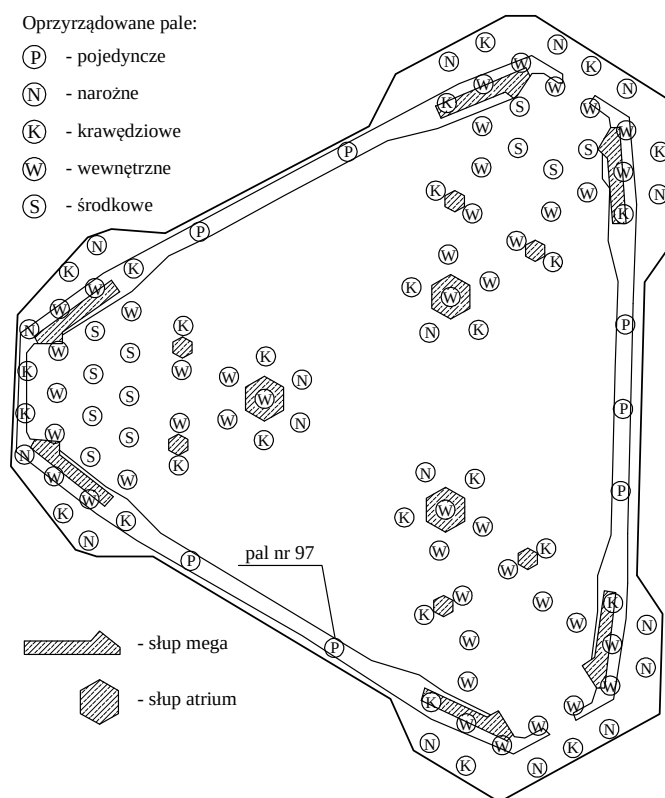
Badania terenowe przeprowadzone podczas wznoszenia wieżowca **Commerzbank** prezentują zachowanie posadowienia charakteryzującego się znaczną różnicą modułu odkształcenia podłoża pod płytą i w dolnych partiach pali. W wieżowcu zaprojektowano charakterystyczny trzon składający się z trzech części usytuowanych w narożach trójkątnej płyty fundamentowej, wymuszając zarazem plan palowania skoncentrowany w tych miejscach. W celu zwiększenia sztywności płyty uwzględniono współpracę ścian połączonych ze stropem tworząc skrzynię fundamentową [73]. Płytę posadowiono na 111 wielkośrednicowych palach zagłębionych średnio 8.8 m w skałach wapiennych o średnim modułu odkształcenia wynoszącym 20000 MPa. Pomierzone osiadanie wieżowca wynosiło jedynie 2 cm, a towarzyszący mu udział pali w przekazywaniu obciążenia wynosił 95 % obciążenia całkowitego.



Rys. 3.43. Budynek Commerzbank, Frankfurt

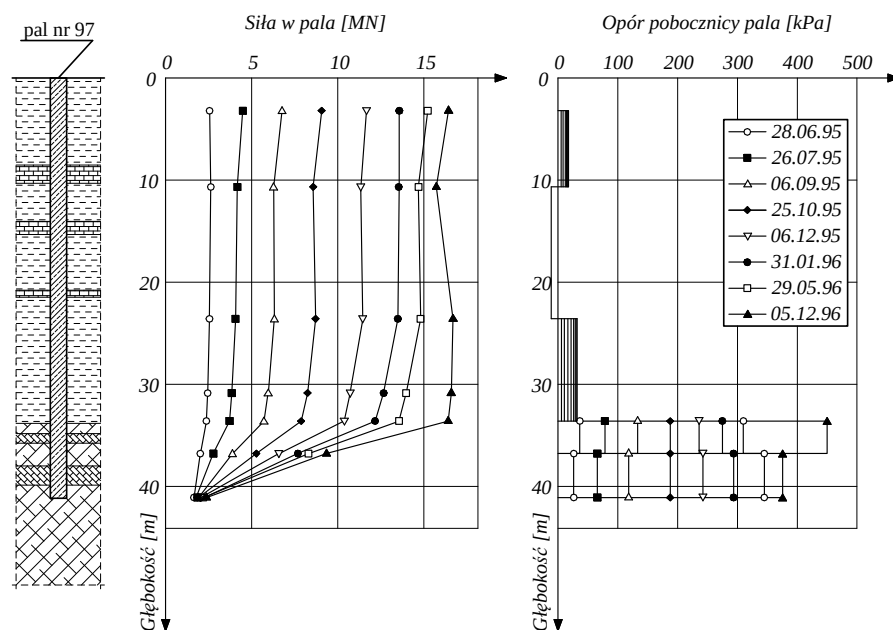


Rys. 3.44. Widok posadowienia wieżowca Commerzbank [73]



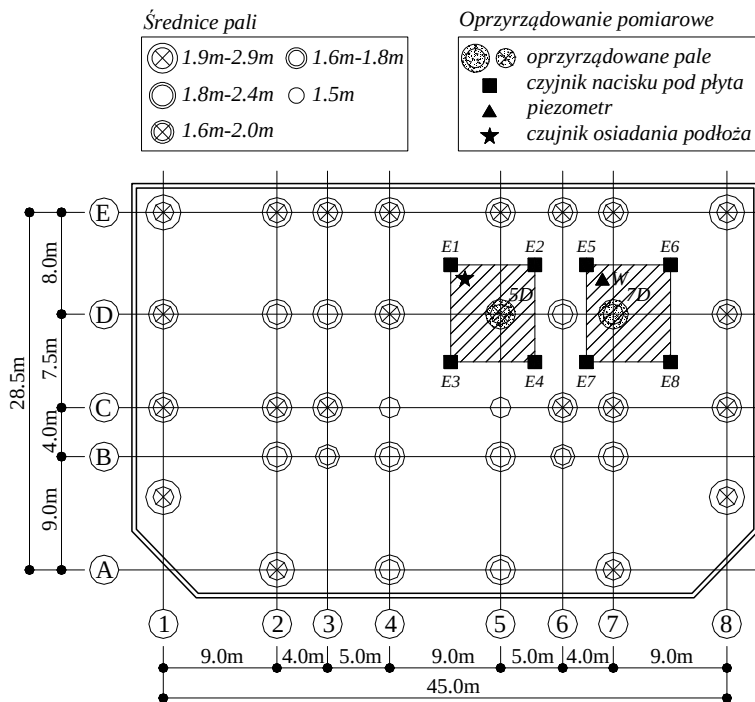
Rys. 3.45. Schemat fundamentu z planem palowania wieżowca Commerzbank [93]

Wyniki pomiarów ekstensometrycznych w trzonach pali przedstawiają nieznaczny udział pobocznic pali w warstwie iłu oraz mobilizację pobocznic do wartości 450 kPa w skale wapiennej. Powyższe pomiary przedstawiają ponadto, jak brak wymaganego osiadania ogranicza mobilizację oporu pobocznic pali w warstwie iłu oraz odpór gruntu pod płytą.

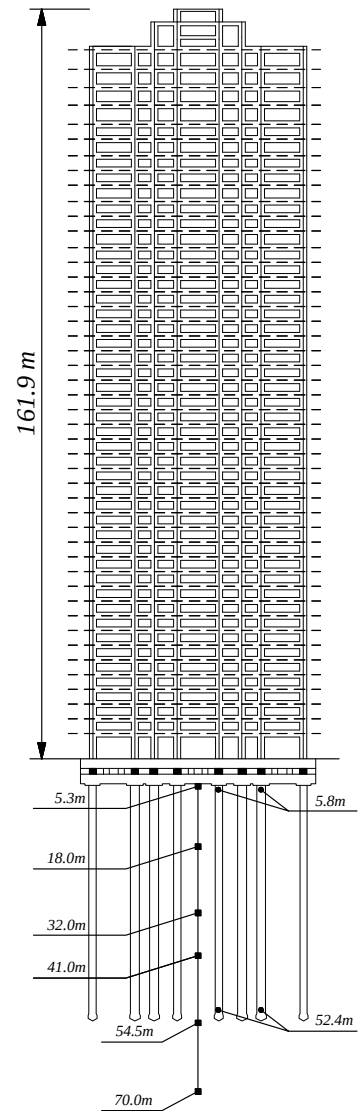


Rys. 3.46. Dystrybucja siły w trzonie oraz mobilizacja oporu pobocznic pala [34]

Yamashita, Yamada, Hamada [107,108] przedstawili badania przeprowadzone podczas wznoszenia 47-piętrowego budynku mieszkalnego w mieście Nagoya w Japonii. Średnie obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni płyty, spoczywającej na podłożu i 36 wielkośrednicowych palach (rys. 3.48), wynosi 600 kPa. Konieczność wykonania pali została podyktowana występowaniem dwóch około 10 m warstw pyłów, przyczyniających się podczas analizy bezpośrednio posadowionej płyty do powstania nierównomiernych osiadań wykraczających poza dopuszczalną wartość.



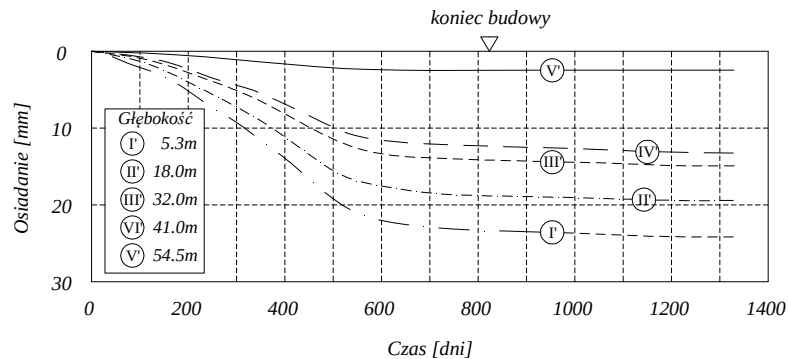
Rys. 3.48. Schemat płyty fundamentowej i planu palowania, Nagoya [107]



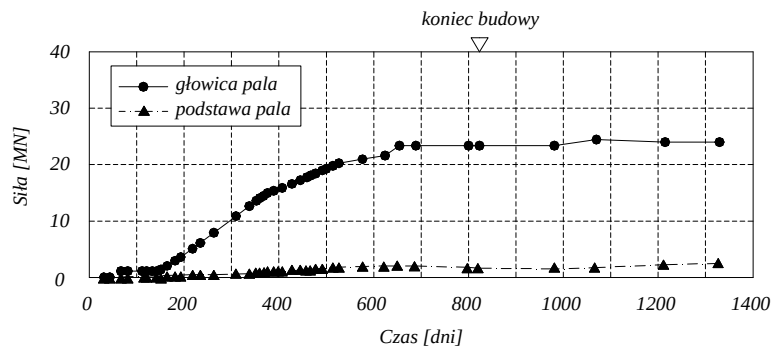
Rys. 3.47. Schemat 47-piętrowego budynku, Nagoya [107]

Na podstawie przeprowadzonych badań pomierzono osiadanie płyty w zakresie 12 mm do 29 mm. Na rysunku 3.49 przedstawiono osiadanie podłoża, w profilu pomiarowym, wywołane obciążeniem wznoszonego budynku. Zaobserwowano wyraźny spadek przemieszczeń podłoża wraz z głębokością, szczególnie w dolnych partiach 50-metrowych pali. Świadczy to o mobilizacji oporów przede wszystkim pobocznic pali i nieznacznym obciążeniu przekazywanym przez podstawy, co dodatkowo potwierdzają badania sił w głowicach i podstawach pali 5D i 7D (rys. 3.50

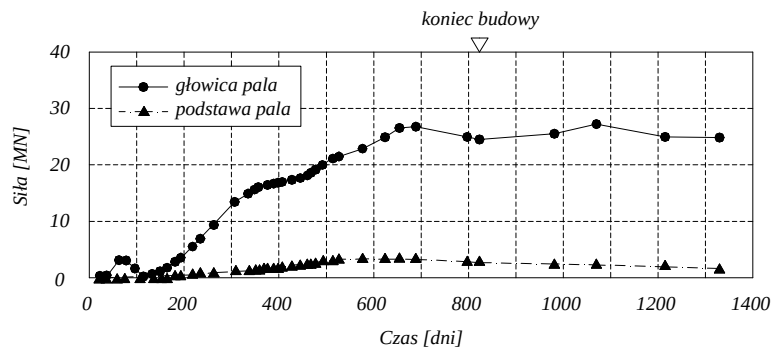
i 3.51). Autorzy badań wykorzystując czujniki ciśnienia pod płytą wokół oprzyrządowanych pali 5D i 7D, oszacowali 17 miesięcy po zakończeniu budowy ich udział odpowiednio na poziomie 89 % i 84 %.



Rys. 3.49. Wpływ głębokości na osiadanie podłoża [108]



Rys. 3.50. Siła w trzonie pala 5D [108]



Rys. 3.51. Siła w trzonie pala 7D [108]

3.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Wszystkie metody obliczeniowe są cenne ze względu na cel dla którego zostały opracowane i z założeniem umiejętności uwzględnienia uproszczeń im towarzyszących. Wpływają one na naszą wiedzę i postrzeganie analizy fundamentów płytowych spoczywających na palach. Współtowarzyszące im założenia i uproszczenia wymuszają od ich użytkownika świadomego korzystania w celu poprawnej analizy posadowienia,

a w konsekwencji pomimo swoich ograniczeń dalej umożliwiają przeprowadzenie analiz bądź badań weryfikujących bardziej złożone modele obliczeniowe wykorzystane podczas prac nad konkretnym zadaniem inżynierskim.

Na szczególną uwagę zasługuje także fakt, że w prezentowanych metodach przybliżonych brakuje prac eliminujących powszechne zastrzeżenie stawiane metodom bazującym na teorii sprężystości, tj. fakcie uzyskiwania osiadania o wyższych wartościach niż podczas pomiarów osiadania rzeczywistych obiektach.

Powyższa uwaga dotyczy przede wszystkim metod obliczania fundamentów bezpośrednich ale także w części metod opracowanych na potrzeby analizy fundamentów palowych. Warto zastanowić się, czy istnieją metody wykorzystujące rozwiązania teorii sprężystości w analizie osiadania fundamentów weryfikowalne na podstawie badań terenowych. Jedną z takich metod jest podejście uwzględniające zasięg strefy aktywnej podczas wyznaczania osiadania fundamentów autorstwa Meyera [58], zastosowane w proponowanym w niniejszej rozprawie modelu matematycznym.

Pomimo zastrzeżeń omówionych powyżej warto zwrócić uwagę na fakt, że podczas analizy osiadania grup palowych przenoszących w całości obciążenie na podłoże, metody bazujące na teorii sprężystości, przy powszechnie stosowanych współczynnikach bezpieczeństwa, są akceptowalne [55,83]. Wyjątkiem mogą być pale o wysokim poziomie obciążenia względem ich wartości granicznej. Natomiast w sytuacji stosowania pali w celu ograniczenia osiadania i jego wyrównaniu, jak ma to miejsce w fundamentach płytowo-palowych, powszechnie dopuszcza się większe osiadania, a w związku z tym niższe współczynniki bezpieczeństwa. Koniecznym wówczas staje się uwzględnienie nieliniowej charakterystyki zachowania poszczególnych pali tworzących fundament. Umożliwia to przeprowadzenie z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością analizy omawianego posadowienia.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury można stwierdzić, że podejście uwzględniające nieliniową charakterystykę pracy pala w postaci krzywej obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala z analizą mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala nie doczekało się jeszcze zastosowania w analizie płyt fundamentowych spoczywających na podłożu i grupie pali. Została opracowana metoda bazująca w sposób bezpośredni na wynikach próbnego obciążenia statycznego pala podczas analizy zachowania fundamentów płytowo-palowych [87]. Metoda ta wykorzystuje krzywą China w analizie zachowania pala pod obciążeniem przyłożonym w jego głowicy, krzywą której nie można stosować poza zakresem maksymalnego

obciążenia przyłożonego podczas próbnego obciążenia pala [92]. Ponadto w metodzie tej nie poddano analizie zjawiska mobilizacji oporu poboczniczy i podstawy pala wywołanych osiadaniem, a zatem nie uwzględniono ich wpływu na wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża. W konsekwencji przyjętych uproszczeń we wspomnianej metodzie można stwierdzić, że istnieje możliwość dokładniejszej analizy zachowania fundamentu płytowo-palowego z uwzględnieniem bliższej rzeczywistości interakcji układu płyta-pale-podłoże.

W proponowanej w pracy metodzie analizy fundamentów płytowo-palowych wykorzystano metodę aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego pala z ich ekstrapolacją do nośności granicznej oraz metodę będącą zarazem narzędziem w analizie mobilizacji oporu poboczniczy i podstawy pala wywołanych osiadaniem.

Przedstawione w niniejszym rozdziale badania laboratoryjne umożliwiają lepiej zrozumieć oraz zapoznać się ze zjawiskami zachodzącymi w ośrodku gruntowym pod płytą spoczywającą na podłożu i palach. Nasza wiedza na temat stosowania badań laboratoryjnych oraz różnic im towarzyszących w porównaniu z badaniami terenowymi została szeroko omówiona m.in. przez Tejchmana [93], Bałachowskiego [3] i Krasińskiego [50]. Wiedza na temat efektu skali współtowarzyszącego przeprowadzaniu badań laboratoryjnych w zależności od wykorzystanego ośrodka gruntowego, ale także zjawiska dyatacji i kontraktacji, umożliwia świadome wykorzystywanie wyników pomiarów uzyskanych podczas badań w małej skali. Tak jak podczas wykorzystania bądź bazowania na różnych metodach obliczania fundamentów płytowo-palowych, konieczna staje się umiejętność adaptacji uzyskanych wyników w celu wykorzystania ich podczas analizy pracy rzeczywistego fundamentu płytowo-palowego, a w konsekwencji geotechnicznych warunków posadowienia nowo wznoszonych obiektów.

Badania w skali naturalnej są najcenniejsze poznawczo ze względu na naturalny a zarazem docelowy charakter pracy konstrukcji i podłoża. Uwzględniają one wszystkie efekty technologiczne związane z prowadzonymi robotami budowlanymi. Zaliczamy do nich różne technologie wykonania pali wpływające na zmianę stanu podłoża w ich otoczeniu, wpływ ewentualnego odwodnienia wykopu oraz wpływ samego wielko kubaturowego wykopu na odprężenia i stan dna. Ważnym technologicznie etapem jest także poprawa parametrów bądź wymiana podłoża bezpośrednio pod płytą. Pełni ono zadanie wyeliminowania ewentualnych niekorzystnych skutków prowadzenia robót palowych i ziemnych, ale co najważniejsze etap ten wpływa na poprawę warunków

przekazywania obciążenia przez płytę od pierwszych stopni obciążenia. Badaniom terenowym towarzyszy ponadto betonowanie płyt fundamentowych, wpływające na obciążenie podłoża wokół pali mieszanką betonową. Korzyści towarzyszące badaniom w skali naturalnej, tj. możliwość pełnej analizy posadowienia płyty na palach w zadanych warunkach gruntowych z daną technologią wykonania i etapowania robót, pomimo wysokich kosztów ich realizacji zachęcają do dalszego ich prowadzenia.

Wyniki badań terenowych stanowią ponadto niezastąpione źródło weryfikacji różnych metod i modeli obliczeniowych. Dlatego też, wraz z większą ilością takich badań i analizą ich wyników, opracowywane metody wykazywać się będą coraz większą dokładnością.

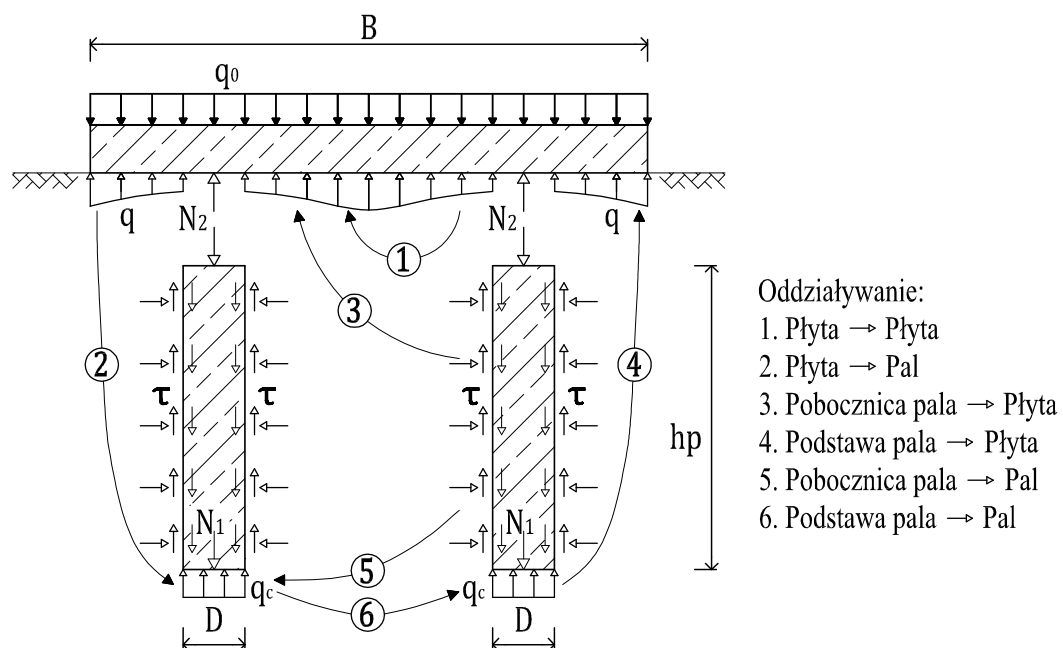
Powszechną praktyką jest sprowadzanie badań terenowych do analizy pracy pojedynczego pala na podstawie próbnego obciążenia statycznego. Dlatego też ważnym jest opracowanie metody wykorzystującej wyniki testu statycznego pala do analizy krzywej obciążenie-osiadanie pala występującego w grupie pod płytą. Dodatkowym atutem byłoby wykorzystanie krzywej ekstrapolującej wyniki próbnego obciążenia do nośności granicznej. Umożliwiłoby to wyznaczenie współczynników bezpieczeństwa posadowienia, ale także w razie konieczności zoptymalizowanie planu palowania bądź wymiarowania płyty fundamentowej.

Po przeanalizowaniu dostępnej literatury można stwierdzić, że brakuje w niej opisu matematycznego zjawiska współpracy płyty z grupą pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże z uwzględnieniem stref aktywnych płyty i pali, odpowiadających miąższości podłoża ulegającej odkształceniu pod wpływem obciążenia. Ponadto lukę poznawczą stanowi brak badań związanych z możliwością wykorzystania krzywej obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala w pełnym zakresie, do analizy krzywej obciążenie-osiadanie pala pracującego w grupie pod płytą.

4. OPIS MATEMATYCZNY ZJAWISKA WSPÓŁPRACY PŁYTY I PALI

4.1. Wprowadzenie do modelowania matematycznego

Analiza fundamentów płytowych spoczywających na podłożu i palach jest zagadnieniem złożonym, ponieważ wymaga wiedzy na temat podatności ośrodka gruntowego pod płytą, przy uwzględnieniu wzajemnego oddziaływania układu płyta-pala-podłoże. Na stan naprężenia kontaktowego fundament-podłoże, a zatem i jego osiadanie, mają wpływ odpowiednio: rodzaj i stan podłoża z jego uwarstwieniem, sztywność i wielkość fundamentu, faktyczna charakterystyka pracy pala pojedynczego oraz pracującego w grupie z uwzględnieniem mobilizacji oporów wzdłuż pobocznicy i pod podstawami pali, usytuowanie pali, a także zasięgi stref aktywnych naprężenia. W celu poprawnego zaprojektowania płyty fundamentowej, wymagane jest określenie realnej relacji obciążenie-osiadanie pali oraz obciążenie-osiadanie płyty, wpływające bezpośrednio na wielkości sił wewnętrznych w płycie. W związku z powyżej wymienionymi czynnikami wpływającymi na zjawiska zachodzące pod płytą fundamentów płytowo-palowych, zagadnienie to pozostaje wciąż aktualnym przedmiotem badań.



Rys. 4.1. Schemat fundamentu płytowo-palowego

Poznanie procesów zachodzących pod płytą dodatkowo komplikują wspomniane zasięgi stref aktywnych płyty fundamentowej i pali. Wyznaczają one miąższości gruntu w których pod wpływem przyłożonego obciążenia występuje przemieszczanie się cząstek. Przemieszczanie, które wraz z losowym wzajemnym oddziaływaniem cząstek gruntu na siebie, jest na poziomie mikroskopowym zagadnieniem nierozwiązywalnym. Mechanika ośrodków rozdrobnionych powyższą trudność rozwiązuje, poddając badaniu grunt w skali makroskopowej, co umożliwia adaptację rozwiązań mechaniki ośrodków ciągłych. W konsekwencji można stworzyć opis matematyczny sprężystej płyty spoczywającej na podłożu i palach z uwzględnieniem stanu naprężenia i osiadania ośrodka gruntowego. Poprawność opracowanego modelu matematycznego można zweryfikować na podstawie mierzalnych skutków. W badaniach fundamentów płytowo-palowych są nimi osiadania, a w przypadku badań szczegółowych także rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale.

W niniejszym rozdziale przedstawiono metodę uwzględniającą wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża, umożliwiającą obliczanie naprężenia kontaktowego oraz osiadania sprężystej płyty spoczywającej na podłożu i palach. W metodzie wykorzystano badania nad zasięgiem stref aktywnych naprężenia w wyznaczaniu osiadań fundamentów bezpośrednich i palowych oraz krzywą aproksymującą wyniki testów statycznych pali. Umożliwiają one uwzględnienie faktycznych relacji obciążenie-osiadanie poszczególnych elementów fundamentu.

4.2. Założenia przyjęte do modelu matematycznego współpracy płyty i pali

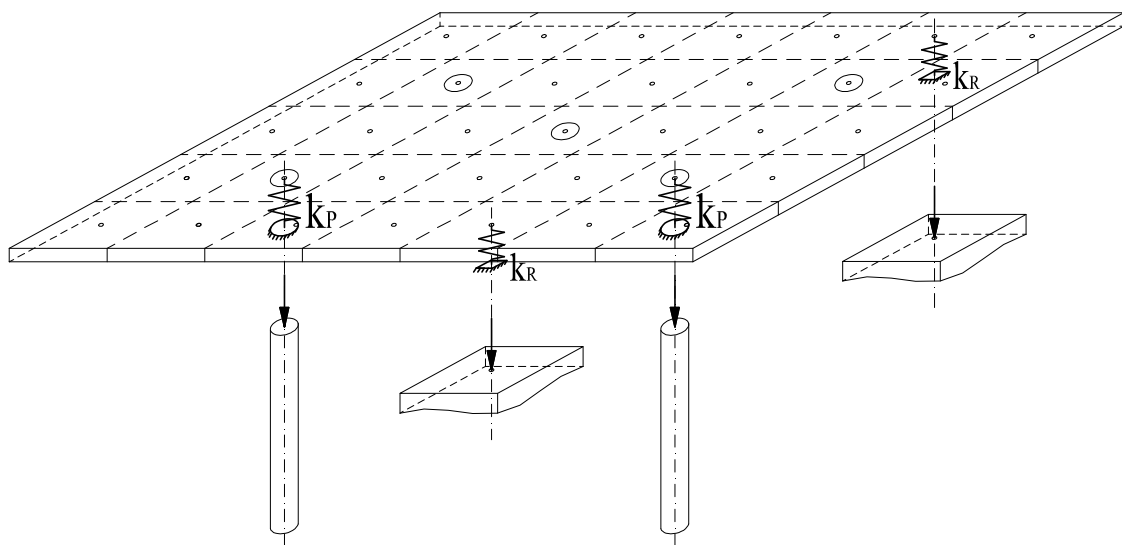
Dla usystematyzowania założeń, zostały one poniżej wymienione, natomiast szerzej omówiono je w dalszej części rozdziału. Przyjęte założenia:

- o sprężysta płyta spoczywa na półprzestrzeni sprężystej gruntu i ściśliwych palach,
- o pionowe obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni płyty,
- o opis zaniku naprężenia w gruncie oparto na teorii Boussinesqa, uwzględniając jedynie pionową składową naprężenia w ośrodku gruntowym,
- o obowiązuje zasada superpozycji naprężenia,
- o uwzględniono następujące oddziaływania w postaci osiadań cząstkowych:
 - osiadanie pola elementarnego płyty w wyniku oddziaływania własnego pola,
 - osiadanie pola elementarnego płyty w wyniku oddziaływania pola sąsiedniego,
 - osiadanie pala w wyniku obciążenia w głowicy własnej pala,

- osiadanie pala w wyniku oddziaływania podstawy pala sąsiedniego,
 - osiadanie pala w wyniku oddziaływania pobocznicy pala sąsiedniego,
 - osiadanie pala w wyniku oddziaływania pola elementarnego płyty,
 - osiadanie pola elementarnego płyty w wyniku oddziaływania podstawy pala,
 - osiadanie pola elementarnego płyty w wyniku oddziaływania pobocznicy pala,
- o wyznaczając osiadania cząstkowe elementów nośnych fundamentu uwzględniono zasięgi stref aktywnych naprężenia dla płyty i pali wg Meyera,
- o moduł odkształcenia gruntu nie zmienia się ze wzrostem obciążenia i głębokości,
- o sprężysta płyta spoczywa na podłożu uwarstwionym - do trzech warstw, o znanych parametrach,
- o pale osadzone są w podłożu o uśrednionych parametrach wzdłuż pobocznic,
- o nieliniowa zależność obciążenie-osiadanie pala, w oparciu o krzywą Meyera-Kowalowa (krzywa MK),
- o mobilizacja oporu pobocznicy i podstawy pala wg metody MK, opór wzdłuż pobocznicy uśredniony, stały na całej długości pala,
- o nie uwzględniono wpływu naprężenia generowanego przez płytę w ośrodku gruntowym na wartość oporu pobocznicy pala.

Model matematyczny współpracy układu fundament-podłoże oparto na równaniu różniczkowym powierzchni ugięcia płyty izotropowej na podporach sprężystych, pod pionowym obciążeniem równomiernie rozłożonym na powierzchni [76,88]:

$$\frac{\partial^4 s(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 s(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 s(x, y)}{\partial y^4} = \frac{q_0(x, y)}{D_b(x, y)} - \frac{k(x, y)}{D_b(x, y)} \cdot s(x, y) \quad (4.1)$$

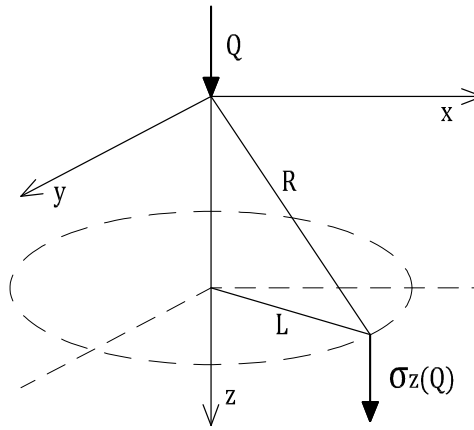


Rys. 4.2. Schemat dyskretyzowanej płyty na podporach sprężystych

Obliczenia statyczne płyty sprowadzają się do rozwiązania powyższego równania, dla odpowiednio dobranych sztywności podpór. Powinny one uwzględniać podatność ośrodka gruntowego, charakteryzując odpowiednio współpracę płyty z podłożem i palami, przy ich wzajemnej interakcji. Sztywności te określa stosunek naprężenia kontaktowego pól dyskretyzowanej płyty z podłożem i palami do osiadania, w danym profilu obliczeniowym.

Stan naprężenia w ośrodku gruntowym pod płytą wyznaczono na podstawie teorii Boussinesqa [22,106]. Uwzględniono jedynie pionową składową naprężenia w gruncie, dla zależności wyznaczającej rozkład naprężenia od siły skupionej:

$$\sigma_z(Q) = \frac{3 \cdot Q \cdot z^3}{2\pi \cdot R^5}, \quad L = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad R = \sqrt{L^2 + z^2} \quad (4.2)$$



Rys. 4.3. Naprężenie pionowe w układzie kartezjańskim

Powyższy wzór został wykorzystany do określenia rozkładu naprężenia pod płytą od sił generowanych na powierzchni kontaktowej, stanowiących odpór gruntu w postaci sił skupionych Q ze względu na dyskretyzację płyty na pola elementarne oraz od sił w podstawach pali będących wynikiem ich mobilizacji N_I :

$$\sigma_z(N_I) = \frac{3 \cdot N_I \cdot z^3}{2\pi \cdot R^5} \quad (4.3)$$

Ponadto wzór (4.2) posłużył do wyznaczenia rozkładu naprężenia w ośrodku gruntowym wywołanego naprężeniami stycznymi wzdłuż pobocznic pali w wyniku mobilizacji oporu wzdłuż nich [57]. Przy założeniu:

$$\tau(z) = \text{const.} = \tau \quad (4.4)$$

$$Q = \int_0^{h_p} \chi \cdot \tau d\xi; \quad z \rightarrow z - \xi \quad (4.5)$$

rozkład naprężenia uzyskano ze wzoru:

$$\sigma_z = \int_0^{hp} \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi} \cdot \frac{(z - \xi)^3}{\sqrt{(z - \xi)^2 + L^2}^5} d\xi \quad (4.6)$$

po wykonaniu działań otrzymano:

$$\sigma_z(\tau) = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{(z - hp)^2 + L^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + L^2}} - \frac{L^2}{3 \cdot \sqrt{(z - hp)^2 + L^2}^3} + \frac{L^2}{3 \cdot \sqrt{z^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.7)$$

W opracowanym opisie matematycznym obowiązuje zasada superpozycji [16]. Zgodnie z nią naprężenie całkowite w każdym punkcie jest sumą naprężenia od wszystkich sił działających na powierzchni i w półprzestrzeni.

$$\sigma_z^A = \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i \quad (4.8)$$

Analizując stan naprężenia, w punkcie A, pod płytą fundamentu płytowo-palowego zasadę superpozycji wyraża zależność:

$$\sigma_z^A = \sum_{i=1}^{i=m} \sigma(Q)_i + \sum_{j=1}^{j=n} \sigma(N_1)_j + \sum_{j=1}^{j=n} \sigma(\tau)_j \quad (4.9)$$

Omawiana zasada obowiązuje również w odniesieniu do skutków działania naprężenia, w tym przypadku do osiadań. W modelu matematycznym, w każdym profilu obliczeniowym, zasadę superpozycji przedstawiono w postaci:

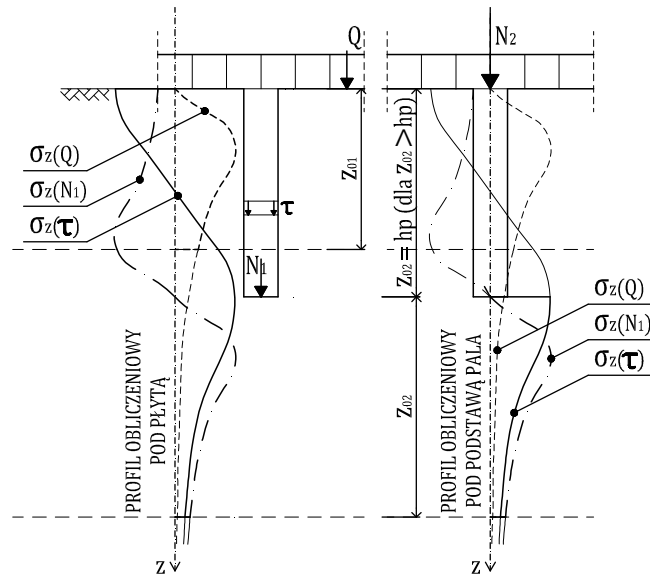
$$s_R = \sum_{i=1}^{i=n} s(Q)_i + \sum_{j=1}^{j=m} s(N_1)_j + \sum_{j=1}^{j=m} s(\tau)_j \quad (4.10a)$$

$$s_P = \sum_{i=1}^{i=n} s(Q)_i + s(N_2) + \sum_{j=1}^{j=m-1} s(N_1)_j + \sum_{j=1}^{j=m-1} s(\tau)_j \quad (4.10b)$$

W celu wyznaczenia rozkładu naprężenia kontaktowego płyta-podłoże, z uwzględnieniem wpływu pali na naprężenia kontaktowe, płytę fundamentową podzielono na pola elementarne. Naprężenia kontaktowe płyta-podłoże zastąpiono siłami skupionymi w środku ciężkości każdego pola elementarnego.

Wzajemne oddziaływanie poszczególnych elementów nośnych fundamentu wyznaczono w postaci osiadań cząstkowych. Uzyskano je przez odpowiednie całkowanie rozkładu naprężenia w gruncie w granicach stref aktywnych Meyera (rys. 4.4).

Zasięg strefy aktywnej rozumiemy jako warstwę podłoża, która ulega odkształceniu pod wpływem przyłożonego obciążenia. Zagadnienie stref aktywnych naprężenia nabiera szczególnego znaczenia podczas analizowania i projektowania fundamentów płytowo-palowych. Wymaga ona uwagi i poznania, jako czynnik determinujący osiadanie fundamentów w ogóle, a szczególnie wykorzystujących pale w celu redukcji osiadań i ich wyrównaniu pod całym obiektem.



Rys. 4.4. Schemat rozkładu naprężenia w gruncie z uwzględnieniem stref aktywnych [64]

Z badań Meyera wynika, że zasięg strefy aktywnej naprężenia gruntu mineralnego, rodzimego dla płyty statycznej VSS zależy od parametrów gruntu oraz naprężenia generowanego na powierzchni kontaktowej σ_0 , według zależności [58]:

$$z_0 = \frac{1}{2 \cdot \tan \phi} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{E_0}{\sigma_0}\right)} \cdot \frac{\sigma_0}{\gamma} \quad (4.11)$$

Osiadanie płyty natomiast z uwzględnieniem strefy aktywnej z_0 uzyskujemy ze wzoru:

$$s = \frac{\sigma_0}{E_0} \cdot \frac{D \cdot z_0}{D + z_0} \quad (4.12)$$

Prace [58,67] potwierdzają praktyczne zastosowanie wzoru 4.11 do wyznaczenia zasięgu strefy aktywnej naprężenia przy obliczaniu osiadań fundamentów bezpośrednich i palowych. Dla fundamentów palowych strefę aktywną wyznaczamy na podstawie naprężenia generowanego w podstawie pała. W modelu matematycznym zjawiska zasięg stref aktywnych naprężenia płyty i pali wyznaczono odpowiednio ze wzorów:

$$z_{01} = \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg} \phi_n} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{E_n}{q}\right)} \cdot \frac{q}{\gamma_n} \quad n = 1, 2, 3 \quad (4.13)$$

$$z_{02} = \frac{1}{2 \cdot \operatorname{tg} \phi_q} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{E_q}{q_c}\right)} \cdot \frac{q_c}{\gamma_q} \quad (4.14)$$

Dla gruntów mineralnych, nasypowych zasięg strefy aktywnej równa się całej miąższości gruntu antropogenicznego. Powyższą zasadę stosujemy także dla gruntów o znacznej ściśliwości.

W związku z powyższym, osiadania cząstkowe w postaci ogólnej wyraża zależność:

$$s = \int_{z_I}^{z_{II}} \frac{\sigma_z}{E_0} dz \quad (4.15)$$

gdzie:

z_I , z_{II} - granice stref aktywnych rozkładu naprężenia, uszczegółowione w kolejnych podrozdziałach pracy.

W proponowanej metodzie, uwzględniającej strefy aktywne naprężenia Meyera podczas obliczania osiadania, zakłada się stałą wartość modułu odkształcenia gruntu w całym zakresie obciążenia oraz stałą wartość modułu odkształcenia gruntu wraz z głębokością [58]:

$$E(\sigma, h) = \text{const} = E_0 \quad (4.16)$$

Sprężysta płyta spoczywa na podłożu uwarstwowionym, składającym się maksymalnie z trzech warstw geotechnicznych. Poszczególne warstwy charakteryzują następujące parametry: moduł odkształcenia gruntu E_n , ciężar objętościowy γ_n oraz kąt tarcia wewnętrznego ϕ_n .

Analizę pracy pali prowadzono przy założeniu, że są one osadzone w gruncie o uśrednionych parametrach wzdłuż pobocznic. W prezentowanej metodzie wymaganym parametrem jest średnia arytmetyczna modułów odkształcenia gruntu wzdłuż pobocznic pali E_t oraz parametry charakteryzujące grunt pod podstawą pala, w postaci: modułu odkształcenia gruntu E_q , ciężaru objętościowego γ_q oraz kąta tarcia wewnętrznego ϕ_q .

Nieliniową charakterystykę pracy pala pojedynczego w gruncie wyznaczono na podstawie krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali, autorstwa Meyera

i Kowalowa [65], w postaci:

$$s(N_2) = \frac{C \cdot N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_2}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (4.17)$$

Prezentowana krzywa, po wyznaczeniu charakteryzujących ją parametrów, tj. nośności granicznej pala N_{gr} i dwóch stałych C i κ , umożliwia ekstrapolację krzywej obciążenie-osiadanie poza zakres testu statycznego pala do nośności granicznej. Podczas opisu matematycznego nośność graniczną należy rozumieć jako obciążenie wywołujące osiadanie pala bez zmiany oporu wokół niego, tzn. odpowiadającą pionowej asymptocie na krzywej obciążenie-osiadanie.

Mobilizacja oporu pobocznic i podstawy pala rozpoczyna się z przemieszczeniem pala względem podłoża. Analiza mobilizacji oporów wokół pala pod wpływem siły przyłożonej w głowicy jest zagadnieniem złożonym, a ich wartości w sposób nieliniowy zależą od osiadania. Do głównych czynników wpływających na wartości analizowanych oporów zaliczamy: stan naprężenia efektywnego w gruncie wokół pala, rodzaj i stan warstw geotechnicznych podłoża, materiał i technologię wykonania pala. W opracowanym modelu wykorzystano wyniki badań nad mobilizacją oporów wokół pala prowadzonych w Katedrze Geotechniki Wydziału Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego, będące zarazem rozwinięciem metody Meyera-Kowalowa (MK). Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika wniosek, że mobilizacja oporu pobocznic pala może zmieniać się od zera do wartości maksymalnej dla szczególnej wartości osiadania bądź też po osiągnięciu maksimum może ulec zmniejszeniu, stanowiącym w skrajnym przypadku 1/3 wartości maksymalnej [69].

W opracowanym modelu obliczeniowym nie uwzględniono wpływu naprężenia generowanego przez płytę fundamentową w ośrodku gruntowym na wartość oporu wzdłuż pobocznic pala. Podczas badań laboratoryjnych prezentowanych m.in. w pracach [48,74,90] zaobserwowano wyraźny wpływ udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże na wzrost oporu wzdłuż górnych części pobocznic pali. W badaniach terenowych wpływ ten nie jest już tak wyraźny [34,39]. Przyczyn powyższego zjawiska może być wiele. Począwszy od efektu skali, który nierozdzielnie towarzyszy badaniom modelowym. W zakresie badań geotechnicznych omówiono go m.in. w pracach [3,50,93]. Wynika z nich, że mobilizacja oporów pobocznic pali

w małej skali zależy od ich średnic i nie odpowiada oporom pobocznic mierzonym w skali naturalnej. Ponadto przyczyn powyższej rozbieżności szukać należy w różnicach między ośrodkami gruntowymi wykorzystywanymi w badaniach laboratoryjnych a występującymi w warunkach rzeczywistych oraz w różnicach w samej technologii i etapowaniu prac w osadzeniu elementu badawczego, w porównaniu z realizacją rzeczywistego fundamentu płytowego na palach. Czynniki towarzyszące realizacji rzeczywistych obiektów wpływającymi na redukcję wpływu płyty we wzroście oporu górnych odcinków pobocznic pali mogą być za autorami prac [34,40,43] m.in.:

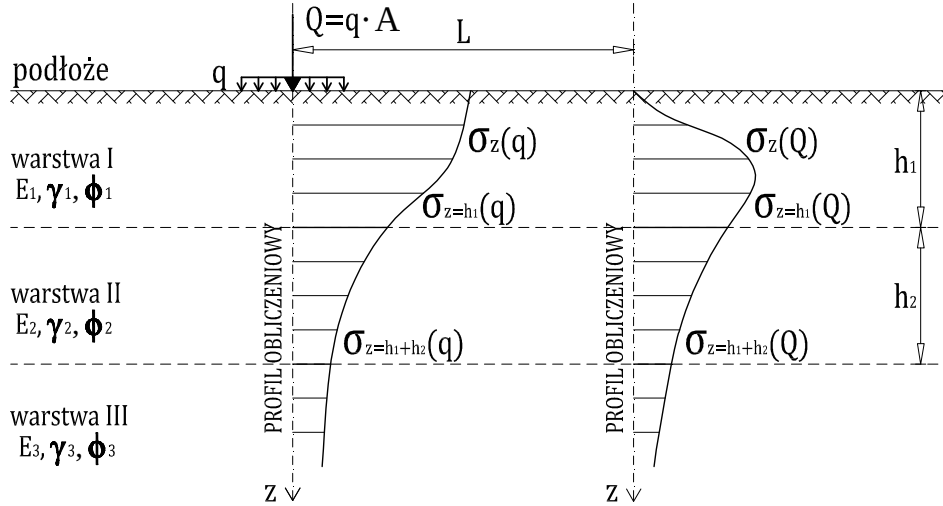
- występowanie pod płytą podłoża o znacznej ściśliwości (parametrach uniemożliwiających wykonanie posadowienia bezpośredniego), co nawet pod wpływem dodatkowego naprężenia wpływa na wartość oporu pobocznicy pala w ograniczonym zakresie dla dopuszczalnych wartości osiadań,
- odprężenie dna głębokich wykopów i jego wpływ na udział płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże,
- betonowanie płyty fundamentowej powodujące obciążenie podłoża i jego osiadanie względem pali, mogące wywołać tarcie negatywne wzdłuż górnej części ich pobocznic o wartości zależnej od grubości i ciężaru płyty,
- przemieszczanie się podłoża wraz z osiadaniem płyty z palami uniemożliwia mobilizację oporu pobocznicy na odcinku bezpośredniego oddziaływania płyty (ewentualny wzrost oporów obserwuje się poniżej tego oddziaływania).

Na podstawie badań terenowych można stwierdzić, że nośność pali fundamentów uwzględniających udział płyty w przekazywaniu obciążenia jest równa bądź większa od nośności pala pojedynczego. Analiza badań terenowych pozwala ponadto wnioskować, że czynnikami istotnymi w analizie mobilizacji oporów wokół pali jest ich usytuowanie w grupie oraz sztywność płyty przy uwzględnieniu warunków geotechnicznych podłoża. Ze względu na złożoność powyższego zagadnienie oraz próbę opracowania modelu matematycznego o cechach ogólności z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, nie uwzględniono wpływu płyty na wzrost nośności granicznej pala.

4.3. Osiadanie sprężystej płyty na podłożu uwarstwionym

Analiza osiadania sprężystej płyty na podłożu wymaga wiedzy na temat podatności ośrodka gruntowego [91]. W prowadzonych badaniach został on wyrażony sztywnością

podpór modelujących odpór gruntu pod całą powierzchnią płyty. Płytę podzielono na pola elementarne. W środku ciężkości każdego z pól usytuowano profil obliczeniowy. W każdym profilu osiadanie podłoża stanowi sumę osiadań cząstkowych generowanego przez wszystkie pola elementarne tworzące płytę. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu różnych zasięgów stref aktywnych generowanych przez każde pole.



Rys. 4.5. Rozkład naprężenia w gruncie pod płytą od obciążenia polem własnym i sąsiednim

Osiadanie elementarnego pola płyty wywołane obciążeniem własnym polem, określono z zależności (4.12), którą dla uwarstwionego podłoża uzależniono od usytuowania zasięgu strefy aktywnej naprężenia:

- dla $z_{01} \in \langle 0, h_1 \rangle \rightarrow z_{01} = z_{010}(\sigma_{z=0})$

$$s_{z_{01} \in \langle 0, h_1 \rangle} = \frac{\sigma_{z=0}}{E_1} \cdot \frac{D \cdot z_{010}}{D + z_{010}} \quad (4.18)$$

- dla $z_{01} \in \langle h_1, h_1 + h_2 \rangle \rightarrow z_{01} = h_1 + z_{011}(\sigma_{z=h_1})$

$$s_{z_{01} \in \langle h_1, h_1 + h_2 \rangle} = \frac{\sigma_{z=0}}{E_1} \cdot \frac{D \cdot h_1}{D + h_1} + \frac{\sigma_{z=h_1}}{E_2} \cdot \frac{D \cdot z_{011}}{D + z_{011}} \quad (4.19)$$

- dla $z_{01} > h_1 + h_2 \rightarrow z_{01} = h_1 + h_2 + z_{012}(\sigma_{z=h_1+h_2})$

$$s_{z_{01} > h_1 + h_2} = \frac{\sigma_{z=0}}{E_1} \cdot \frac{D \cdot h_1}{D + h_1} + \frac{\sigma_{z=h_1}}{E_2} \cdot \frac{D \cdot h_2}{D + h_2} + \frac{\sigma_{z=h_1+h_2}}{E_3} \cdot \frac{D \cdot z_{012}}{D + z_{012}} \quad (4.20)$$

Osiadanie elementarnego pola płyty wywołane obciążeniem polem sąsiednim wyznaczono ze wzoru podstawowego (4.15), który dla podłoża uwarstwionego przedstawiono w postaci:

- dla $z_{01} \in \langle 0, h_1 \rangle \rightarrow z_{01} = z_{010}(\sigma_{z=0})$

$$s_{z_{01} \in \langle 0, h_1 \rangle} = \int_0^{z_{010}} \frac{\sigma_z(Q)}{E_1} dz \rightarrow s_{z_{01} \in \langle 0, h_1 \rangle} = \frac{Q}{2\pi \cdot E_1} \left[\frac{2}{L} - \frac{3 \cdot z_{010}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{010}^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.21)$$

- dla $z_{01} \in \langle h_1, h_1 + h_2 \rangle \rightarrow z_{01} = h_1 + z_{011}(\sigma_{z=h_1})$

$$s_{z_{01} \in \langle h_1, h_1 + h_2 \rangle} = \int_0^{h_1} \frac{\sigma_z(Q)}{E_1} dz + \int_{h_1}^{h_1 + z_{011}} \frac{\sigma_z(Q)}{E_2} dz$$

$$\rightarrow s_{z_{01} \in \langle h_1, h_1 + h_2 \rangle} = \frac{Q}{2\pi \cdot E_1} \left[\frac{2}{L} - \frac{3 \cdot h_1^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{h_1^2 + L^2}^3} \right] + \frac{Q}{2\pi \cdot E_2} \left[\frac{3 \cdot h_1^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{h_1^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot (h_1 + z_{011})^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{(h_1 + z_{011})^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.22)$$

- dla $z_{01} > h_1 + h_2 \rightarrow z_{01} = h_1 + h_2 + z_{012}(\sigma_{z=h_1+h_2})$

$$s_{z_{01} > h_1 + h_2} = \int_0^{h_1} \frac{\sigma_z(Q)}{E_1} dz + \int_{h_1}^{h_1 + h_2} \frac{\sigma_z(Q)}{E_2} dz + \int_{h_1 + h_2}^{h_1 + h_2 + z_{012}} \frac{\sigma_z(Q)}{E_3} dz$$

$$\rightarrow s_{z_{01} > h_1 + h_2} = \frac{Q}{2\pi \cdot E_1} \left[\frac{2}{L} - \frac{3 \cdot h_1^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{h_1^2 + L^2}^3} \right] + \frac{Q}{2\pi \cdot E_2} \left[\frac{3 \cdot h_1^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{h_1^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot (h_1 + h_2)^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + L^2}^3} \right] + \dots$$

$$+ \frac{Q}{2\pi \cdot E_3} \left[\frac{3 \cdot (h_1 + h_2)^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot (h_1 + h_2 + z_{012})^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{(h_1 + h_2 + z_{012})^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.23)$$

Ostatecznie osiadanie podłoża pod płytą, z zachowaniem zasady superpozycji, wyraża macierzowo zależność:

$$\{s_R\} = [WRR] \cdot \{R_R\} \quad (4.24)$$

W związku z powyższym płyta spoczywa na podporach modelujących uwarstwione podłoże, o sztywnościach wyrażonych w postaci:

$$\{k_R\} = \{R_R / s_R\} \quad (4.25)$$

4.4. Osiadanie pala pojedynczego

Jedną z metod projektowania pali podaną w Eurokodzie 7 [112] bazuje na wynikach próbnych obciążeń statycznych. Uzyskana na ich podstawie relacja obciążenie-osiadanie pala w głowicy, odzwierciedla faktyczne zachowanie pala w danych warunkach gruntowych. Możliwości techniczne często uniemożliwiają wykonanie próbnego obciążenia pala w pełnym zakresie, tzn. do jego nośności

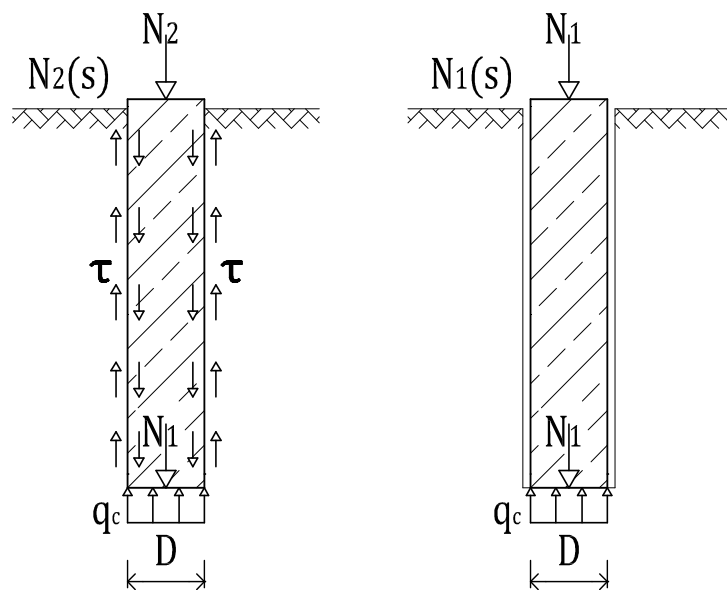
granicznej. Wiedza natomiast na temat relacji obciążenie-osiadanie pala w pełnym zakresie, przy analizie fundamentów na palach służących ograniczeniu bądź wyrównaniu osiadania, jest istotnym czynnikiem wpływającym na ich rozstaw, usytuowanie na planie płyty oraz założony współczynnik bezpieczeństwa.

W opracowanym modelu matematycznym wykorzystano metodę Meyera-Kowalowa aproksymującą wyniki próbnego obciążenia pala do krzywej, we wspomnianej już postaci:

$$s(N_2) = \frac{C \cdot N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_2}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (4.17^*)$$

Charakteryzujące ją parametry wyznaczono metodami statystycznymi opracowanymi przez Szmechela [92]. Wykorzystana metoda ekstrapoluje relację obciążenie-osiadanie w pełnym zakresie obciążenia oraz określa nośność graniczną pala, rozumianą jako asymptotę pionową omawianej krzywej. Ponadto umożliwia wyznaczenie mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala. Wiedza na temat rozdziału obciążenia przekazywanego przez pobocznice i podstawę jest istotna podczas analizy grup palowych i fundamentów płytowo-palowych. Rozdział ten w istotny sposób wpływa na wzajemną interakcję oraz stan naprężenia w ośrodku gruntowym.

Mobilizację oporów wokół pala wyznaczono bazując na dwukrotnym wykorzystaniu krzywej MK [66,68,70], charakteryzującym relację obciążenie-osiadanie jednego pala w dwóch odmiennych stanach, tj. dla podstawy i pobocznic. Pierwszy stan jest typowy dla próbnego obciążenia statycznego pala, uwzględnia opór pobocznic i podstawy, drugi natomiast uwzględnia jedynie opór podstawy (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Schemat analizowanych stanów oporu wokół pojedynczego pala

Parametry krzywej stanu pierwszego, wyznaczono metodą najmniejszej sumy kwadratów odchylek [92]. Natomiast parametry krzywej stanu drugiego, bez udziału pobocznicy, w postaci:

$$s(N_1) = \frac{C_1 \cdot N_{gr1}}{\kappa_1} \left[\left(1 - \frac{N_1}{N_{gr1}} \right)^{-\kappa_1} - 1 \right] \quad (4.26)$$

przyjęto na podstawie badań Meyera, dla $E_q = 4q_{c,s}$ [59]:

$$N_{gr1} = \frac{1}{8\pi} \cdot E_q \cdot D^2 \cdot \left(\frac{hp}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.27)$$

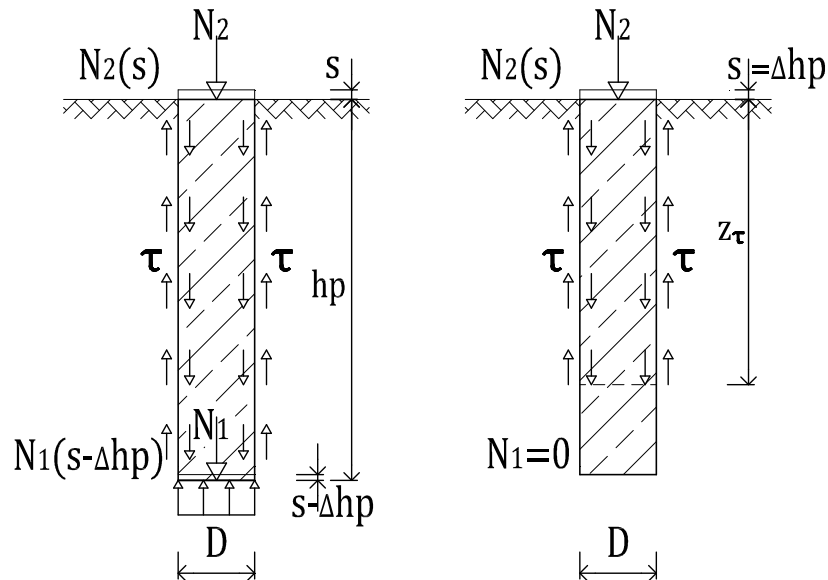
$$C_1 = \frac{4}{3\pi \cdot E_q \cdot D} \quad (4.28)$$

$$\kappa_1 = \frac{2}{3} \cdot \kappa \quad (4.29)$$

W konsekwencji dysponując parametrami obu krzywych, wyznaczono mobilizację oporu wzdłuż pobocznic według zależności:

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (4.30)$$

Model matematyczny uwzględnia także ściśliwość pala w analizie mobilizacji oporu pobocznic i podstawy, co przedstawiono w postaci warunkowej (rys. 4.7):



Rys. 4.7. Schemat mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala

- jeżeli osiadanie głowicy wywołane siłą do niej przyłożoną jest większe od ściśliwości pala, to w przekazywaniu obciążenia na podłoże bierze udział pobocznicza i podstawa, a zatem:

$$\text{dla } s > \Delta hp \quad \rightarrow \quad N_2 = N_1 + \pi \cdot D \cdot hp \cdot \tau \quad \rightarrow \quad N_1(s - \Delta hp) \neq 0$$

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s - \Delta hp) \quad (4.31)$$

$$\Delta hp = \frac{4}{\pi \cdot D^2 \cdot E_b} \left(N_2 \cdot hp - \frac{1}{2} \pi \cdot D \cdot \tau \cdot hp^2 \right) \quad (4.32)$$

- jeżeli natomiast osiadanie głowicy wywołane siłą do niej przyłożoną jest mniejsze bądź równe ściśliwości pala, to w przekazywaniu obciążenia na podłoże bierze udział jedynie pobocznica, co wyrażono w postaci:

$$\text{dla } s \leq \Delta hp \quad \rightarrow \quad N_2 = \pi \cdot D \cdot z_\tau \cdot \tau \quad \rightarrow \quad N_1(s - \Delta hp) = 0$$

$$T(s) = N_2(s) \quad (4.33)$$

$$\Delta hp = \frac{4}{\pi \cdot D^2 \cdot E_b} \left(N_2 \cdot z_\tau - \frac{1}{2} \pi \cdot D \cdot \tau \cdot z_\tau^2 \right), \quad z_\tau = \frac{s \cdot \pi \cdot D^2 \cdot E_b}{2 \cdot N_2} \quad (4.34)$$

Ostatnie badania umożliwiają także estymację parametrów krzywej MK na podstawie parametrów geotechnicznych podłoża. Umieszczone w pracy [59] zależności wykorzystano także do określenia zmienności parametrów krzywej MK, uzyskanych na podstawie próbnego obciążenia statycznego, dla innej geometrii pala w jednakowych warunkach gruntowych:

$$N_{gr} = \frac{D}{12\pi \cdot C} \quad (4.35)$$

$$C_t = \frac{7.5}{\pi \cdot E_t \cdot hp} \rightarrow C = \frac{C_1 \cdot C_t}{C_1 + C_t} \quad (4.36)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{C_1}{C}} - 1 \quad (4.37)$$

Opracowano program obliczeniowy rozwiązujący powyższe zagadnienie wyznaczające krzywą obciążenie-osiadanie pojedynczego pala, na podstawie próbnego obciążenia statycznego w ograniczonym zakresie, do jego nośności granicznej. W sposób iteracyjny określono mobilizację oporu pobocznic i podstawy ściśliwego pala.

4.5. Osiadanie pali w grupie zwieńczonych sprężystą płytą

Analiza osiadania grup palowych wymaga wiedzy na temat stanu naprężenia generowanego przez poszczególne pale i ich wzajemnego wpływu na siebie. Nachodzenie się stref naprężenia wpływa na nierównomierne osiadanie pali w grupie, dla jednakowej siły przyłożonej w ich głowicach. Powyższe zagadnienie komplikuje

dotatkowo sprężystość płyty zwieńczającej pale. Wzrost sztywności płyty wpływa na wzrost równomierności osiadania poszczególnych pali, różnicując przekazywane przez nie obciążenie. W związku z powyższym analiza osiadania pali w grupie powinna uwzględniać sztywność zwieńczającej ich płyty. Czynniki te odgrywa także istotną rolę podczas obliczeń statycznych i wymiarowania płyty.

W analizie osiadania poszczególnych pali w grupie, wykorzystano nieliniową charakterystykę obciążenie-osiadanie pojedynczego pala pod obciążeniem przyłożonym w jego głowicy. Interakcję pal-podłoże-pal wyznaczono natomiast bazując na teorii Boussinesqa, z uwzględnieniem zasięgów stref aktywnych naprężenia Meyera.

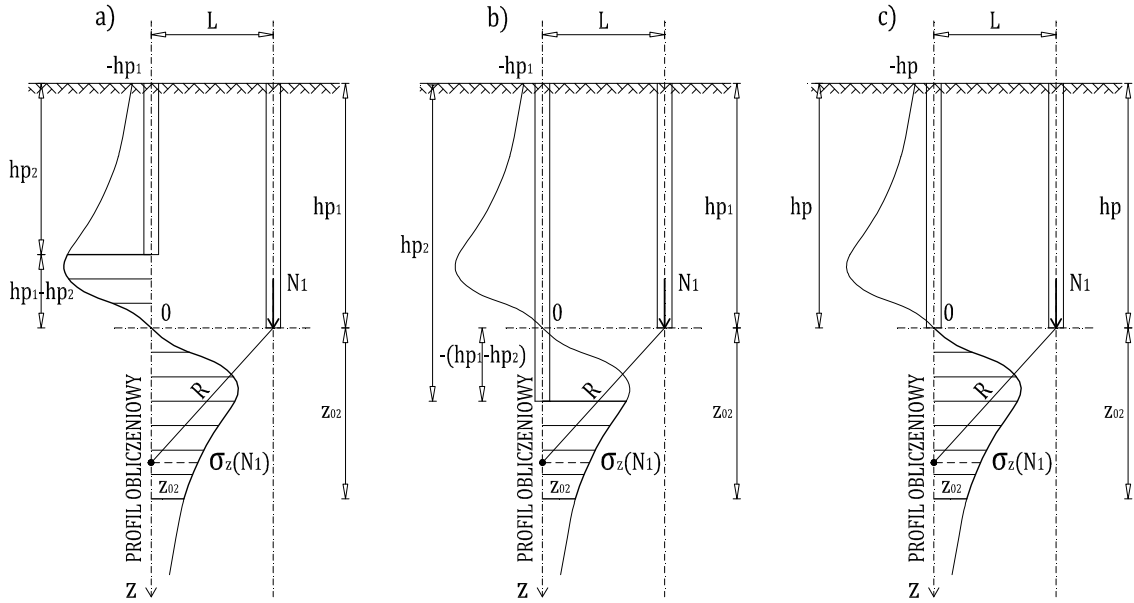
Analiza osiadania sprężystej płyty na palach opiera się o wiedzę na temat sztywności podpór modelujących nierównomierne osiadanie pali w grupie. W tym celu w środku każdego pala usytuowano profil obliczeniowy. Osiadanie każdego pala obliczono jako sumę osiadania głównego wynikającego z obciążenia przyłożonego w jego głowicy oraz osiadań cząstkowych wywołanych stanem naprężenia poniżej podstawy pala od pozostałych pali tworzących grupę. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu różnych zasięgów stref aktywnych generowanych przez każdego pala, różnicując naprężenia w gruncie na wywołane oporem wzdłuż pobocznicy i pod podstawami pali.

Osiadanie pala wywołane obciążeniem przyłożonym w głowicy wyznaczono na podstawie krzywej MK (4.17). Osiadanie pala wywołane siłą generowaną w podstawie pala sąsiedniego (rys. 4.8) ma charakter warunkowy, tzn. występuje wówczas, gdy różnica długości między palami jest mniejsza od zasięgu strefy aktywnej naprężenia pala:

- dla $|hp_1 - hp_2| \geq z_{02} \rightarrow s = 0$

- dla $|hp_1 - hp_2| < z_{02}$

$$s = \int_{hp_2 - hp_1}^{z_{02}} \frac{\sigma_z(N_1)}{E_q} dz \rightarrow s = \frac{N_1}{2\pi \cdot E_q} \left[\frac{3 \cdot (hp_2 - hp_1)^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{(hp_2 - hp_1)^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot z_{02}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{02}^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.38)$$

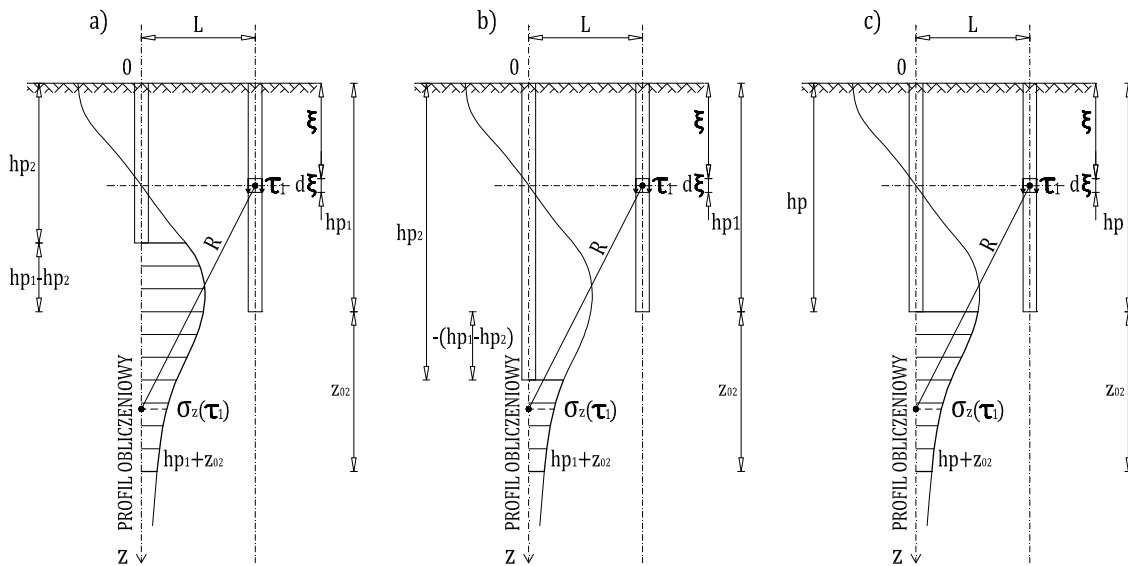


Rys. 4.8. Rozkład naprężenia w gruncie w osi pala od siły w podstawie pala sąsiedniego

Natomiast osiadanie pala wywołane naprężeniami stycznymi wzdłuż pobocznicy pala sąsiedniego (rys. 4.9), wyznaczamy ze wzoru:

$$s = \int_{hp_2}^{hp_1+z_{02}} \frac{\sigma_z(\tau_1)}{E_q} dz \quad (4.39a)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow s = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau_1}{2\pi \cdot E_q} \cdot \left[\ln \left| \frac{z_{02} + \sqrt{z_{02}^2 + L^2}}{z_{02} + hp_1 + \sqrt{(z_{02} + hp_1)^2 + L^2}} \right| + \frac{z_{02} + hp_1}{3 \cdot \sqrt{(z_{02} + hp_1)^2 + L^2}} - \dots \right. \\ \left. - \frac{z_{02}}{3 \cdot \sqrt{z_{02}^2 + L^2}} + \ln \left| \frac{\sqrt{hp_2^2 + L^2} + hp_2}{hp_2 - hp_1 + \sqrt{(hp_2 - hp_1)^2 + L^2}} \right| + \dots \right. \\ \left. + \frac{hp_2 - hp_1}{3 \cdot \sqrt{(hp_2 - hp_1)^2 + L^2}} - \frac{hp_2}{3 \cdot \sqrt{hp_2^2 + L^2}} \right] \quad (4.39b) \end{aligned}$$



Ostatecznie osiadanie pali w grupie, z zachowaniem zasady superpozycji, wyrażają macierzowo zależności:

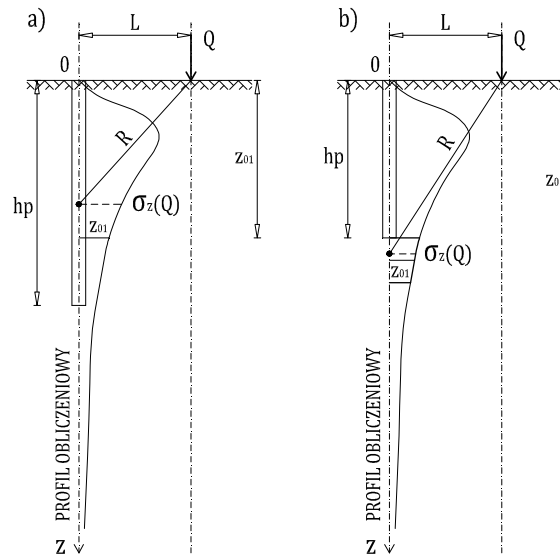
$$\begin{aligned} \{s_p\} &= \{s_w\} + \{s_s\} \\ \rightarrow \quad \{s_w\} &= [WN_2P] \cdot \{N_2\} \\ \rightarrow \quad \{s_s\} &= \begin{bmatrix} [WN_1P] & [W\tau P] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \{N_1\} \\ \{\tau\} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.40a)$$

w grupie. Interakcje te umożliwiają analizę współpracy fundamentu płytowo-palowego z podłożem.

Osiadanie pala wywołane obciążeniem polem elementarnym płyty fundamentowej występuje w sytuacji, gdy długość pala jest mniejsza od zasięgu strefy aktywnej płyty (rys. 4.10) i jest wyrażone zależnością:

- dla $hp \geq z_{01} \rightarrow s = 0$
- dla $hp < z_{01}$

$$s = \int_{hp}^{z_{01}} \frac{\sigma_z(Q)}{E_q} dz \rightarrow s = \frac{Q}{2\pi \cdot E_q} \left[\frac{3 \cdot hp^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{hp^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot z_{01}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{01}^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.42)$$

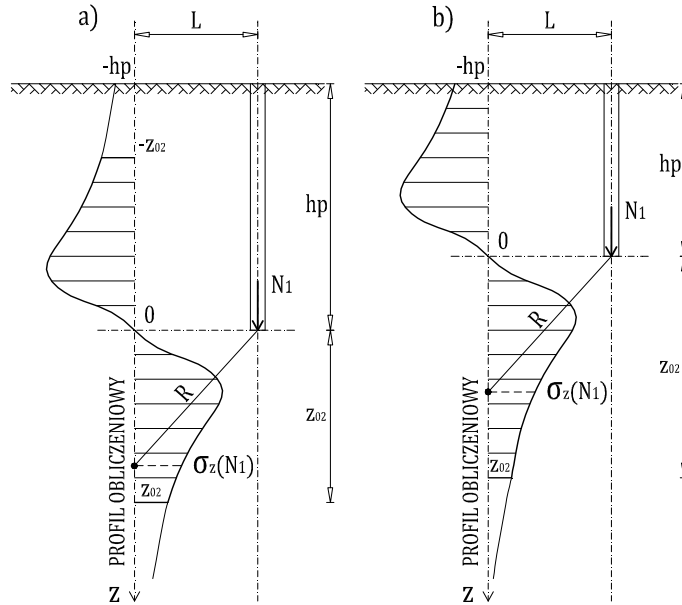


Rys. 4.10. Rozkład naprężenia w osi pala od obciążenia polem elementarnym płyty

Osiadanie elementarnego pola płyty wywołane siłą generowaną w podstawie pala (rys. 4.11) ma miejsce, gdy zasięg strefy aktywnej pala jest większy od jego długości, a zatem:

- dla $hp \geq z_{02} \rightarrow s = 0$
- dla $hp < z_{02}$

$$s = \int_{-hp}^{z_{02}} \frac{\sigma_z(N_1)}{E_{sr}} dz \rightarrow s = \frac{N_1}{2\pi \cdot E_{sr}} \left[\frac{3 \cdot hp^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{hp^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot z_{02}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{02}^2 + L^2}^3} \right] \quad (4.43)$$



Rys. 4.11. Rozkład naprężenia w gruncie pod płytą od siły w podstawie pala

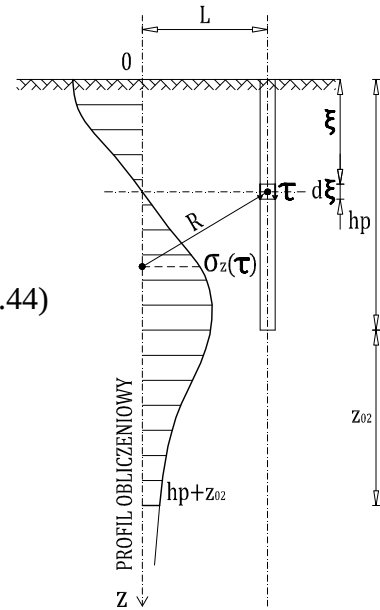
Osiadanie elementarnego pola płyty wywołane naprężeniami stycznymi wzdłuż poboczniczy pala (rys. 4.12) określa wzór:

$$s = \int_0^{hp+z_{02}} \frac{\sigma_z(\tau)}{E_{sr}} dz$$

$$\rightarrow s = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi \cdot E_{sr}} \cdot \left[\ln \left| \frac{z_{02} + \sqrt{z_{02}^2 + L^2}}{z_{02} + hp + \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + L^2}} \right| + \dots \right. \quad (4.44)$$

$$+ \frac{z_{02} + hp}{3 \cdot \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + L^2}} - \frac{z_{02}}{3 \cdot \sqrt{z_{02}^2 + L^2}} + \dots$$

$$\left. + \ln \left| \frac{L}{\sqrt{hp^2 + L^2} - hp} \right| - \frac{hp}{3 \cdot \sqrt{hp^2 + L^2}} \right]$$



Rys. 4.12. Rozkład naprężenia w gruncie pod płytą od naprężenia stycznego wzdłuż poboczniczy pala

Dysponując kompletem wzajemnych oddziaływań sprężystej płyty na podłożu i palach, wyznaczono osiadanie podłoża i pali, z zachowaniem zasady superpozycji, według zależności:

$$\begin{Bmatrix} \{s_R\} \\ \{s_P\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [WRR] & [0] & [WN_1R] & [W\tau R] \\ [WRP] & [WN_2P] & [WN_1P] & [W\tau P] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{R_R\} \\ \{N_2\} \\ \{N_1\} \\ \{\tau\} \end{Bmatrix} \quad (4.45)$$

W omawianym modelu matematycznym płyta spoczywa na podporach sprężystych modelujących uwarstwione podłoże i pale, o sztywnościach podpór wyrażonych w postaci:

$$\begin{Bmatrix} \{k_R\} \\ \{k_P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{R_R/s_R\} \\ \{R_P/s_P\} \end{Bmatrix} \quad (4.46)$$

4.7. Rozwiązanie modelu matematycznego współpracy płyty z podłożem i grupą pali

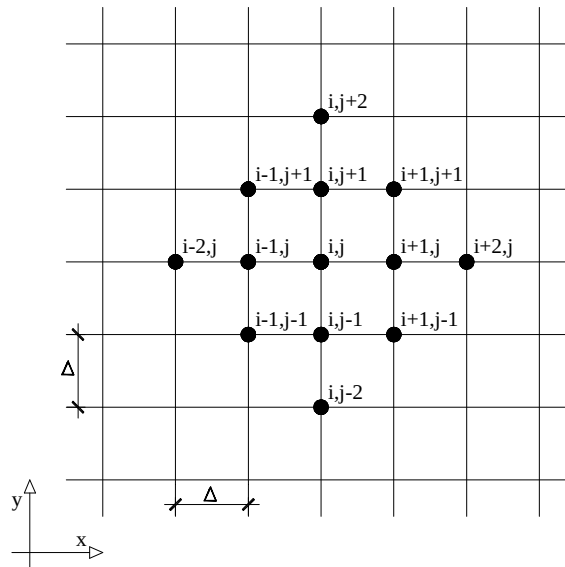
Proponowana metoda polega na wyznaczeniu takiego rozkładu naprężenia kontaktowego płyty, pali z podłożem, aby ugięcia płyty obliczone na podstawie równania różniczkowego:

$$\frac{\partial^4 s(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 s(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 s(x,y)}{\partial y^4} = \frac{q_0(x,y)}{D_b(x,y)} - \frac{k(x,y)}{D_b(x,y)} \cdot s(x,y) \quad (4.1*)$$

gdzie:

$$D_b = \frac{E_b \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4.47)$$

i osiadanie podłoża z palami pod płytą były z założoną dokładnością jednakowe. Powyższe równanie rozwiązano stosując metodę różnic skończonych.

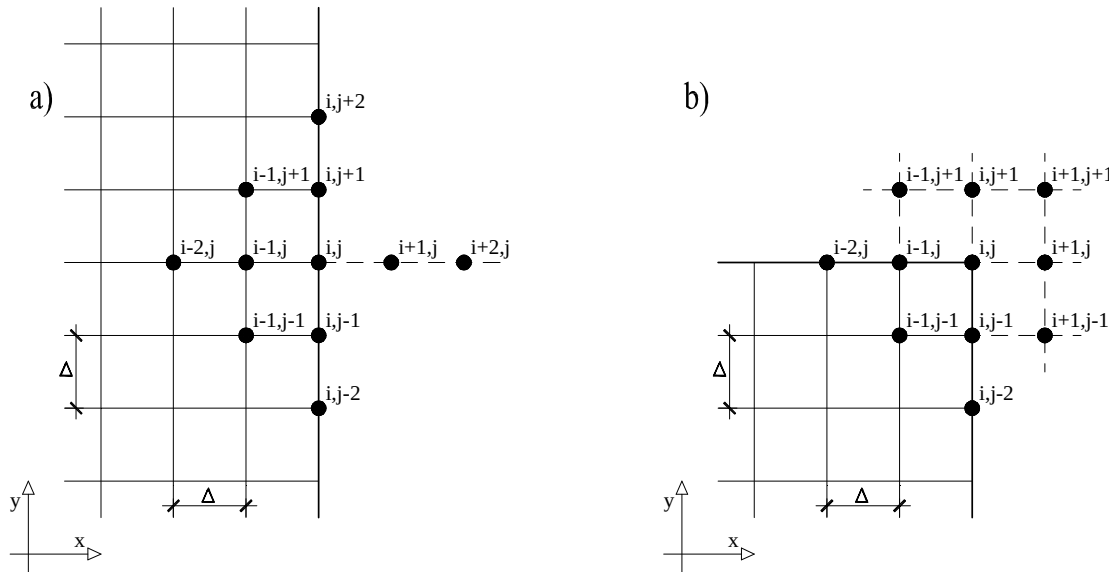


Rys. 4.13. Punkt wewnętrzny siatki podziału płyty

Metoda opiera się na stworzeniu i rozwiązaniu układu równań różnicowych, które w postaci podstawowej dla równomiernego podziału $\Delta x = \Delta y = \Delta$ (rys. 4.13) można wyrazić w postaci:

$$\left(20 + \frac{\Delta^4 \cdot k_{i,j}}{D_b}\right) s_{i,j} - 8(s_{i-1,j} + s_{i,j-1} + s_{i+1,j} + s_{i,j+1}) + 2(s_{i-1,j-1} + s_{i-1,j+1} + s_{i+1,j-1} + s_{i+1,j+1}) + s_{i-2,j} + s_{i,j-2} + s_{i,j+2} + s_{i+2,j} = \frac{\Delta^4 \cdot q_0}{D_b} \quad (4.48)$$

Natomiast równania różnicowe przy uwzględnieniu warunków brzegowych płyty swobodnej tzn. wzdłuż krawędzi i w narożach (rys. 4.14), wyrażają zależności (4.49) do (4.51).



Rys. 4.14. Punkt krawędziowy i narożny siatki podziału płyty

- krawędź płyty

$$s_{i+1,j} = -s_{i-1,j} + 2(1+\nu)s_{i,j} - \nu(s_{i,j-1} + s_{i,j+1}) \quad (4.49)$$

$$s_{i+2,j} = s_{i-2,j} - 4(3-\nu)s_{i-1,j} + 6(2+2\nu-\nu^2)s_{i,j} + 2(2-\nu)(s_{i-1,j-1} + s_{i-1,j+1}) - 4(1+2\nu-\nu^2)(s_{i,j-1} + s_{i,j+1}) + \nu(2-\nu)(s_{i,j-2} + s_{i,j+2}) \quad (4.50)$$

- naroże płyty

$$s_{i+1,j+1} = -3s_{i-1,j-1} + 2(1+\nu)(s_{i-1,j} + s_{i,j-1}) - \nu(s_{i-2,j} + 2s_{i,j} + s_{i,j-2}) \quad (4.51)$$

Układ równań różnicowych rozwiązywany jest ostatecznie dla sztywności podpór modelujących uwarstwiony ośrodek gruntowy i osadzonych w nim pali, przy uwzględnieniu wzajemnej interakcji. Uzyskano je w oparciu o zasadę superpozycji i analizę stanu naprężenia w podłożu. W tym celu płytę fundamentową podzielono na pola elementarne. W środku ciężkości każdego z pól dyskretyzowanej płyty i w osiach pali, usytuowano profile obliczeniowe. Wyznaczano w nich osiadanie pól i pali jako

sumę osiadań cząstkowych, wywołanych każdorazowo obciążeniem własnym oraz pozostałymi elementami fundamentu przekazującymi obciążenie na podłoże.

Tworząc macierz współczynników wpływu pól elementarnych płyty i pali, opis matematyczny osiadania podłoża i pali pod płytą przedstawiono w postaci:

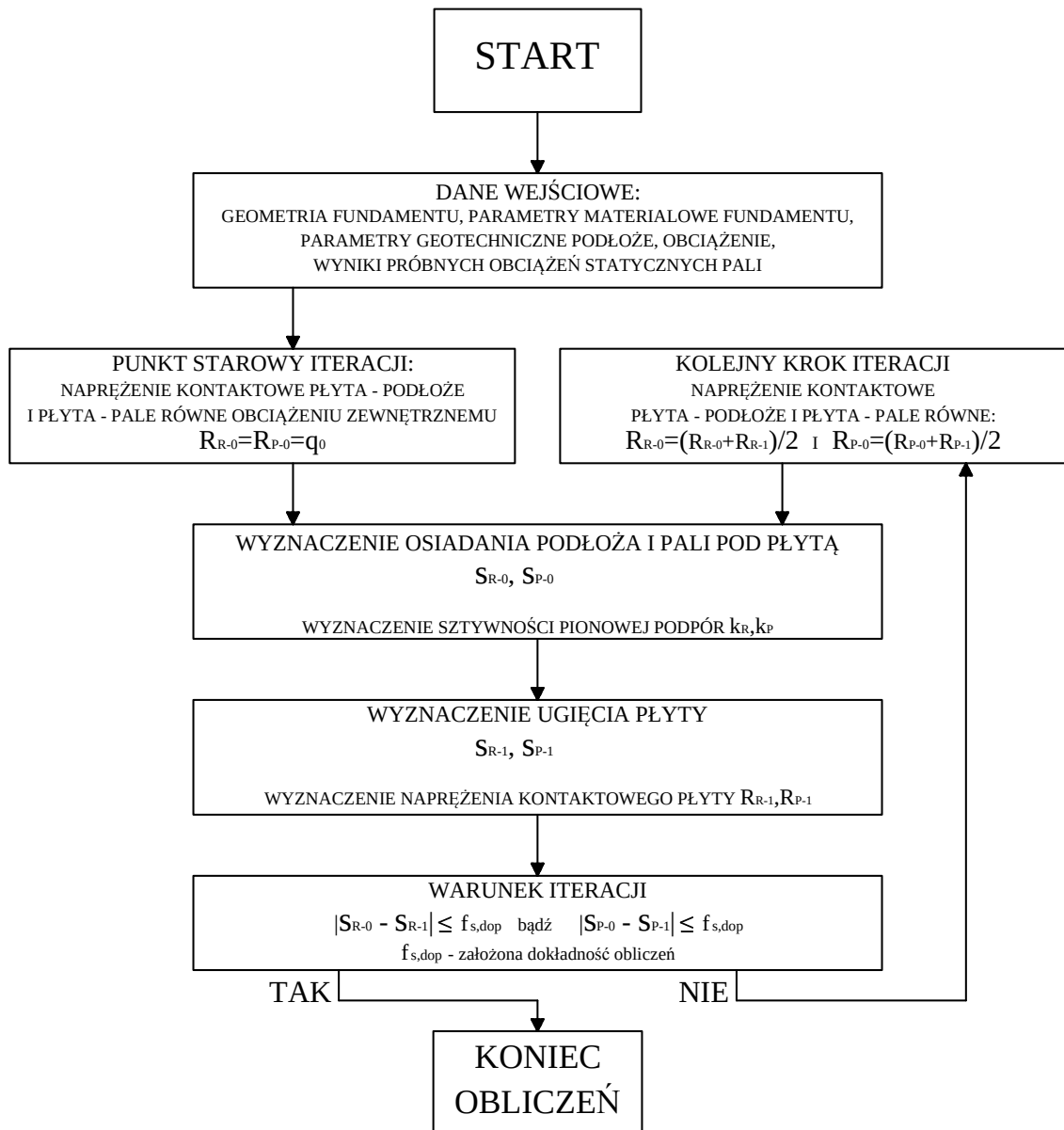
$$\begin{Bmatrix} \{s_R\} \\ \{s_P\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [WRR] & [0] & [WN_1R] & [WzR] \\ [WRP] & [WN_2P] & [WN_1P] & [WzP] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{R_R\} \\ \{N_2\} \\ \{N_1\} \\ \{\tau\} \end{Bmatrix} \quad (4.45^*)$$

Tak opracowany model matematyczny cechuje się maksymalnymi naprężeniami kontaktowymi na krawędziach płyty. Literatura przedmiotu i badania terenowe wykazują, że naprężenia krawędziowe nie mają dowolnej wartości, ściśle zależą bowiem od parametrów wytrzymałościowych podłoża. Przeprowadzone w pracy [11] badania dla sztywnej płyty fundamentowej potwierdzają, że dla praktycznych obliczeń wartość naprężenia krawędziowego ma pomijalny wpływ i nie wymaga wprowadzania dodatkowych warunków dla stanów granicznych podłoża. Założono, że grunt jest w stanie przenieść obliczone naprężenia w poziomie posadowienia.

Opracowany model matematyczny umożliwia analizę geotechnicznych warunków posadowienia fundamentów płytowych na palach, z uwzględnieniem faktycznej współpracy pala z gruntem i sprężystych własności płyty. Uwzględniono ponadto zasięgi stref aktywnych oraz mobilizację oporów pobocznic i podstaw pali wywołanych osiadaniem. Model matematyczny analizuje rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale, wpływ pali na redukcję i wyrównanie osiadania płyty dla zadanych warunków geotechnicznych, z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływanie układu fundament-podłoże.

Omawiany model matematyczny zdaniem autora, przy przyjętych uproszczeniach i założeniach, spełnia opracowane przez ISSMGE wymagania dotyczące analizy fundamentów płytowo-palowych [9].

Opracowany program obliczeniowy rozwiązuje iteracyjnie powyższe zagadnienie do uzyskania założonej dokładności. Ogólny schemat obliczeniowy przedstawiono na rysunku 4.15.



Rys. 4.15. Schemat obliczeń płyty na uwarstwionym podłożu i palach

5. WERYFIKACJA MODELU MATEMATYCZNEGO

Weryfikację modelu matematycznego przeprowadzono na podstawie wyników badań terenowych, przeprowadzonych przez zespół Tejchman, Gwizdała, Dyka, Słabek [17,90,93,95]. Badania obejmowały geodezyjny pomiar osiadań fundamentów na palach, a ich celem była analiza faktycznych przemieszczeń konstrukcji.

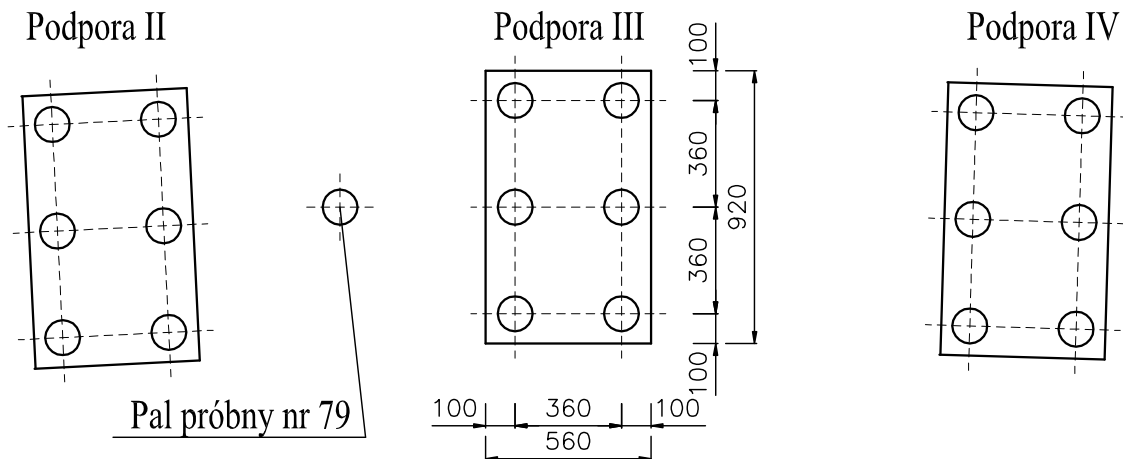
Do weryfikacji omawianego modelu wykorzystano trzy podpory estakady drogowej, które ze względu na warunki geotechniczne zaprojektowane zostały jako fundamenty palowe. Wykorzystano także wyniki osiadań dwóch obiektów, które od etapu projektowego do realizacji wykonano z uwzględnieniem współpracy płyty fundamentowej na palach z podłożem gruntowym.

Projektowanie i realizacja fundamentów płytowo-palowych nie jest powszechnie spotykane na terenie Polski. Jednym z powodów może być brak jednoznacznych wytycznych projektowych. Obecnie obowiązująca norma [112] stwierdza, że „nie należy (jej) stosować bezpośrednio do projektowania pali, których przeznaczeniem jest ograniczenie osiadań, jak ma to miejsce w fundamentach płytowo-palowych”. Podczas realizacji posadowień uwzględniających płytę fundamentową w przekazywaniu obciążenia na pale i podłoże gruntowe należy szczególną uwagę poświęcić przygotowaniu podłoża pod płytę. Aby płyta fundamentowa od pierwszych stopni obciążenia brała udział w jego przekazywaniu na podłoże, należy prace ziemne prowadzić w sposób nierozluźniający podłoża, zaleca się także poprawę jego parametrów np. poprzez dogęszczenie bądź wymianę [90]. Powyższe zalecenia wykonawcze zostały spełnione podczas budowy części obiektów wchodzących w skład Podczyszczalni Ścieków na terenie Tyskich Browarów Książących w Tychach. Podczas realizacji inwestycji wykonywano próby wodne zbiorników mające na celu kontrolę osiadań fundamentów, z ciągłym monitoringiem ich przemieszczeń.

Rezultatem badań terenowych są pomierzone wartości osiadań przy danym stopniu obciążenia. Uzyskane wyniki pomiarów, będące skutkiem procesów zachodzących pod płytą fundamentu na palach, umożliwiły przeprowadzenie weryfikacji opracowanego modelu matematycznego. Jak wspomniano badania terenowe zostały szeroko omówione przez autorów, w niniejszej pracy przedstawiono jedynie podstawowe dane konieczne do przeprowadzenia weryfikacji prezentowanego modelu matematycznego.

5.1. Estakada drogowa w ciągu ul. Elbląskiej w Gdańsku - fundament palowy

Obliczenie osiadań fundamentów przeprowadzono dla trzech podpór trzynastoprzęsłowej estakady drogowej, tj. podpora II, III i IV. Dysponujemy dla nich uśrednionymi profilami geotechnicznymi oraz wynikami próbnego statycznego obciążenia pała, wykonanego w bezpośredniej bliskości z analizowanymi podporami (rys. 5.1).



Rys. 5.1. Schemat podpór i pała próbnego estakady drogowej [17]

Każdy fundament składa się z 6 wielkośrednicowych pali o średnicy $\phi 1180$ i długości odpowiednio 12 m, 10 m i 11 m. Rozstaw między palami jest stały i wynosi 3.6 m. Pale zwieńczone są żelbetowym oczepem o wymiarach 9.2x5.6x1.5 m.

Podpory estakady wykonano na podłożu z utworów deltowych wieku holocenińskiego. Głównie z piasków drobnych, które przykrywa warstwa torfów i namulów o miąższości do 1.6 m, grunty te mogą występować także głębiej. Powierzchnię terenu, stanowiącą grunty organiczne, pokrywa nasyp o miąższości do 4 m. Woda gruntowa występuje w formie zwierciadła napiętego pod warstwą gruntów mało przepuszczalnych oraz jako zwierciadło swobodne w gruntach niespoistych.

Poniżej w tabelach 5.1, 5.2 i 5.3 przedstawiono uśrednione profile warstw geotechnicznych w rejonie pała próbnego i analizowanych podpór.

Tabl. 5.1. Uśredniony profil geotechniczny - pal próbny nr 79 [93]

Nr warstwy	Rzędna spągu	Rodzaj gruntu	Mięszość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Stan gruntu I_L/I_D	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]	Moduł edom. M_0 [MPa]
	- 0.5	nN	1.8	18	-	5.0	-
Ia	- 1.2	T	0.7	18	-	0.17	0.3
IIb	- 4.4	Pd	3.2	20	0.49	46.5	63
IIc	- 6.6	Pd	2.2	20	0.78	72.5	98
Ib	- 6.9	Nm	0.3	18	0.45	0.62	1.1
IIc	-	Pd	-	20	0.78	72.5	98

Tabl. 5.2. Uśredniony profil geotechniczny - podpora estakady II i III [93]

Nr warstwy	Rzędna spągu	Rodzaj gruntu	Mięszość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Stan gruntu I_L/I_D	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]	Moduł edom. M_0 [MPa]
	- 0.5	nN	-	18	-	5.0	-
Ia	- 1.2	T	0.7	18	-	0.17	0.3
IIb	- 5.1	Pd	3.9	20	0.49	46.5	63
IIc	- 6.6	Pd	1.5	20	0.78	72.5	98
Ib	- 7.5	Nm	0.9	18	0.45	0.62	1.1
IIc	-	Pd	-	20	0.78	72.5	98

Tabl. 5.3. Uśredniony profil geotechniczny - podpora estakady IV [93]

Nr warstwy	Rzędna spągu	Rodzaj gruntu	Mięszość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Stan gruntu I_L/I_D	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]	Moduł edom. M_0 [MPa]
	- 0.5	nN	-	18	-	5.0	-
Ib	- 2.1	Nm	1.6	18	0.45	0.62	1.1
IIb	- 5.5	Pd	3.4	20	0.49	46.5	63
IIc	-	Pd	-	20	0.78	72.5	98

Próbne obciążenie statyczne wykonano dla pala usytuowanego pomiędzy podporami II i III, dla następujących danych:

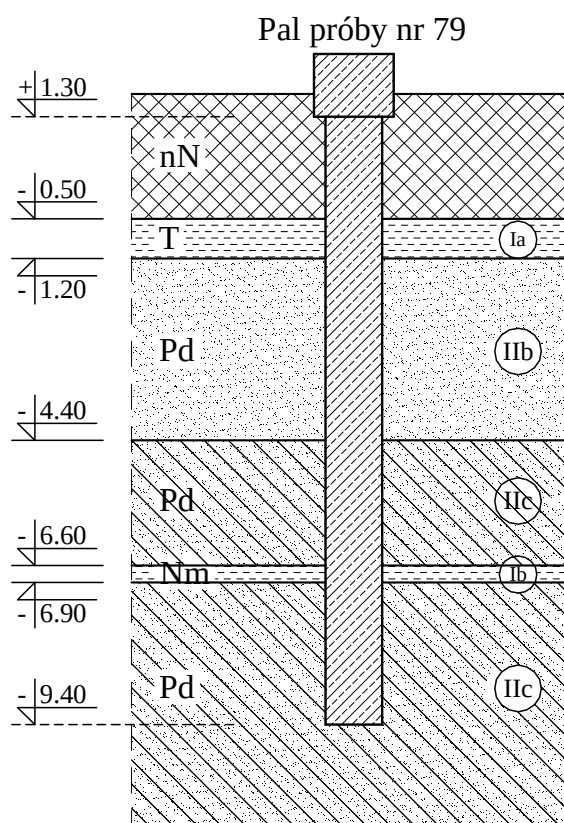
długość pala $h_p = 10.7$ m

średnica pala $D = 1.18$ m

Rzędna głowicy pala $+1.30$ m n.p.m.

Rzędna podstawy pala -9.40 m n.p.m.

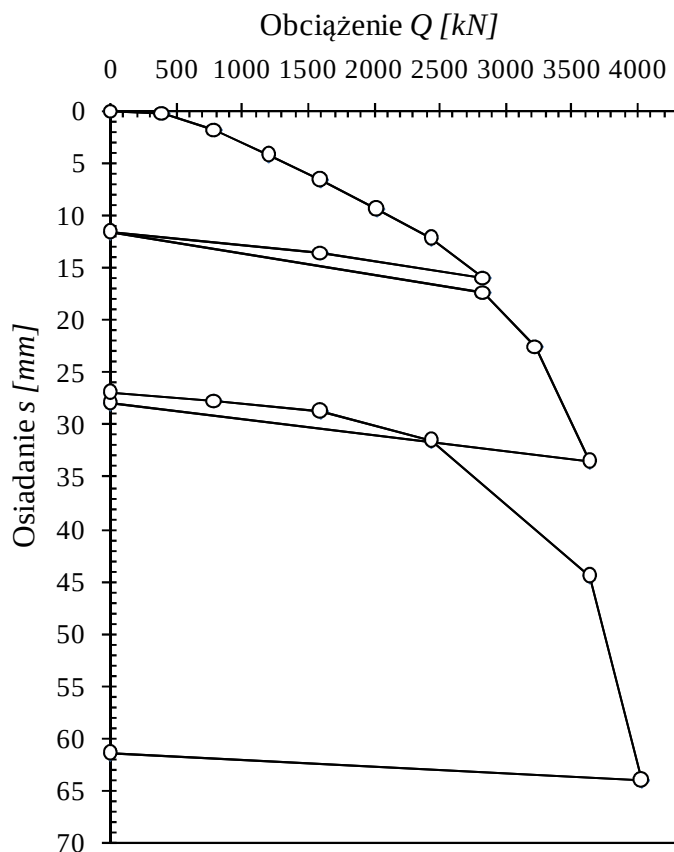
Wyniki próbnego obciążenia pala nr 79 przedstawiono na rysunku 5.3.



Rys. 5.2. Profil geotechniczny - pal próbny nr 79 [93]

Próbne obciążenie pala nr 79

$h_p = 10.7$ m, $D = 1.18$ m



Rys. 5.3. Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala estakady drogowej w ciągu ul. Elbląskiej [93]

Parametry krzywej Meyera-Kowalowa wyznaczono metodami statystycznymi, na podstawie wyników próbnego obciążenia pala. Uzyskana charakterystyka pracy pala w zadanych warunkach gruntowych pozwoliła oszacować parametry krzywej MK, dla pali o długościach odpowiadających poszczególnym podporom estakady, uzyskując odpowiednio:

Tabl. 5.4. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pala próbnego oraz pali poszczególnych podpór

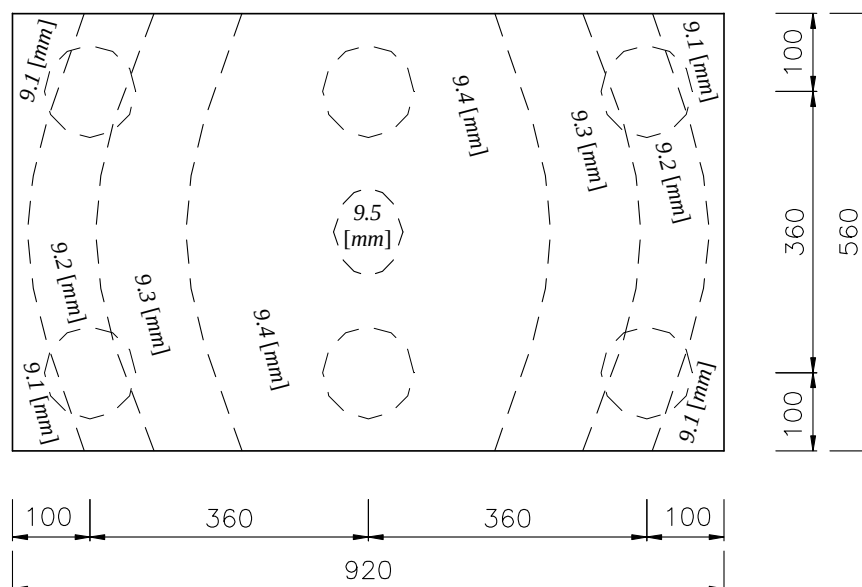
Parametry krzywej Meyera-Kowalowa	Pal próbny $h_p = 10.7$ m	Podpora II $h_p = 12.0$ m	Podpora III $h_p = 10.0$ m	Podpora IV $h_p = 11.0$ m
κ [-]	3.13	3.37	2.51	2.95
$C \times 10^{-3}$ [mm/kN]	1.90	1.81	2.15	1.97
N_{gr} [kN]	6 924	7 252	6 132	6 691

Na podporach estakady założono repery pomiarowe, wykonując pomiary osiadań z postępowaniem robót i po ich zakończeniu, od 05.1995 do 12.1998. W opisie badań terenowych brak informacji na temat dokładnej lokalizacji reperów na fundamencie.

Poniżej przedstawiono charakterystykę poszczególnych podpór z wynikami obliczeń według opracowanego modelu matematycznego:

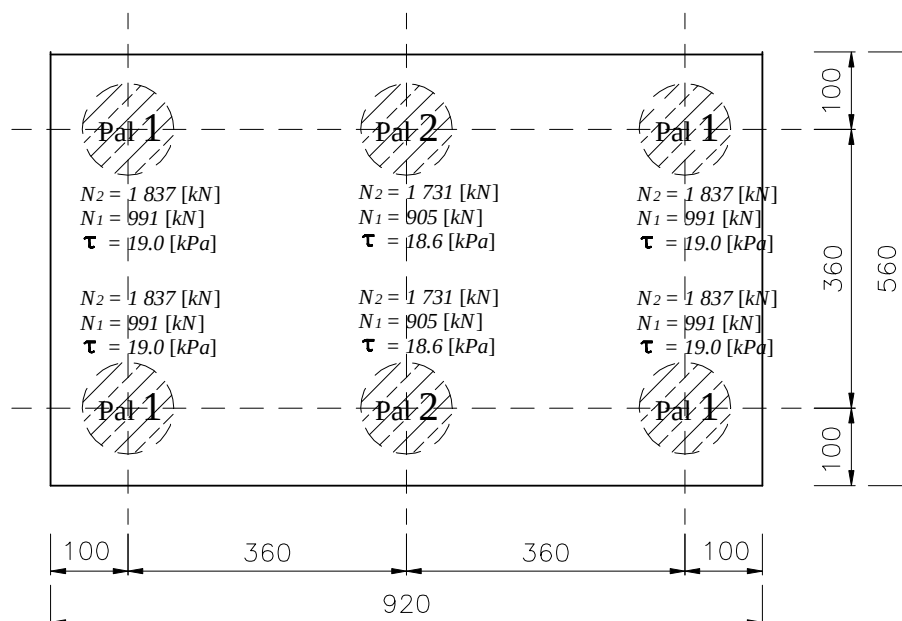
- Podpora II
 - obciążenie charakterystyczne podpory: 11 264 kN (218.6 kPa)
 - rzędna głowicy pala: + 1.10 m n.p.m.
 - rzędna podstawy pala: - 10.90 m n.p.m.
 - długość pala: $h_p = 12$ m
 - średnica pala: $D = 1.18$ m

Osiadanie zmierzone na podporze II wynosi $s_{pom} = 8.5$ mm, natomiast osiadanie obliczone na podstawie opracowanego modelu matematycznego przedstawiono poniżej:



Rys. 5.4. Obliczone osiadanie oczepu podpory II. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku

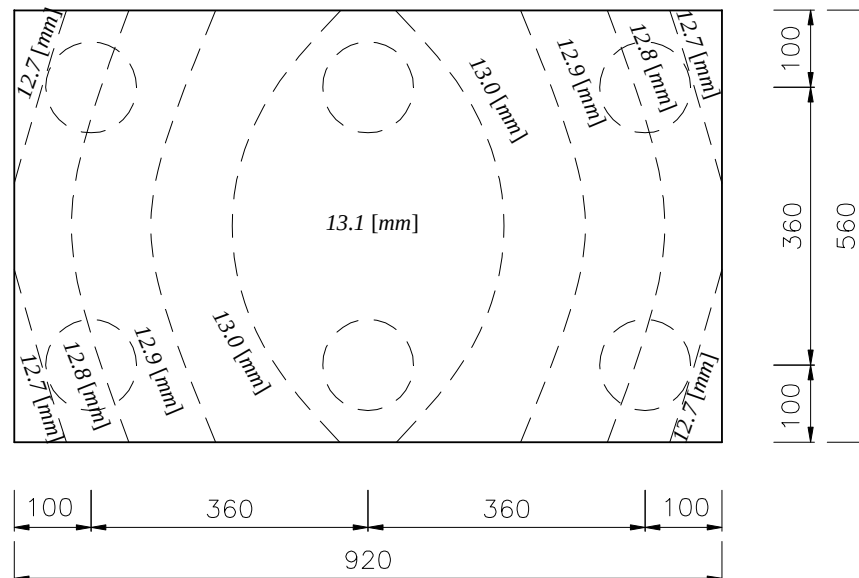
Wyznaczoną na podstawie obliczeń wartość mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali podpory II przedstawiono na rysunku poniżej:



Rys. 5.5. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory II

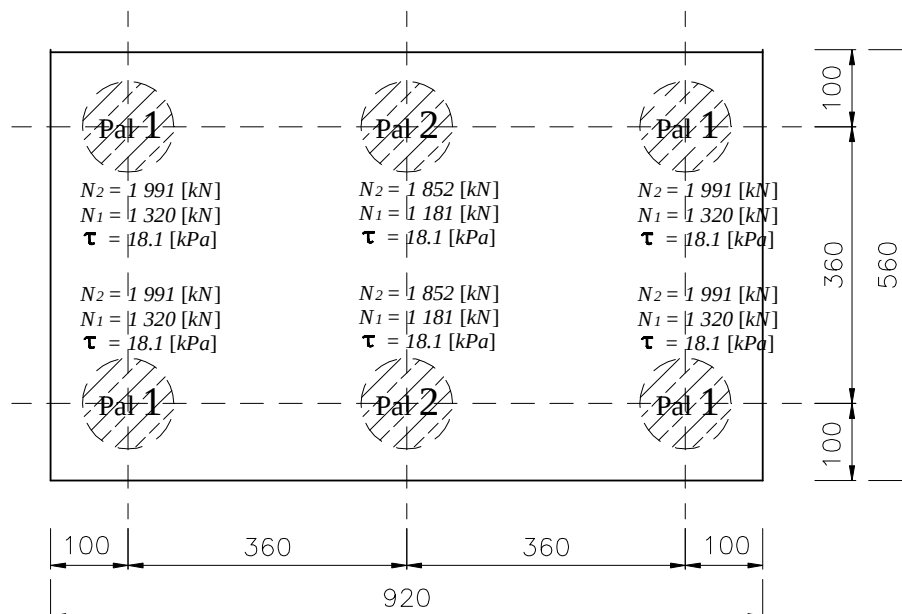
- Podpora III
 - obciążenie charakterystyczne podpory: 12 220 kN (237.2 kPa)
 - rzędna głowicy pala: + 1.30 m n.p.m.
 - rzędna podstawy pala: - 8.70 m n.p.m.
 - długość pala: $h_p = 10$ m
 - średnica pala: $D = 1.18$ m

Osiadanie zmierzone na podporze III wynosi $s_{pom} = 11.0 \text{ mm}$, natomiast osiadanie obliczone na podstawie opracowanego modelu matematycznego przedstawiono poniżej:



Rys. 5.6. Obliczone osiadanie oczepu podpory III. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku

Wyznaczoną na podstawie obliczeń wartość mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali podpory III przedstawiono na rysunku poniżej:

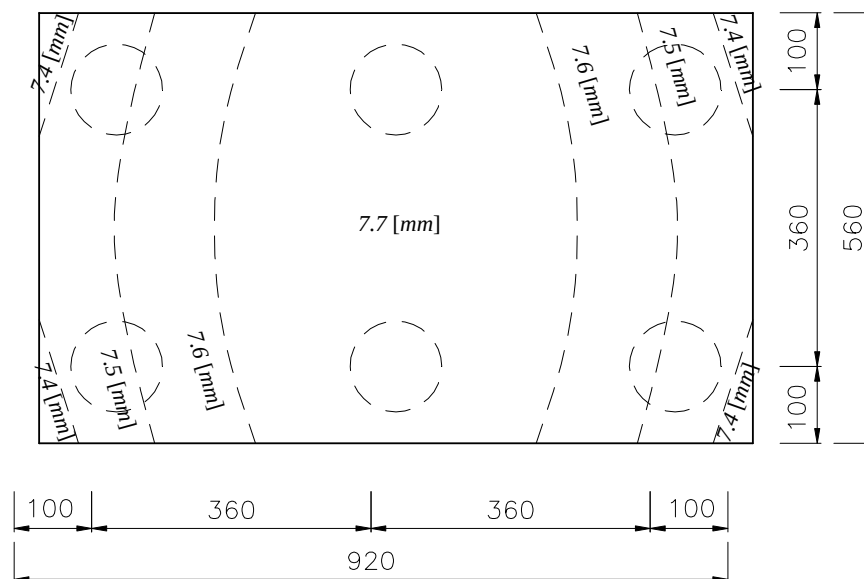


Rys. 5.7. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory III

- Podpora IV
 - obciążenie charakterystyczne podpory: 9 852 kN (191.2 kPa)
 - rzędna głowicy pala: + 1.40 m n.p.m.

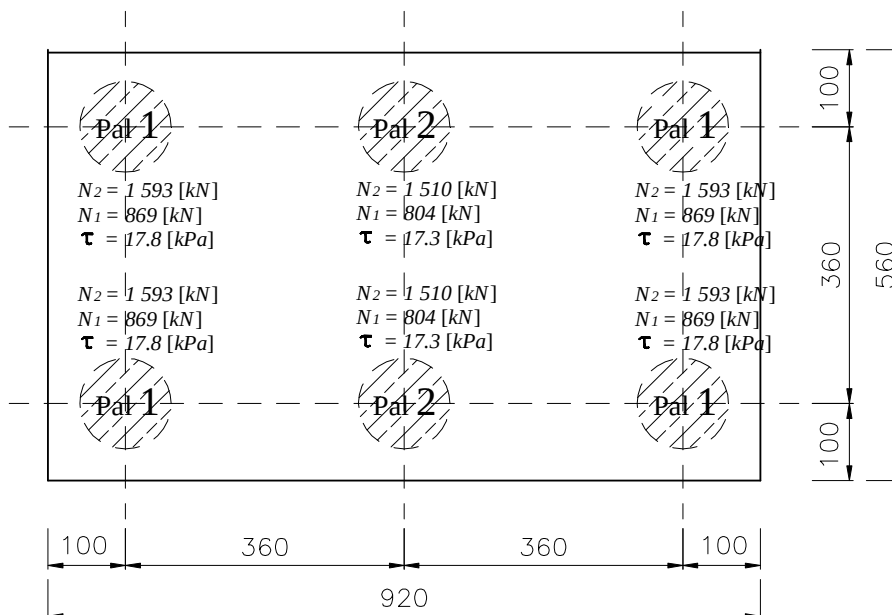
- rzędna podstawy pala: - 9.60 m n.p.m.
- długość pala: $h_p = 11$ m
- średnica pala: $D = 1.18$ m

Osiadanie zmierzone na podporze IV wynosi $s_{pom} = 6.5$ mm, natomiast osiadanie obliczone na podstawie opracowanego modelu matematycznego przedstawiono poniżej:



Rys. 5.8. Obliczone osiadanie oczepu podpory IV. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku

Wyznaczoną na podstawie obliczeń wartość mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali podpory IV przedstawiono na rysunku poniżej:



Rys. 5.9. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory IV

Na podstawie wykonanych obliczeń stwierdzono, że uzyskane wyniki osiadania trzech podpór estakady drogowej wykazują dużą zgodność z wynikami pomiarów terenowych. Występujące pod oczepem palowym grunty organiczne, o bardzo dużej ściśliwości, uniemożliwiają uwzględnienie udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże. W wyniku przeprowadzonych obliczeń, z dokładnością dostateczną dla celów inżynierskich, nie stwierdzono udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Uzyskana zgodność wyników osiadania wraz z potwierdzeniem przekazywania obciążenia przez grupę pali bez udziału płyty, w analizowanych warunkach geotechnicznych, pozwalają wnioskować o poprawność opracowanego modelu matematycznego.

5.2. Zbiorniki Podczyszczalni ścieków w Tychach - fundament płytowo-palowy

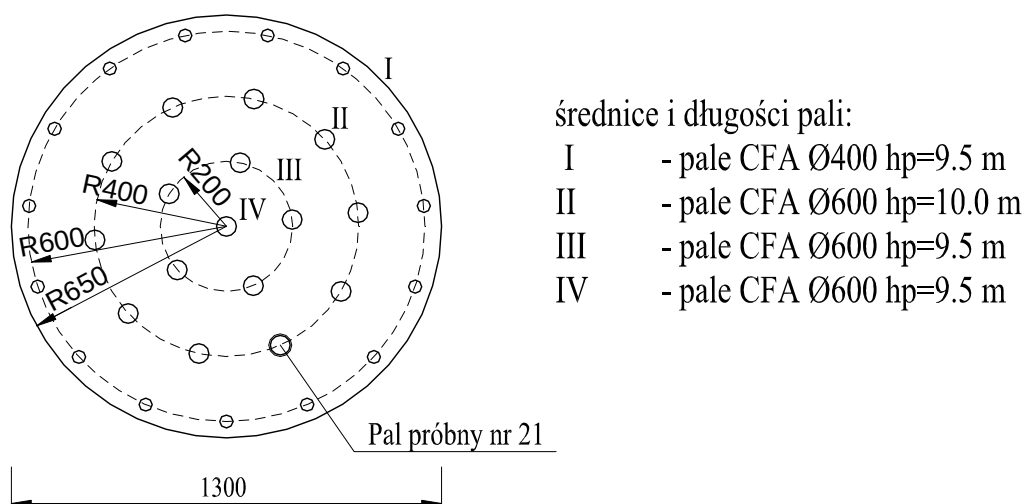
Obliczenie osiadań fundamentów przeprowadzono dla dwóch zbiorników zaliczanych do kompleksu Podczyszczalni Ścieków w Tychach, tj. zbiornika awaryjnego (obiekt nr 2) i zbiornika doczyszczającego (obiekt nr 6). Oba obiekty zostały zaprojektowane i zrealizowane jako fundamenty uwzględniające udział płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Podłoże pomiędzy palami przygotowano dodatkowo, wykonując podsypkę z kłińca dolomitowego 4-31 mm o grubości ok. 30 cm i zagęszczając ją do stopnia $I_D > 0.6$.

Dla obiektów poddanych analizie dysponujemy uśrednionymi profilami geotechnicznymi oraz wynikami próbnego statycznego obciążenia pala, wykonanego na planie płyty fundamentowej każdego zbiornika.

Na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, wykonanej w oparciu o 3 otwory badawcze do głębokości 20 m p.p.t. oraz 5 sondowań CPT do głębokości 17 m p.p.t., wyróżniono trzy podstawowe warstwy geotechniczne. Na powierzchni terenu występują nasypy antropogeniczne, zalegające do 4 m p.p.t. Nasypy te zostały częściowo skonsolidowane, przez zlokalizowanie na miejscu przyszłych robót palowych, wyłożonego z płyt betonowych, składowiska węgla sięgającego do 4 m. W warstwie drugiej występują przede wszystkim piaski gliniaste i gliny piaszczyste w stanie miękkoplastycznym, z przewarstwieniami gruntów niespoistych luźnych bądź średnio zagęszczonych. Poniżej w wydzielonej trzeciej warstwie zalegają pyły, gliny pylaste oraz ły z soczewkami piasków pylastych, w stanie twardoplastycznym i na granicy plastycznego.

- Zbiornik awaryjny (Obiekt 2)

Zbiornik posadowiono na palach CFA o średnicach ϕ 400 i ϕ 600 i długościach 9.5-10 m według schematu poniżej:



Rys. 5.10. Plan palowania zbiornika awaryjnego [90]

Dane geometryczne analizowanego fundamentu przedstawiono w tabeli 5.5., natomiast uśredniony profil geotechniczny w tabeli 5.6 i na rysunku 5.11.

Tabl. 5.5. Charakterystyka geometryczna fundamentu zbiornika awaryjnego [90]

Parametry obiektu	Zbiornik awaryjny
Powierzchnia fundamentu [m ²]	132.7
Średnica płyty fundamentowej [m]	13.0
Średnica zbiornika [m]	12.0
Grubość płyty fundamentowej [m]	0.5
Liczba pali	31

Tabl. 5.6. Uśredniony profil geotechniczny - zbiornik awaryjny [90,95]

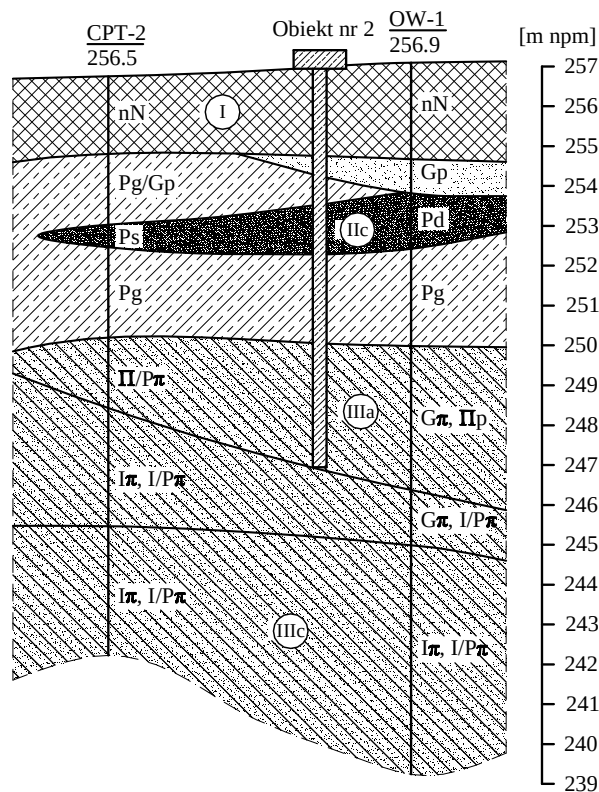
Nr warstwy	Rzędna spągu	Rodzaj gruntu	Mięższość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Stan gruntu I_L/I_D	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł edom. M_0 [MPa]
I	254.50	nN (Ps, Pg)	2.40	16-18	0.3(0.5)	25	20
IIb	254.10	Pg, Gp	0.40	21	0.4	11	18
IIa	253.40	Pg, Gp, Pg/Gp	0.70	20	0.6	8.5	20
IIC	252.20	Pd/P π , Ps	1.20	17.5	≤ 0.3	29.5	42
IIa	250.00	Pg, Gp, Pg/Gp	2.20	20	0.6	8.5	20
IIIa	246.90	II, G π /II/P π	3.10	20	0.25	17	35
IIIb	254.10	I π , I/P π	1.8	19	0.25	10	22
IIIc	-	I π , I/P π	-	20	0.1	11.5	31

Obliczenia zbiornika awaryjnego przeprowadzono na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego, wykonanego na palu nr 21, o następującej geometrii:

długość pala $h_p = 10.0$ m

średnica pala $D = 0.60$ m

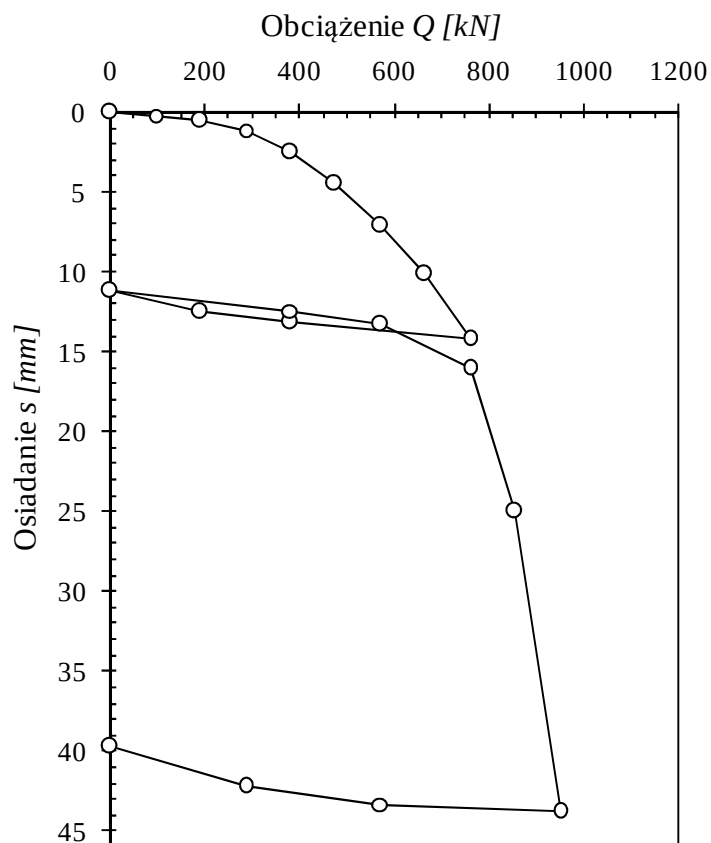
Wyniki próbnego obciążenia pala nr 21 przedstawiono na rysunku 5.12.



Rys. 5.11. Profil geotechniczny - zbiornik awaryjny [90]

Próbne obciążenie pala nr 21

$h_p = 10.0$ m, $D = 0.60$ m



Rys. 5.12. Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala nr 21 zbiornika awaryjnego [90]

Parametry krzywej Meyera-Kowalowa wyznaczono metodami statystycznymi, na podstawie wyników próbnego obciążenia pala. Uzyskana charakterystyka pracy pala pozwoliła oszacować parametry krzywej MK dla pozostałych pali tworzących fundament w zadanych warunkach gruntowych.

Tabl. 5.7. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pala próbnego oraz poszczególnych pali fundamentu zbiornika awaryjnego

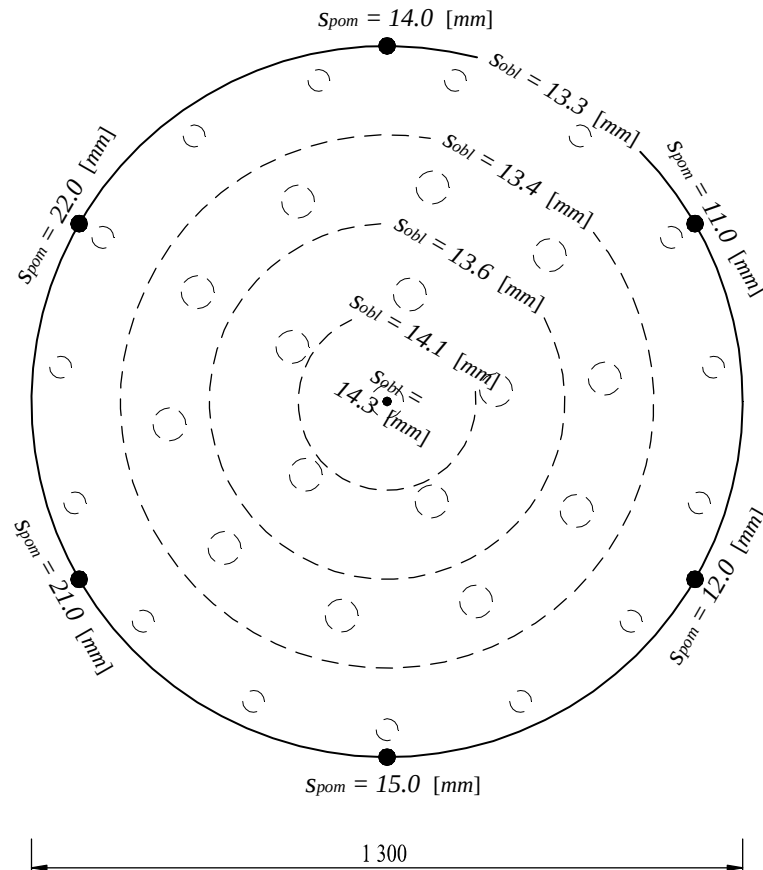
Parametry krzywej Meyera-Kowalowa	Pal próbny $D = 0.6 \text{ m}$ $h_p = 10.0 \text{ m}$	Pal $D = 0.6 \text{ m}$ $h_p = 9.5 \text{ m}$	Pal $D = 0.4 \text{ m}$ $h_p = 9.5 \text{ m}$
κ [-]	2.52	2.43	3.23
$C \times 10^{-3}$ [mm/kN]	2.53	2.63	2.81
N_{gr} [kN]	1 246	1 195	746

Na fundamencie zbiornika założono repéry pomiarowe, zlokalizowane po obwodzie płyty fundamentowej. Kontrolę osiadania przeprowadzono w okresie od 29.11.2002 do 13.12.2002 w trakcie wykonywania próby wodnej. Została ona przeprowadzona na podstawie opracowanego programu próby wodnej, o podstawowych parametrach ją charakteryzujących zawartych w tabeli 5.8.

Tabl. 5.8. Podstawowe parametry programu próby wodnej [90]

Parametry obiektu	Zbiornik awaryjny
Całkowite obciążenie [kN]	11400
Wysokość napełnienia w trakcie próby [m]	10.5
Ciężar pustego zbiornika [T]	40
Ciężar zbiornika z wodą [T]	1140

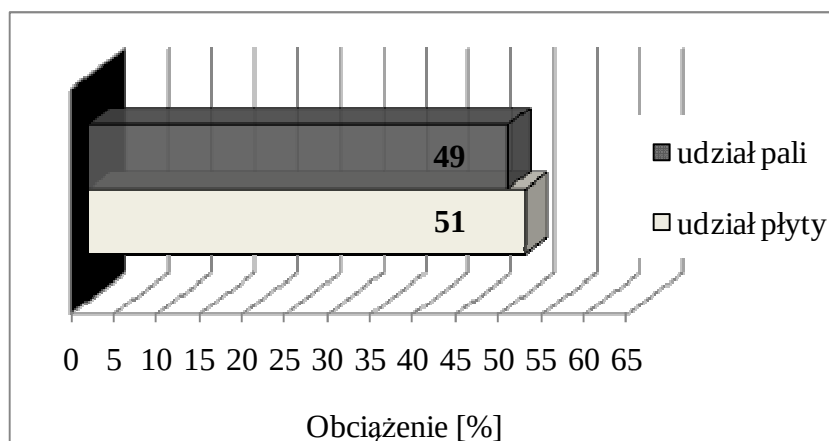
Dysponując powyższymi danymi przeprowadzono analizę posadowienia w oparciu o opracowany model matematyczny. Uzyskano na jego podstawie wyniki osiadań płyty, siły w głowicach poszczególnych pali z mobilizacją oporów pobocznic i podstaw oraz rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale.



Rys. 5.13. Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika awaryjnego

Pomiary geodezyjnych osiadań zlokalizowane zostały na zewnętrznym obrysie płyty fundamentowej. Na podstawie wykonanych pomiarów można zaobserwować nierównomierne przemieszczanie dwóch reperów. Przyczyną może być lokalne pogorszenie warunków gruntowych. Uzyskane wyniki obliczeń osiadań i ich znaczna zgodności z większością wartości pomierzonych, pozwalają wnioskować o poprawność przyjętych założeń w opracowanym modelu matematycznym sprężystej płyty spoczywającej na podłożu i palach.

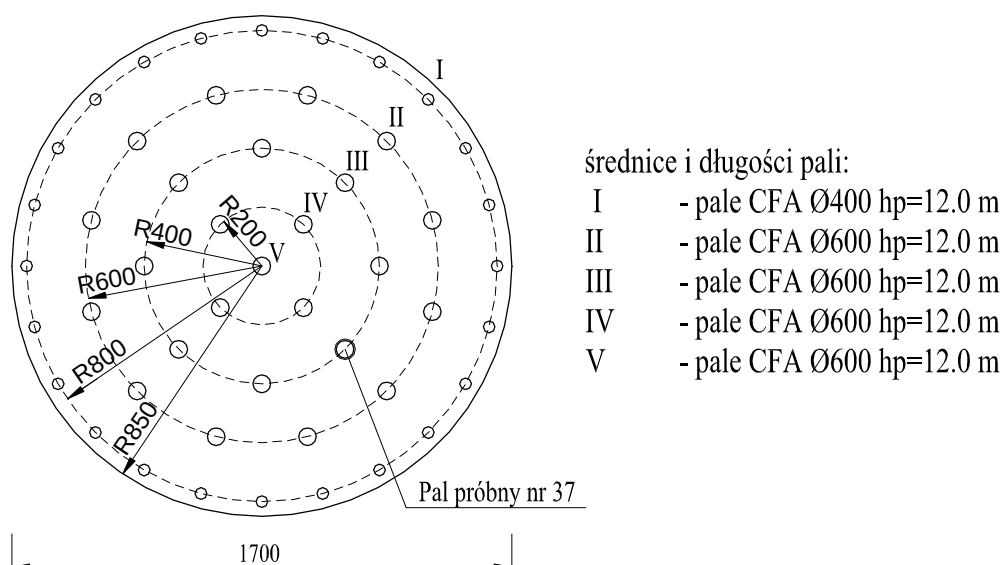
Na rysunku 5.14 przedstawiono udział płyty i pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Podane wartości pełnią jedynie rolę informacyjną i nie mogą zostać poddane weryfikacji, ponieważ rozdział obciążenia nie był przedmiotem badań terenowych.



Rys. 5.14. Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik awaryjny

- Zbiornik doczyszczający (Obiekt nr 6)

Zbiornik posadowiono na palach CFA o średnicach ϕ 400 i ϕ 600 i długości 12 m według schematu poniżej:



Rys. 5.15. Plan palowania zbiornika doczyszczającego [90]

Dane geometryczne analizowanego fundamentu przedstawiono w tabeli 5.9, natomiast uśredniony profil geotechniczny w tabeli 5.10 i na rysunku 5.16.

Tabl. 5.9. Charakterystyka geometryczna fundamentu zbiornika doczyszczającego [90]

Parametry obiektu	Zbiornik doczyszczający
Powierzchnia fundamentu [m ²]	227.0
Średnica płyty fundamentowej [m]	17.0
Średnica zbiornika [m]	16.0
Grubość płyty fundamentowej [m]	0.5
Liczba pali	49

Tabl. 5.10. Uśredniony profil geotechniczny - zbiornik doczyszczający [90,95]

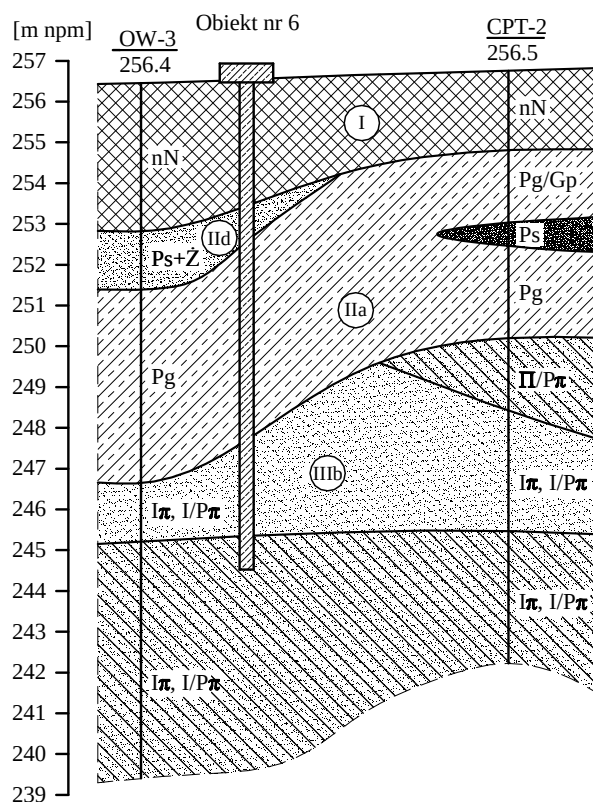
Nr warstwy	Rzędna spągu	Rodzaj gruntu	Mięszczość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Stan gruntu I_L/I_D	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł edom. M_o [MPa]
I	253.40	nN (Ps, Pg)	3.10	16-18	0.3(0.5)	25	20
II _d	252.50	Ps, Po, Ps+Ż	0.90	18.5	0.5	33	100
II _a	247.70	Pg, Gp, Pg/Gp	4.80	20	0.6	8.5	20
III _b	245.30	I π , I/P π	2.40	19	0.25	10	22
III _c	-	I π , I/P π	-	20	0.1	11.5	31

Obliczenia zbiornika doczyszczającego przeprowadzono na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego, wykonanego na pału nr 37, o następującej geometrii:

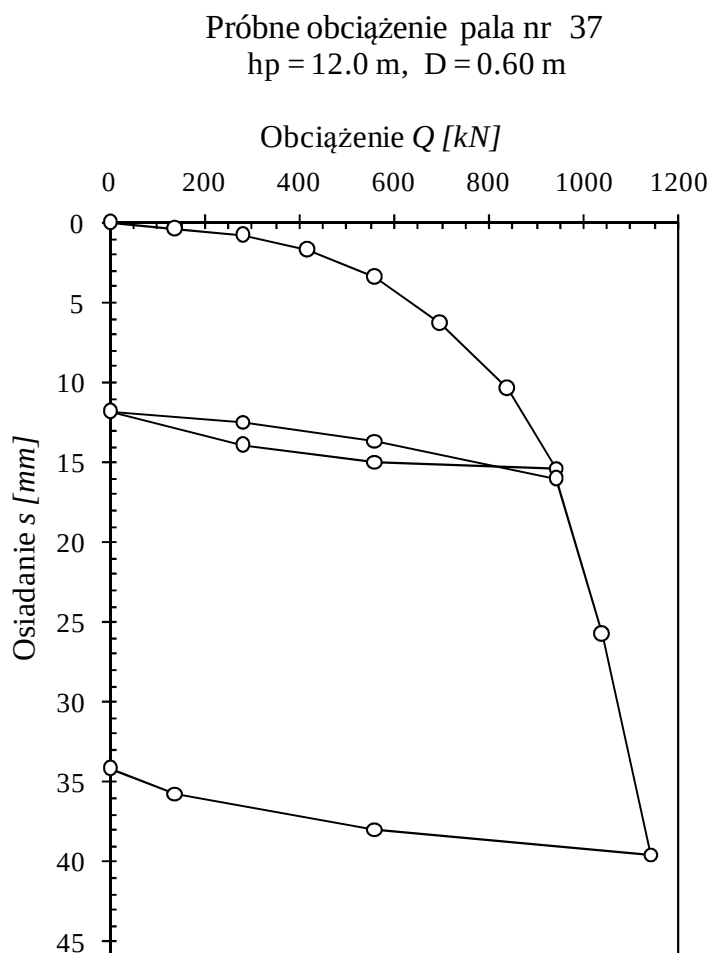
długość pala $h_p = 12.0$ m

średnica pala $D = 0.60$ m

Wyniki próbnego obciążenia pala nr 37 przedstawiono na rysunku 5.17.



Rys. 5.16. Profil geotechniczny - zbiornik doczyszczający [90]



Rys. 5.17. Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala nr 37 zbiornika doczyszczającego [90]

Parametry krzywej Meyera-Kowalowa wyznaczono metodami statystycznymi, na podstawie wyników próbnego obciążenia pala. Uzyskana charakterystyka pracy pala pozwoliła oszacować parametry krzywej MK dla pozostałych pali tworzących fundament w zadanych warunkach gruntowych.

Tabl. 5.11. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pala próbnego oraz poszczególnych pali fundamentu zbiornika doczyszczającego

Parametry krzywej Meyera-Kowalowa	Pal próbny $D = 0.6 \text{ m}$ $h_p = 12.0 \text{ m}$	Pal $D = 0.4 \text{ m}$ $h_p = 12.0 \text{ m}$
$\kappa \quad [-]$	0.42	0.56
$C \times 10^{-3} \quad [\text{mm/kN}]$	2.86	3.06
$N_{gr} \quad [\text{kN}]$	1 155	720

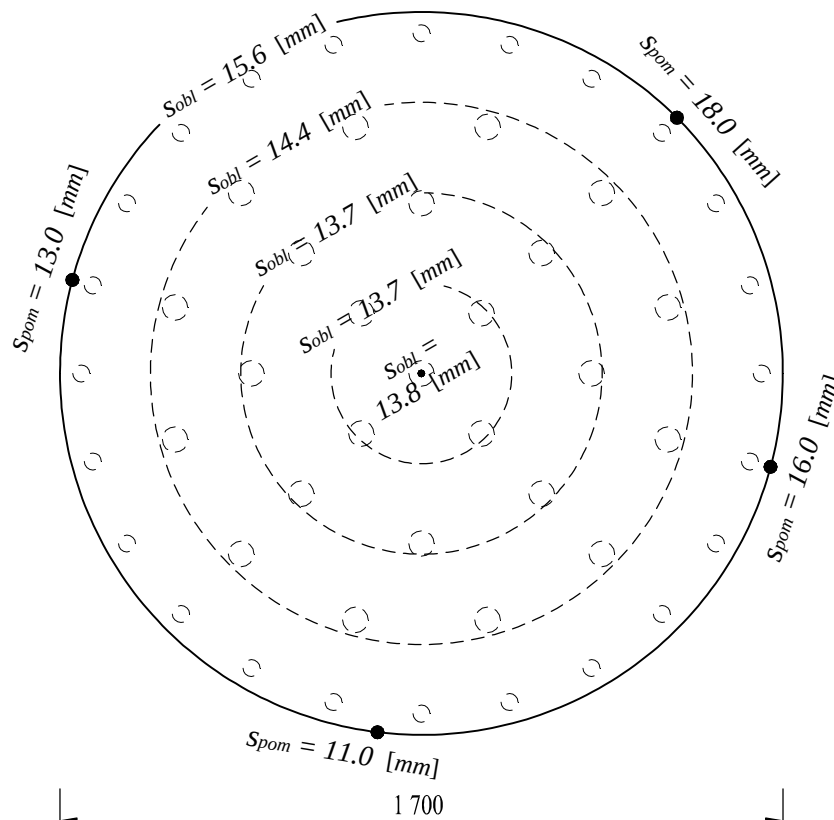
Na fundamencie zbiornika założono repéry pomiarowe, zlokalizowane po obwodzie płyty fundamentowej. Kontrolę osiadania przeprowadzono w okresie od 28.01.2003 do

06.02.2003 w trakcie wykonywania próby wodnej. Została ona przeprowadzona na podstawie opracowanego programu próby wodnej, o podstawowych parametrach ją charakteryzujących zawartych w tabeli 5.12.

Tabl. 5.12. Podstawowe parametry programu próby wodnej [90]

Parametry obiektu	Zbiornik awaryjny
Całkowite obciążenie [kN]	24000
Wysokość napełnienia w trakcie próby [m]	10.0
Ciężar pustego zbiornika [T]	40
Ciężar zbiornika z wodą [T]	2040

Dysponując powyższymi danymi przeprowadzono analizę posadowienia w oparciu o opracowany model matematyczny. Uzyskano na jego podstawie wyniki osiadań płyty, siły w głowicach poszczególnych pali z mobilizacją oporów pobocznic i podstaw oraz rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale.



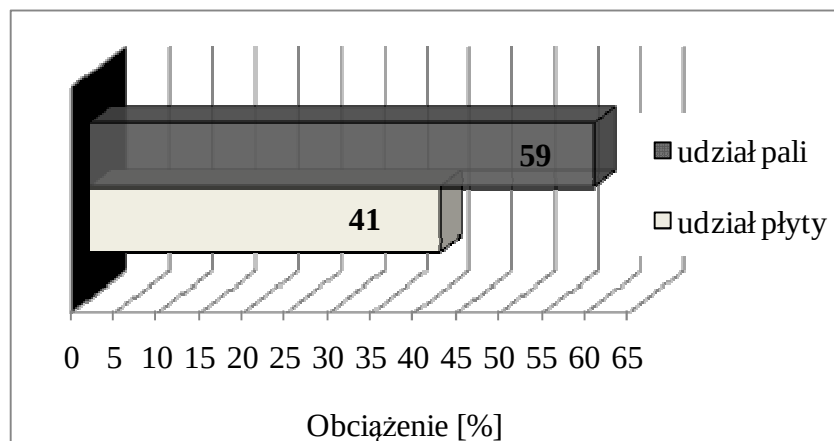
Rys. 5.18. Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika doczyszczającego

Pomiary geodezyjnych osiadań zlokalizowane zostały na zewnętrznym obrysie płyty fundamentowej. Wyniki obliczeń osiadań i ich zgodności z wartościami

pomierzonymi, pozytywnie weryfikują opracowany model matematyczny płyty spoczywającej na uwarstwowionym podłożu i palach.

Wyniki obliczonych wartości osiadań płyty na całej powierzchni przedstawiono na rysunku 5.18. Można zaobserwować największe osiadania po obwodzie krawędzi płyty. Wynika to, że zróżnicowania pali w grupie, tzn. na obwodzie zewnętrznym wykonano pale charakteryzujące się mniejszą nośnością i sztywnością, w stosunku do pali wewnątrz płyty. Powyższe założenie projektowe, umożliwiło zredukować osiadanie w centralnej części płyty. Należy podkreślić, że parametry krzywej MK, dla pali usytuowanych po obwodzie, zostały oszacowane na podstawie wyników próbnego obciążenia pala wewnątrz grupy o odmiennej geometrii. Nie dysponujemy wynikami próbnego obciążenia pala zewnętrznego, co wpływa na dokładność uzyskanych wyników.

Na rysunku 5.19 przedstawiono udział płyty i pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Podane wartości pełnią jedynie rolę informacyjną i nie mogą zostać poddane weryfikacji, ponieważ rozdział obciążenia nie był przedmiotem badań terenowych.

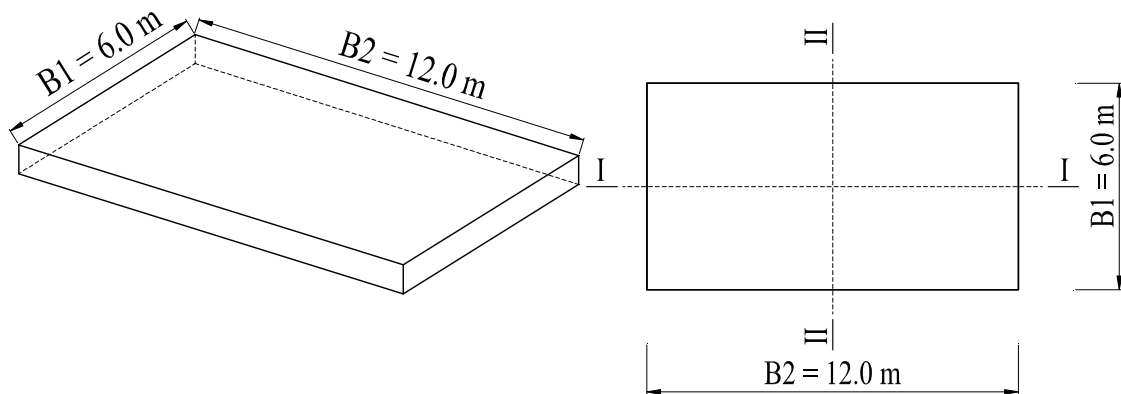


Rys. 5.19. Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik doczyszczający

6. PRZEGLĄD SYSTEMATYCZNY ROZWIĄZANIA

6.1. Sprężysta płyta na podłożu

Przegląd rozwiązań uzyskiwanych proponowanym modelem obliczeniowym, w zakresie analizy sprężystej płyty na podłożu, przeprowadzono na przykładzie płyty przedstawionej na rysunku 6.1.



Rys. 6.1. Schemat analizowanego fundamentu - płyta na podłożu

Badania przeprowadzono dla dwóch odmiennych warunków gruntowych, o parametrach geotechnicznych przedstawionych w tabelach 6.1 i 6.2.

Tabl. 6.1. Parametry geotechniczne - profil I

Rodzaj gruntu	Mięszość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]
il piaszczysty	-	19	10	10.0

Tabl. 6.2. Parametry geotechniczne - profil II

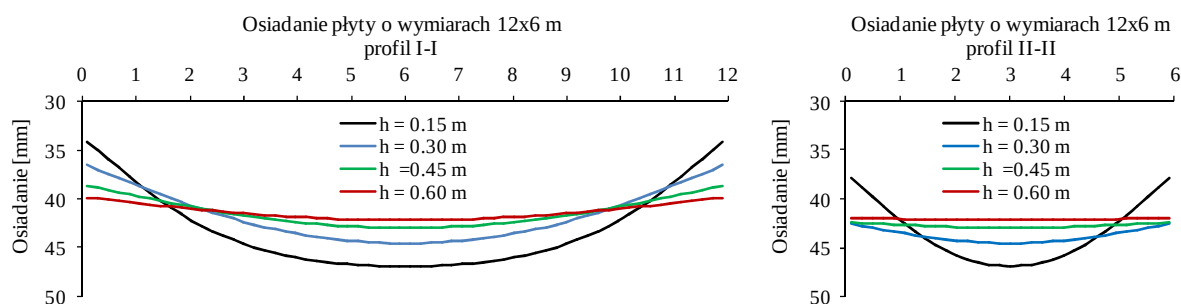
Rodzaj gruntu	Mięszość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]
glina pylasta / pył	-	20	20	19.5

Analizie poddano wpływ sztywności i obciążenia płyty na wyniki osiadań i jej ugięć. Przedstawiono także rozkład sztywności podpór gruntowych oraz zmienność stref aktywnych naprężenia pod płytą.

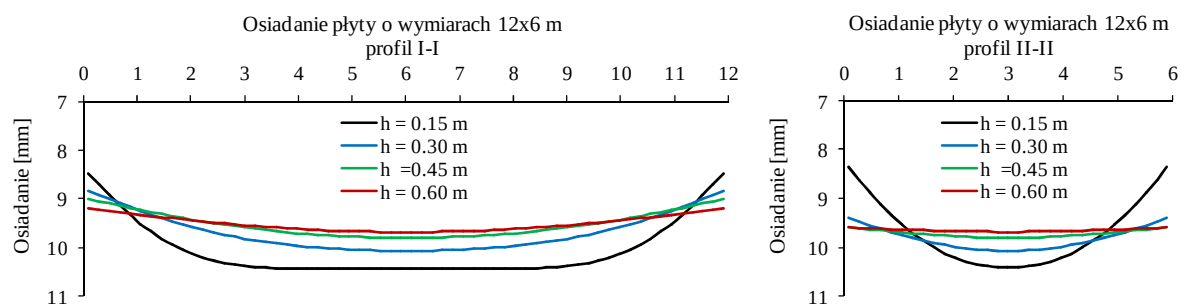
Analiza osiadania i ugięcia płyty spoczywającej na podłożu

Wpływ sztywności i obciążenia płyty na jej osiadanie w zadanych warunkach gruntowych przedstawiono na rysunkach 6.2 do 6.7. Wyznaczone linie ugięć są

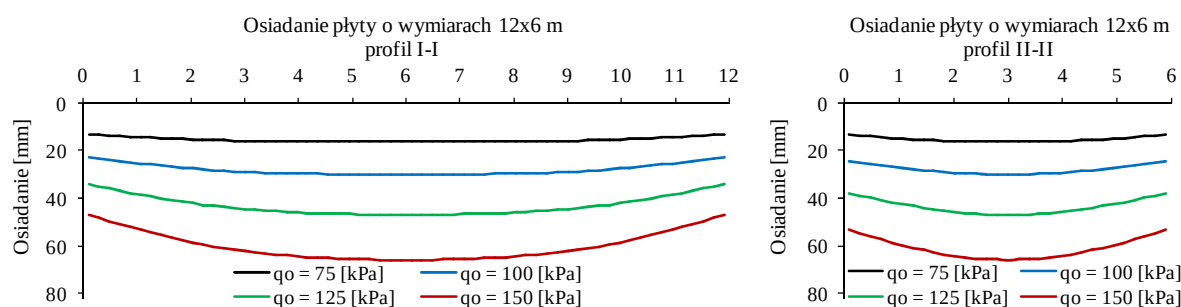
symetryczne zgodne z oczekiwaniami. Pionowe obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni płyty wywołało nierównomierne osiadania, co odzwierciedla podatność ośrodka gruntowego pod płytą. Występuje widoczna różnica pomiędzy osiadaniami środka a krawędziami płyty. Największą nierównomierność osiadań obserwujemy dla płyty o najniższej sztywności. Wzrost sztywności płyty wpływa na wyrównanie osiadań na jej powierzchni. Ugięcie płyty zależy także od obciążenia przyłożonego na powierzchni płyty i rośnie wraz z nim.



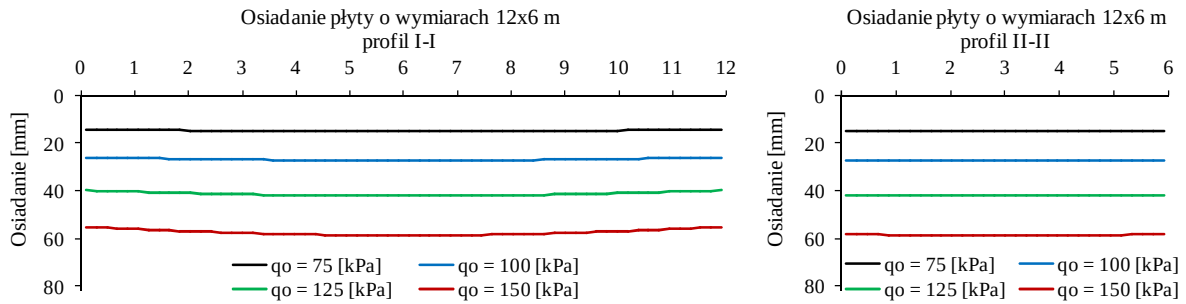
Rys. 6.2. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie ($q_0 = 125$ kPa, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



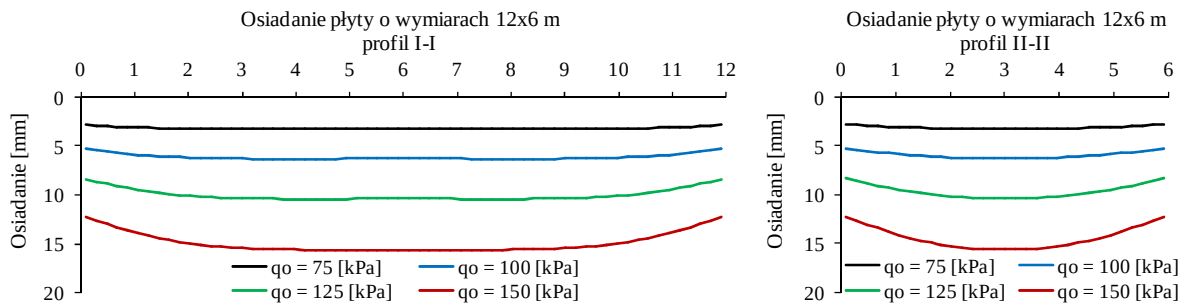
Rys. 6.3. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie ($q_0 = 125$ kPa, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)



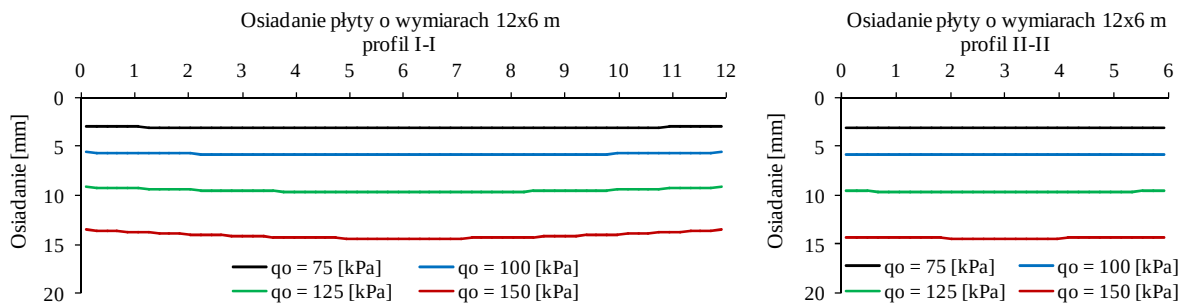
Rys. 6.4. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.15$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



Rys. 6.5. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.60$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



Rys. 6.6. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.15$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)



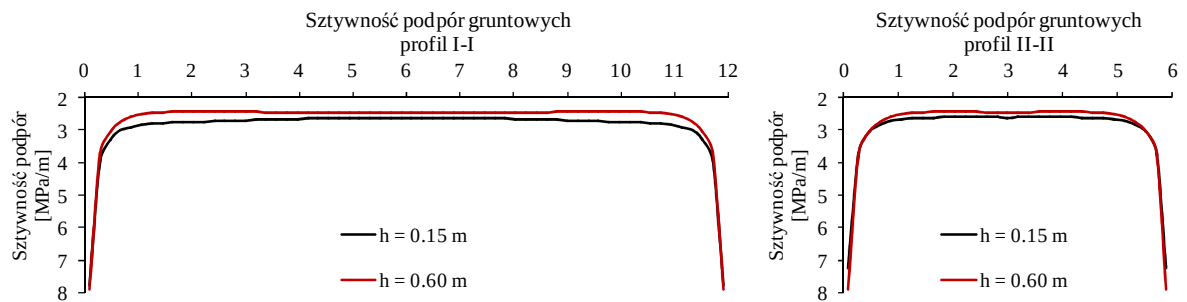
Rys. 6.7. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.60$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)

Równomierność osiadań płyty o zadanej sztywności zależy także od warunków geotechnicznych. Dla podłoża scharakteryzowanego wyższymi wartościami parametrów geotechnicznych, takimi jak moduł odkształcenia i kąt tarcia wewnętrznego gruntu, uzyskujemy większą równomierność osiadań, a także zgodnie z oczekiwaniami mniejszą średnią wartość osiadania.

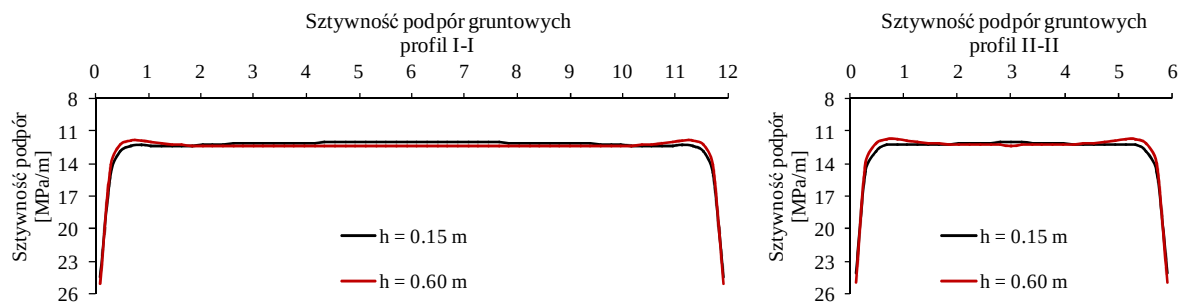
Analiza sztywności podpór gruntowych

Sztywność podpór modelujących podłoże określa stosunek naprężenia kontaktowego płyta-podłoże do osiadania w danym węźle obliczeniowym, przy uwzględnieniu wzajemnej interakcji poszczególnych pól dyskretyzowanej płyty. Poniżej przedstawiono wpływ sztywności i obciążenia płyty oraz geotechnicznych

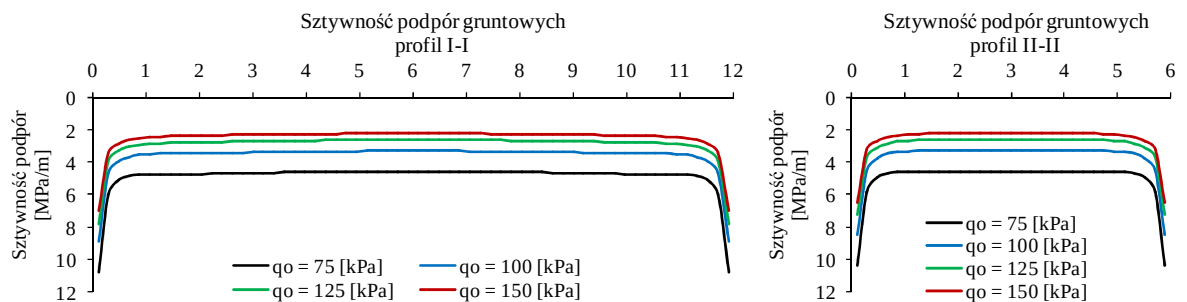
warunków posadowienia na rozkład wartości sztywności podpór sprężystych (rys. 6.8 do 6.13). Rysunki przedstawiają rozkład sztywności podpór gruntowych o charakterystycznych maksymalnych wartościach na krawędziach płyty. Przyczyn powyższego zjawiska szukać należy w rozkładzie naprężenia kontaktowego dla płyty o zadanej sztywności spoczywającej na podłożu [106].



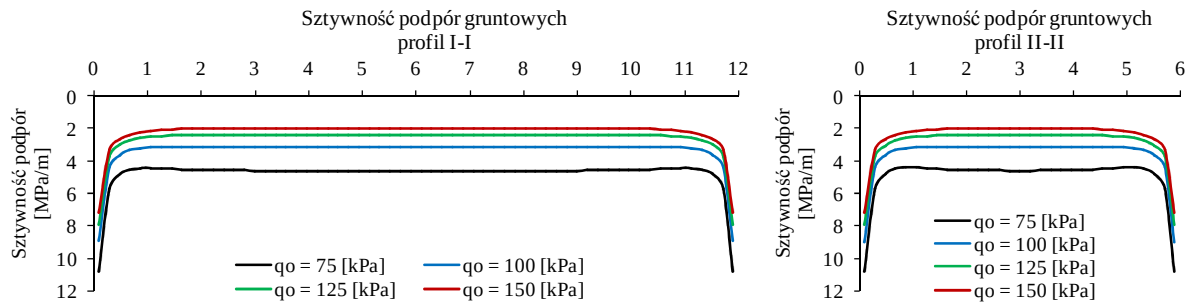
Rys. 6.8. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych ($q_0 = 125$ kPa, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



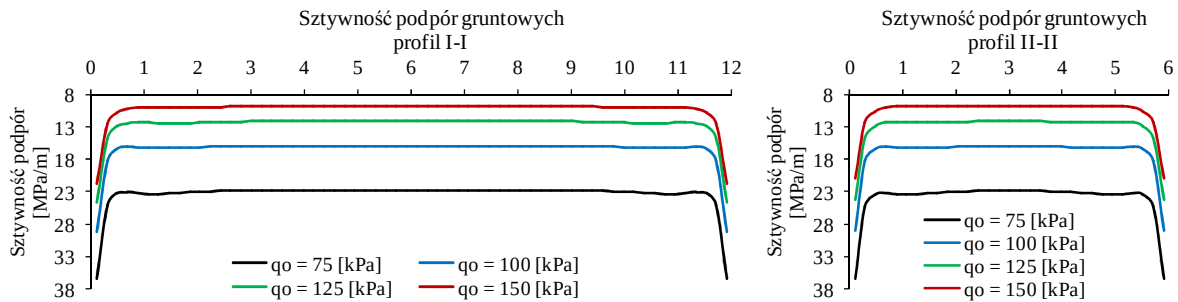
Rys. 6.9. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych ($q_0 = 125$ kPa, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)



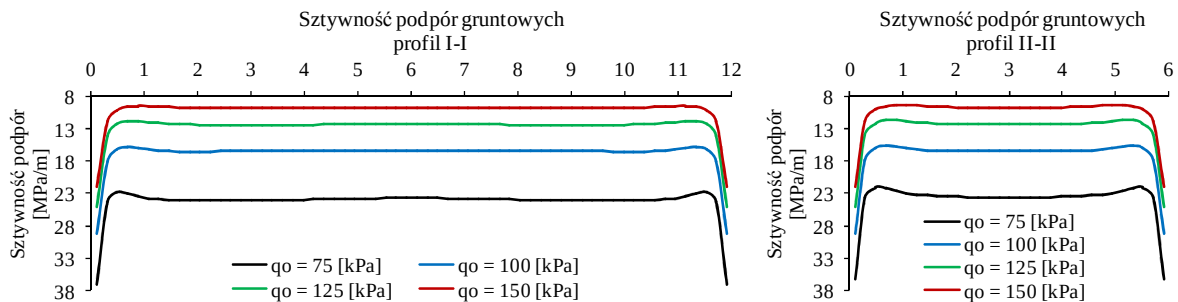
Rys. 6.10. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.15$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



Rys. 6.11. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.60$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



Rys. 6.12. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.15$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)



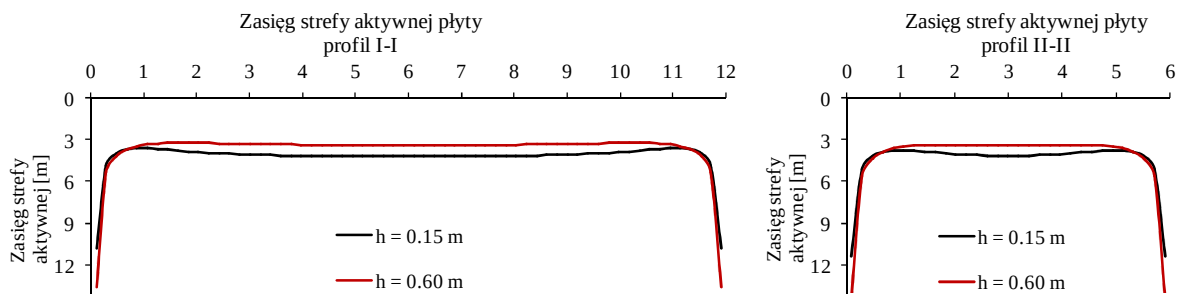
Rys. 6.13. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.60$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)

Charakterystyka podpór w opracowanym przykładzie, wyraźnie zależy od parametrów geotechnicznych podłoża, przyłożonego obciążenia oraz w mniejszym stopniu od sztywności płyty. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem parametrów geotechnicznych podłoża rosną wartości sztywności podpór modelujących podłoże, natomiast wraz ze wzrostem obciążenia badany współczynnik maleje. Dla podłoża o wyższych parametrach obserwujemy większe zróżnicowanie wartości sztywności podpór gruntowych w analizowanym zakresie obciążenia.

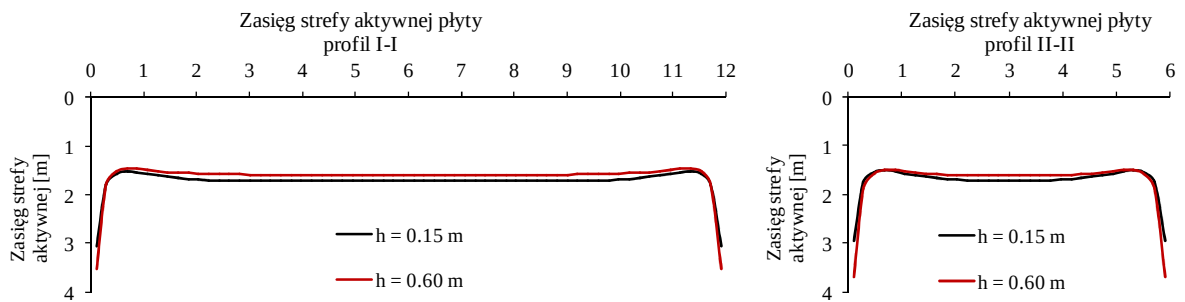
Analiza zasięgu strefy aktywnej płyty spoczywającej na podłożu

Opracowany model matematyczny umożliwia także wyznaczenie zasięgu strefy aktywnej naprężenia płyty (rys. 6.14 do 6.19), wpływającej bezpośrednio na osiadanie.

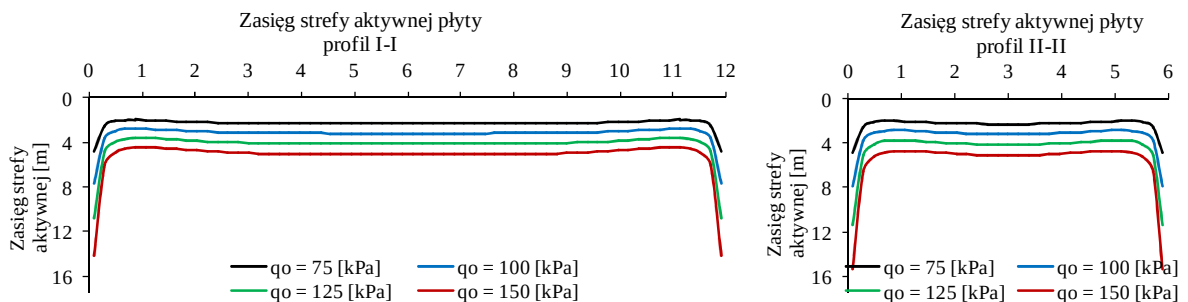
Zasięg strefy aktywnej zależy od naprężenia kontaktowego oraz parametrów wytrzymałościowych podłoża. W związku z powyższym uzyskano nierównomierny rozkład strefy aktywnej, który jest symetryczny i zgodny z oczekiwaniami, o charakterystycznym rozkładzie odzwierciedlającym naprężenia kontaktowe płyty z podłożem. Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić, że zasięg strefy aktywnej maleje wraz ze wzrostem sztywności płyty w centralnej jej części, natomiast wzrasta na krawędziach.



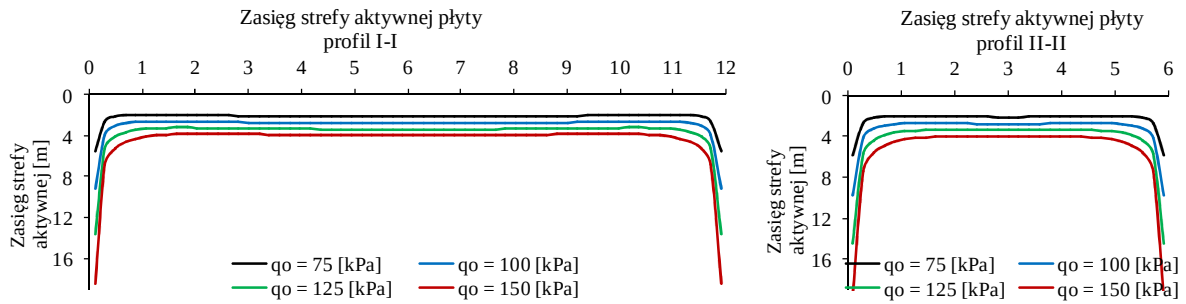
Rys. 6.14. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej płyty ($q_0 = 125$ kPa, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



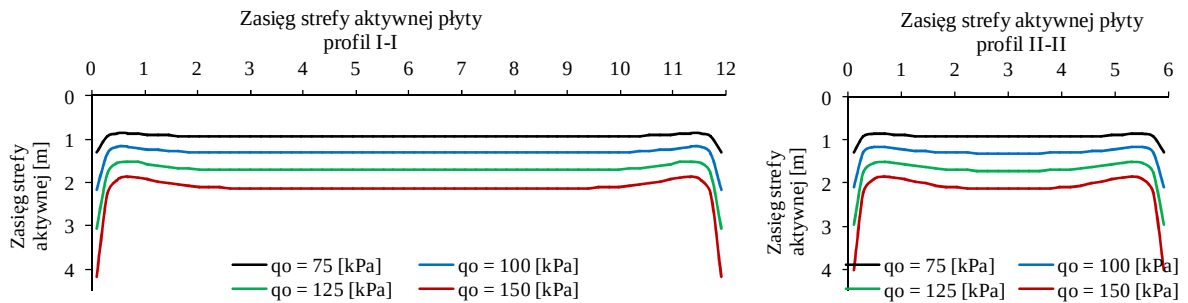
Rys. 6.15. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej płyty ($q_0 = 125$ kPa, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)



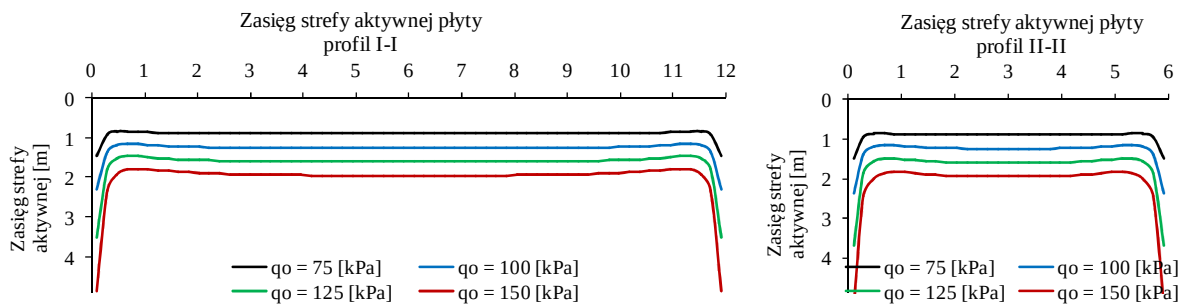
Rys. 6.16. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.15$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



Rys. 6.17. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.60$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa)



Rys. 6.18. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.15$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)



Rys. 6.19. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.60$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa)

Dla podłoża o niższych wartościach parametrów geotechnicznych, tzn. module odkształcenia oraz kącie tarcia wewnętrznego, uzyskano większe zasięgi strefy aktywnej. Ponadto można stwierdzić, że wpływ obciążenia na analizowany zasięg strefy aktywnej jest większy dla gruntów o niższych parametrach. Dla tych gruntów obserwujemy także większe zróżnicowanie pomiędzy wartościami uzyskiwanymi w środku i na krawędziach płyty.

6.2. Sprężysta płyta na podłożu i pojedynczym palu

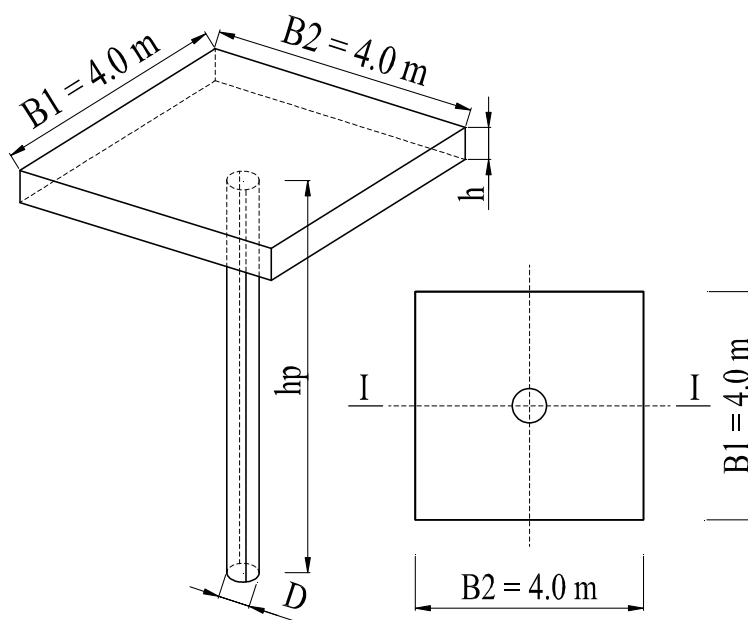
Analizę płyty spoczywającej na podłożu i palu przeprowadzono na przykładzie o geometrii przedstawionej na rysunku 6.20. Przegląd uzyskiwanych rozwiązań przygotowano dla dwóch typów pali, osadzonych w odmiennych warunkach gruntowych (Tabl. 6.3 i 6.4).

Tabl. 6.3. Parametry geotechniczne - pal I

Rodzaj gruntu	Mięższność warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]
ił pylasty	3.0	17	10	7.0
glina pylasta	6.5	20	21	24.6
ił pylasty	-	19	10	12.5

Tabl. 6.4. Parametry geotechniczne - pal II

Rodzaj gruntu	Mięższność warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]
ił pylasty	5.0	17	10	7.0
piasek drobny	7.0	20	32	56.4
piasek drobny	-	20	32	60.0



Rys. 6.20. Schemat analizowanego fundamentu - płyta na podłożu i pojedynczym palu

Pierwszy pal jest palem wierconym nieprzemieszczeniowym (pal I), natomiast drugiego pala zaliczamy do pali wbijanych (pal II).

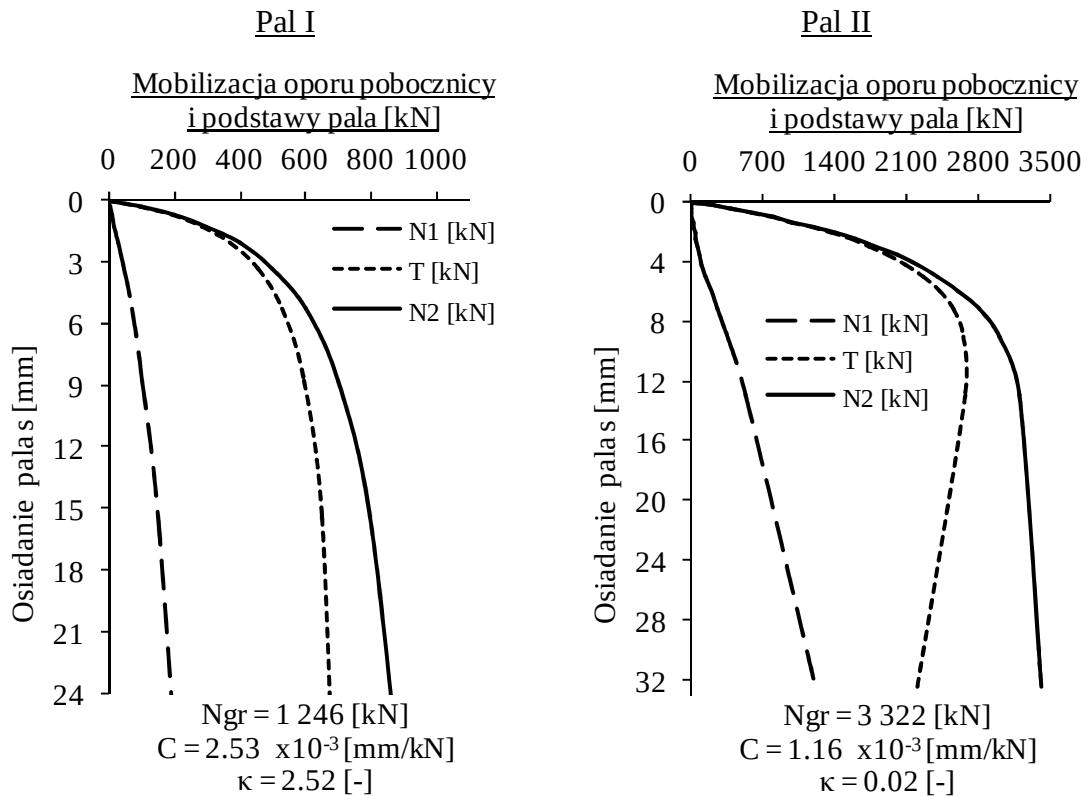
Dane geometryczne pali:

Pal I - $h_p = 10.0$ m, $D = 0.60$ m

Pal II - $h_p = 13.5$ m, $D = 0.508$ m

Ze względu na technologię wykonania pale charakteryzują się odmienną mobilizacją oporu pobocznic i podstawy, a także pomimo innych warunków gruntowych odmienną relacją obciążenie-osiadanie [25]. Wyniki próbnych obciążeń statycznych posłużyły

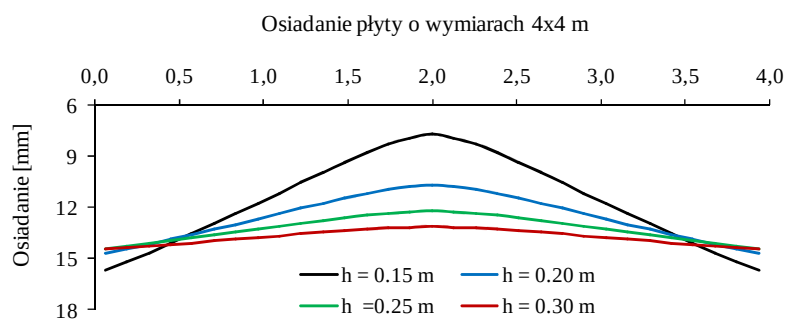
wyznaczeniu parametrów krzywej Meyera-Kowalowa, do których zaliczamy także nośność graniczną pala. W zadanych warunkach gruntowych pal wbijany wykazał niemal 3-krotnie większą nośność graniczną, podczas próbnego obciążenia statycznego, w porównaniu z palem wierconym. Krzywą MK wraz z mobilizacją oporu pobocznicy i podstawy pala podczas próbnego obciążenia statycznego przedstawiono na rysunku 6.21.



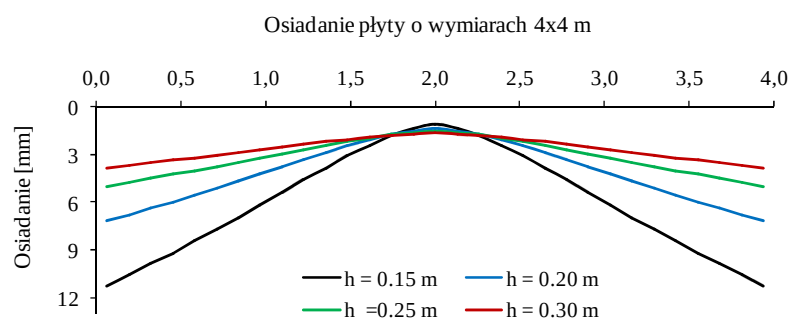
Rys. 6.21. Mobilizacja oporu pobocznicy i podstawy podczas próbnego obciążenia statycznego pala

Analiza osiadania i ugięcia płyty spoczywającej na podłożu i pojedynczym palu

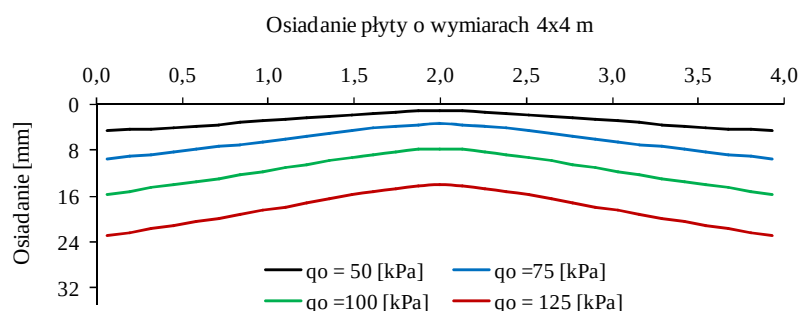
Wpływ sztywności płyty oraz obciążenia do niej przyłożonego przedstawiono na rysunkach 6.22 do 6.27. Linie ugięć płyty są symetryczne. Najmniejsze osiadanie występuje w środku płyty w miejscu występowania pala, największe natomiast na jej krawędziach. Stwierdzić można, że sztywność płyty wpływa na wyrównanie osiadania na jej planie, a także na zwiększenie udziału pala w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Ze względu na różne nośności i relacje obciążenie-osiadanie pali można stwierdzić istotny ich wpływ na osiadanie i ugięcie płyty. Linie ugięć dla zadanych sztywności płyty w analizie obu pali, mają zbliżoną charakterystykę, co potwierdza występowanie pod płytą podłoża o jednakowych parametrach geotechnicznych oraz determinującej roli pracy pala w gruncie na osiadanie całego układu.



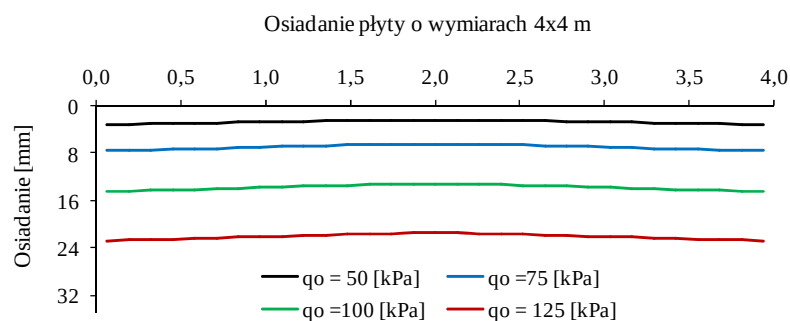
Rys. 6.22. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 100 \text{ kPa}$, pal I)



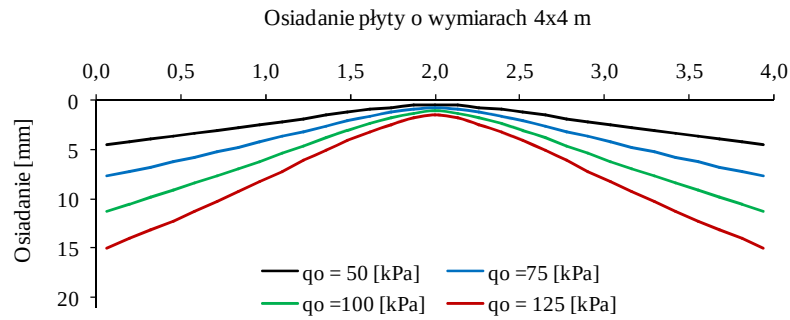
Rys. 6.23. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 100 \text{ kPa}$, pal II)



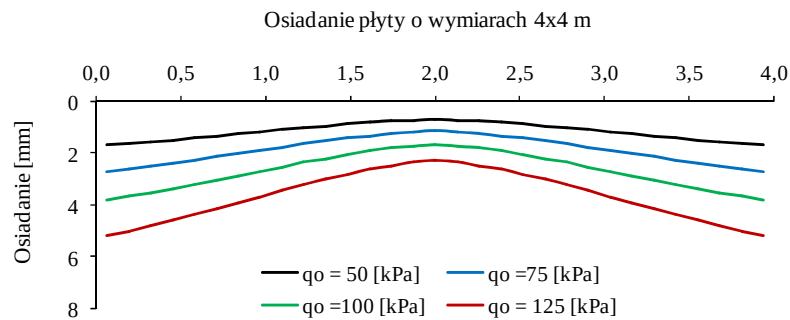
Rys. 6.24. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15 \text{ m}$ (pal I)



Rys. 6.25. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.30 \text{ m}$ (pal I)



Rys. 6.26. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)

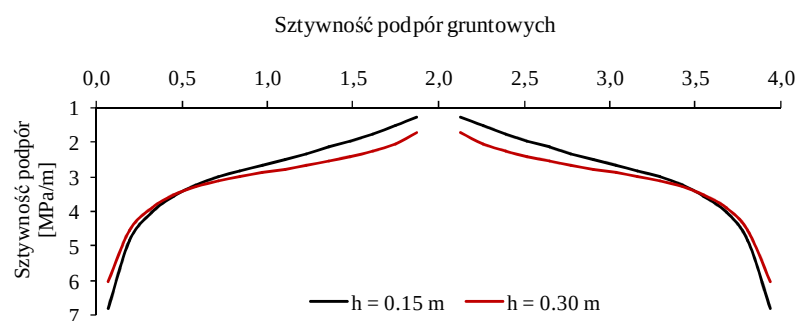


Rys. 6.27. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.30$ m (pal II)

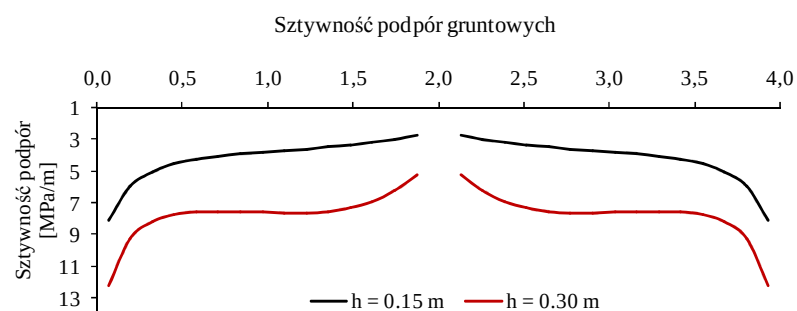
Obciążenie przyłożone do powierzchni płyty razem z krzywą charakteryzującą pracę pala w gruncie w istotny sposób wpływają na ugięcie i równomierność osiadania płyty. Powyższe parametry należy rozpatrywać łącznie z uwzględnieniem dodatkowo stanu i rodzaju podłoża pod płytą.

Analiza sztywności podpór gruntowych

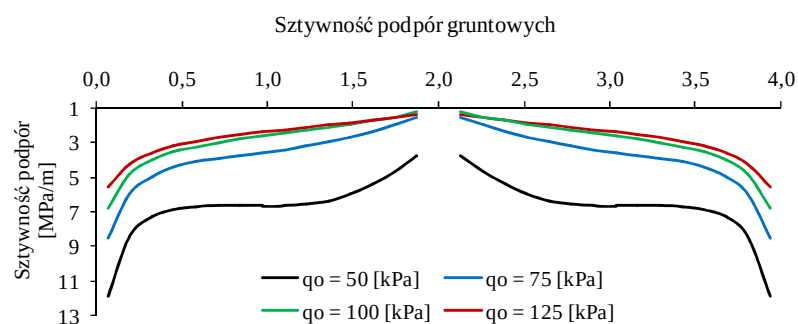
Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń (rys. 6.28 do 6.33) stwierdzić można, że analogicznie do płyty na podłożu maksymalne wartości sztywności podpór modelujących podłoże obserwujemy na krawędziach płyty. Najmniejsze wartości natomiast występują w bezpośrednim otoczeniu pala. Powyższe zjawisko jest wynikiem wpływu naprężenia generowanego przez mobilizację oporu pobocznicy i podstawy pala, redukującego naprężenia kontaktowe płyta-podłoże. Sztywność podpór modelujących podłoże w sposób istotny zależy od nośności pala, jego usytuowania na krzywej opisującej zależność obciążenie-osiadanie pod obciążeniem roboczym oraz od przebiegu tej krzywej. Dla pali wykazujących mniejsze osiadania wraz ze wzrostem siły w głowicy pala, będącej odpowiedzią na zwiększenie sztywności płyty, stwierdzamy wyraźne ograniczenie osiadania płyty. W związku z powyższym, w omówionym przypadku (pal II), charakterystyki podpór gruntowych w sposób istotny zależą także od sztywności płyty.



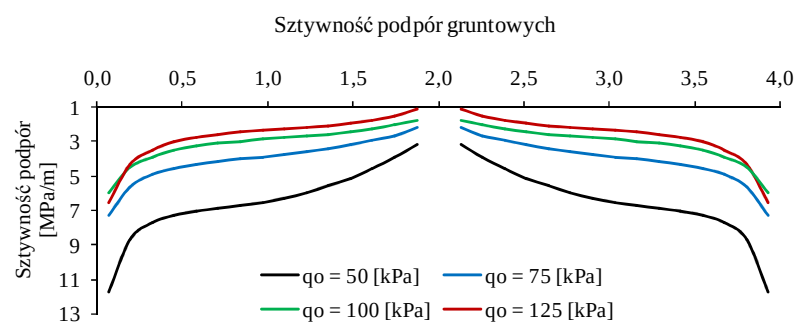
Rys. 6.28. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal I)



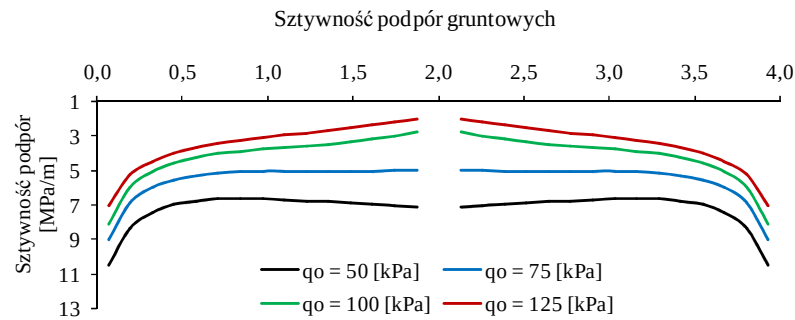
Rys. 6.29. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal II)



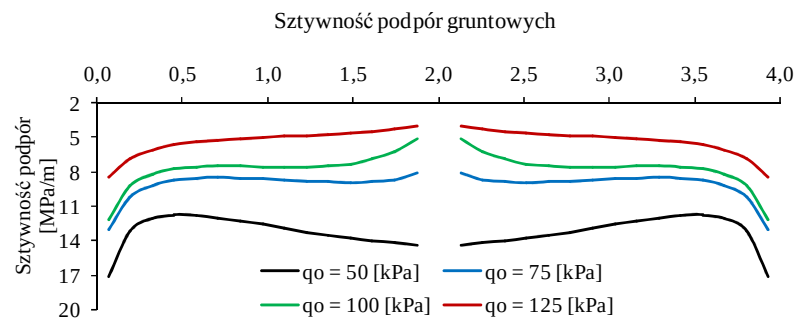
Rys. 6.30. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal I)



Rys. 6.31. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.30$ m, pal I)



Rys. 6.32. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal II)

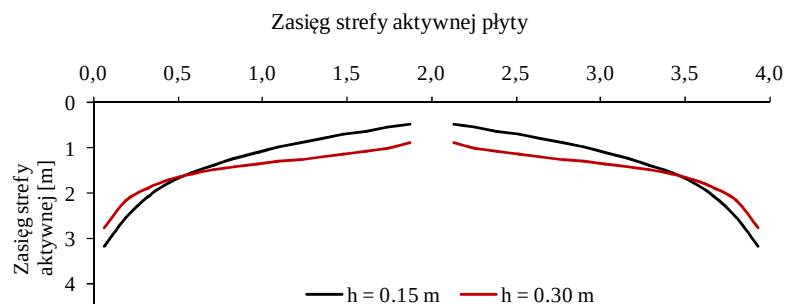


Rys. 6.33. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.30$ m, pal II)

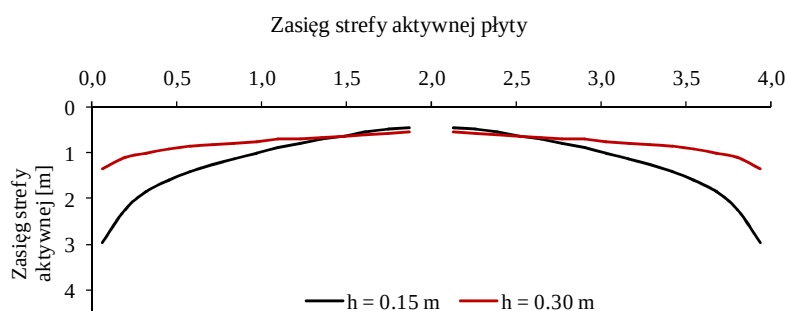
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że w analizie płyty spoczywającej na podłożu i palu, wyznaczenie wartości sztywności podpór modelujących podłoże i ich zmienności jest zagadnieniem złożonym. Wymaga rozpatrzenia sztywności płyty, rodzaju i charakterystyki pracy pala przy jednoczesnym uwzględnieniu wzajemnego oddziaływania dla zadanej wartości przyłożonego obciążenia i parametrów geotechnicznych podłoża.

Analiza zasięgu strefy aktywnej płyty spoczywającej na podłożu i pojedynczym palu

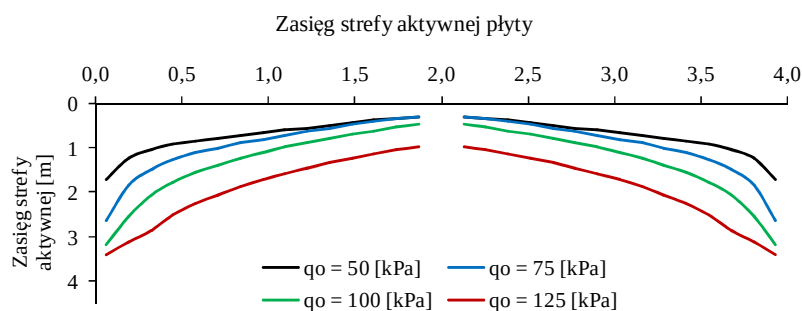
Wpływ pala na zasięg strefy aktywnej naprężenia płyty przedstawiono na rysunkach 6.34 do 6.39. Wyraźny wpływ naprężenia generowanego przez mobilizację oporu pobocznic i podstawy pala na naprężenia kontaktowe płyta-podłoże, odzwierciedla się w wartościach strefy aktywnej płyty. Zasięg strefy aktywnej zależy zatem od siły przyłożonej w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala. Ponadto, można wywnioskować wyraźny wpływ wzrostu sztywności płyty, wyrównującej jej osiadanie, na redukcję zasięgu strefy aktywnej dla pali wykazujących niewielkie osiadania (pal II) przy danym stopniu ich obciążenia.



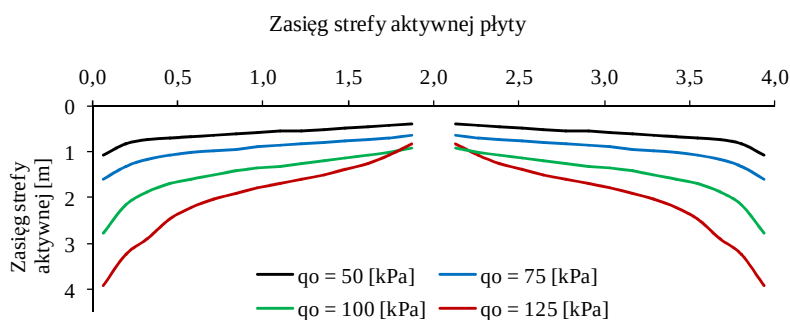
Rys. 6.34. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal I)



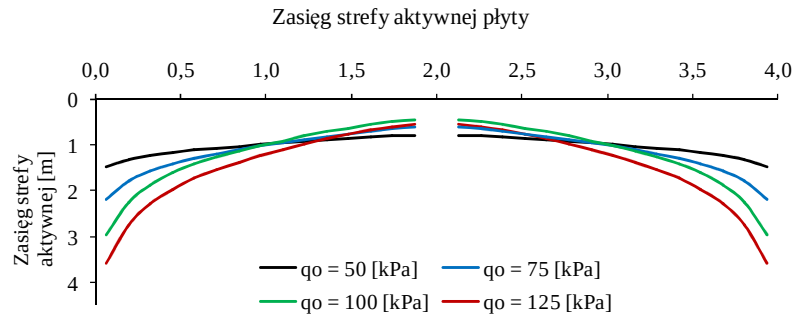
Rys. 6.35. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal II)



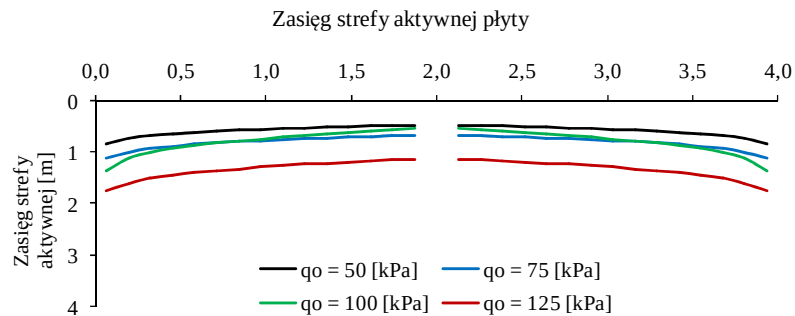
Rys. 6.36. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal I)



Rys. 6.37. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.30$ m (pal I)



Rys. 6.38. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)



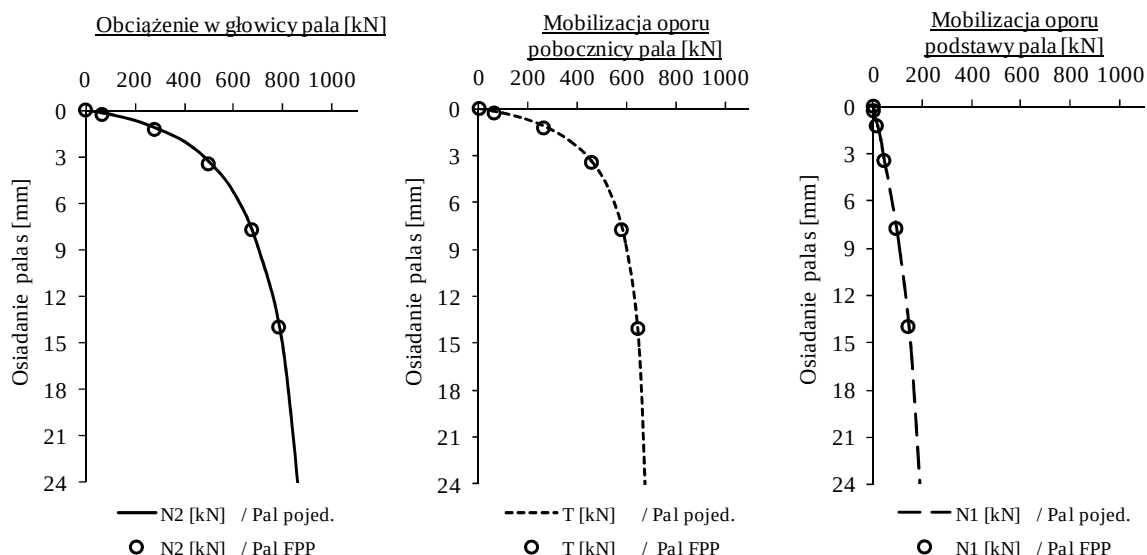
Rys. 6.39. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.30$ m (pal II)

Reasumując analizę strefy aktywnej naprężenia płyty spoczywającej na podłożu i palu można stwierdzić, że czynnikami istotnie na nią wpływającymi są sztywność i obciążenie płyty a w konsekwencji pala, jego rodzaj oraz towarzysząca mu mobilizacja oporu pobocznic i podstawy.

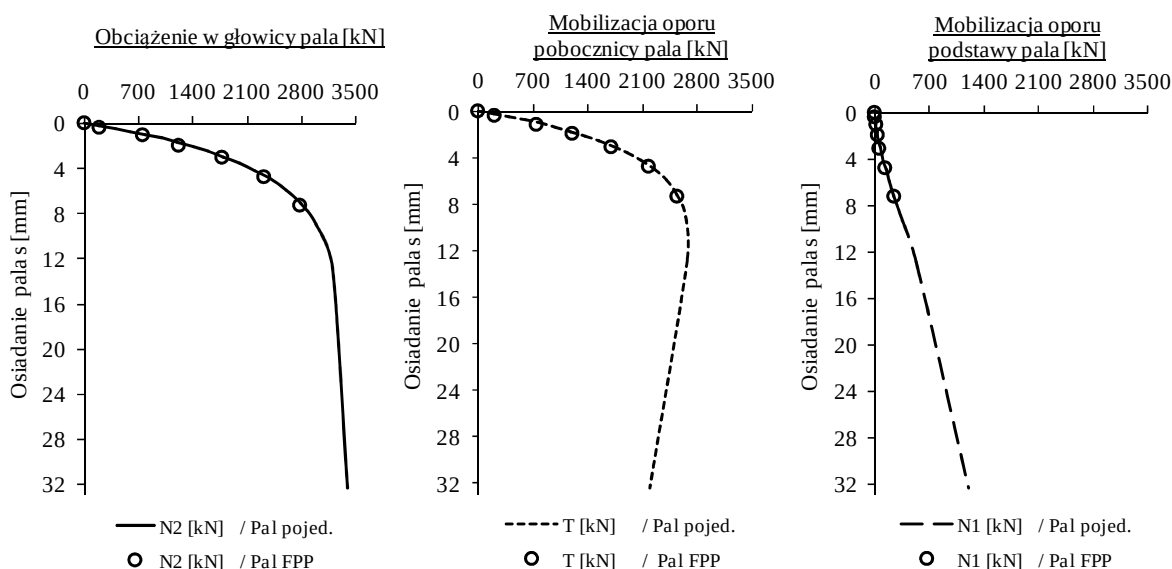
Analiza mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala

Mobilizacja oporów wokół pala występuje wraz z przemieszczeniem pala względem gruntu, wywołanego obciążeniem przyłożonym w głowicy. W omawianym przykładzie, analizę mobilizacji oporów przeprowadzono w zakresie obciążenia płyty odpowiednio dla pala pierwszego i drugiego od 0 do 125 kPa i 300 kPa (rys. 6.40 i 6.41). Analizie poddano także wpływ sztywności płyty na uzyskiwane wartości mobilizacji oporów wokół pala. Obliczenia wykonano dla dwóch reprezentatywnych grubości płyty, tj. 15 cm i 30 cm (rys. 6.42 i 6.43).

W analizowanych przypadkach pala współpracującego z płytą, mobilizacja oporów nie odbiega od wyników uzyskiwanych dla pojedynczego pala. Wynika to z faktu, że zasięg strefy aktywnej płyty jest mniejszy od długości pala. Zasięg ten wydziela miąższość gruntu, która ulega odkształceniu pod wpływem naprężenia kontaktowego płyta-podłoże. W konsekwencji naprężenia w gruncie generowane przez płytę nie wpływają na osiadanie pala, będące wynikiem jedynie obciążenia w głowicy.

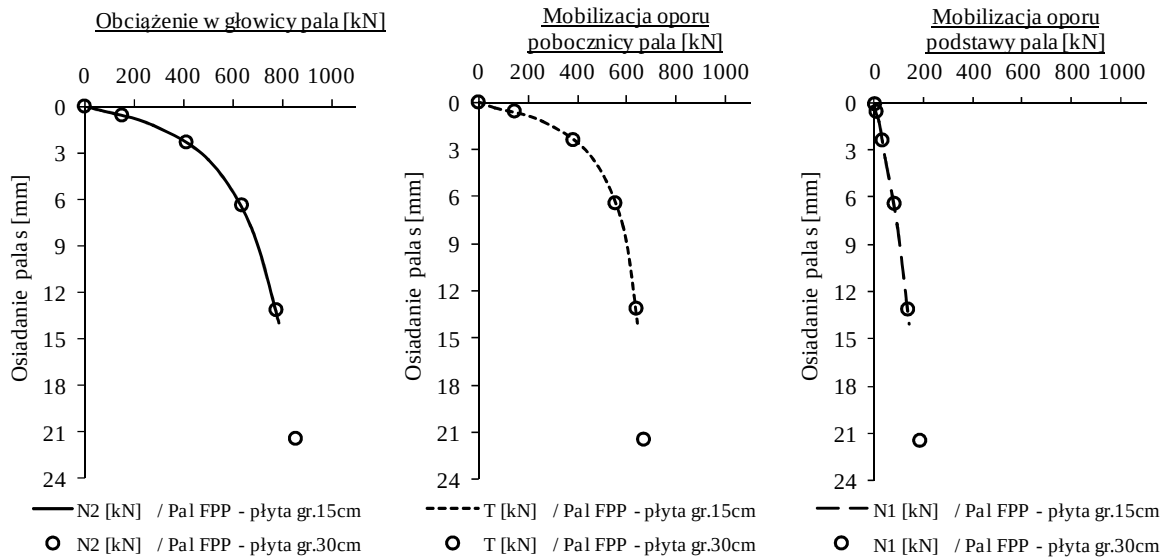


Rys. 6.40. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal I)

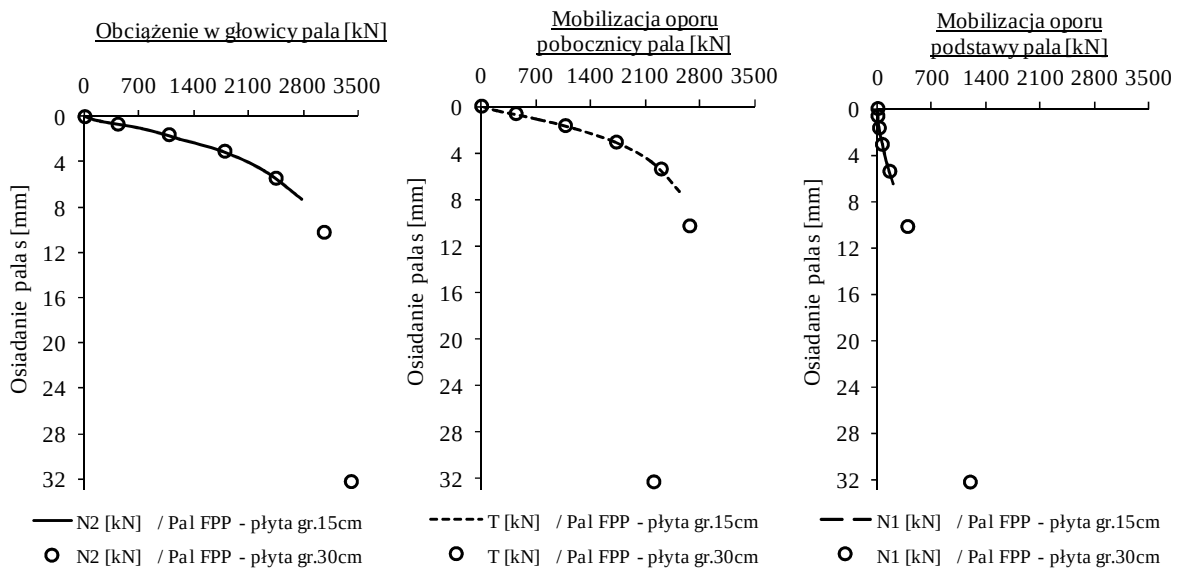


Rys. 6.41. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal II)

Na podstawie analizy wpływu sztywności płyty, stwierdzić można większy udział pala w przekazywaniu obciążenia na podłoże, wzrost siły w głowicy wraz ze wzrostem sztywności płyty. Prezentowane wyniki są zgodne z oczekiwaniami oraz wcześniejszą analizą wyników płyty spoczywającej na podłożu i pojedynczym palu.



Rys. 6.42. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z płytą (pal I)

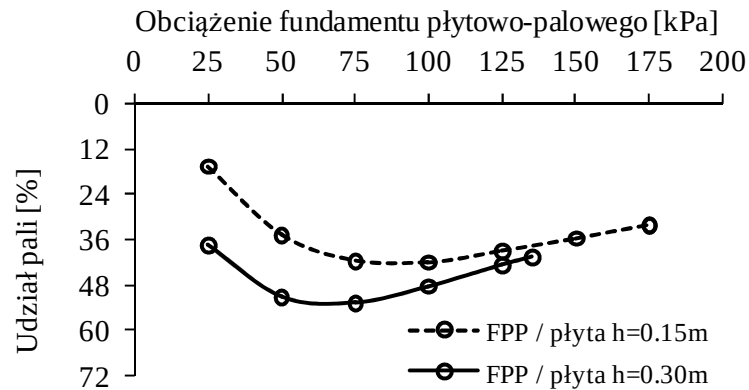


Rys. 6.43. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z płytą (pal II)

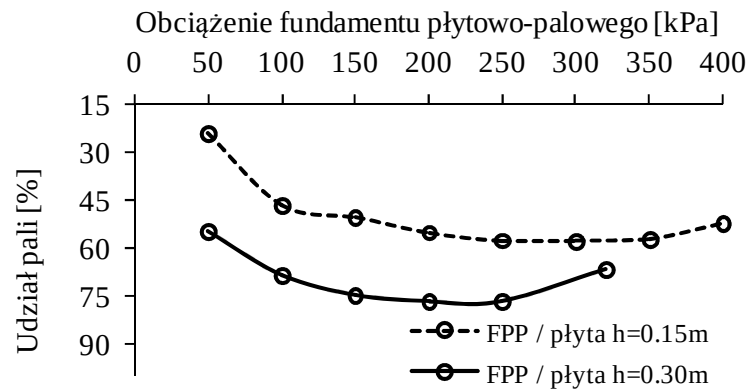
Analiza udziału pala w przekazywaniu obciążenia

Na podstawie eksperymentu numerycznego wpływu sztywności płyty na udział pala w przekazywaniu obciążenia na podłoże można stwierdzić, że sztywność płyty wpływa na rozdział obciążenia pomiędzy płytę a pal (rys. 6.44 i 6.45). Uzyskano maksymalny wzrost udziału pala wraz ze wzrostem sztywności płyty, scharakteryzowanej grubością 15 cm i 30 cm, dla analizowanego pala I i pala II odpowiednio o 21 % i 30 %. Największe różnice w udziale pala występują w początkowym zakresie obciążenia. Obliczone krzywe, prezentujące udział pala

w przekazywaniu obciążenia, charakteryzuje ekstremum dla określonego obciążenia i sztywności płyty.



Rys. 6.44. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal I)



Rys. 6.45. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal II)

Czynnikami wpływającym w sposób istotny na udział pala są obciążenie i sztywność płyty, a także nośność i przebieg krzywej obciążenie-osiadanie pala dla siły wywołującej dane osiadanie głowicy pala względem osiadania płyty, odpowiadających danym warunkom geotechnicznym podłoża.

6.3. Sprężysta płyta na podłożu i grupie pali (5 pali)

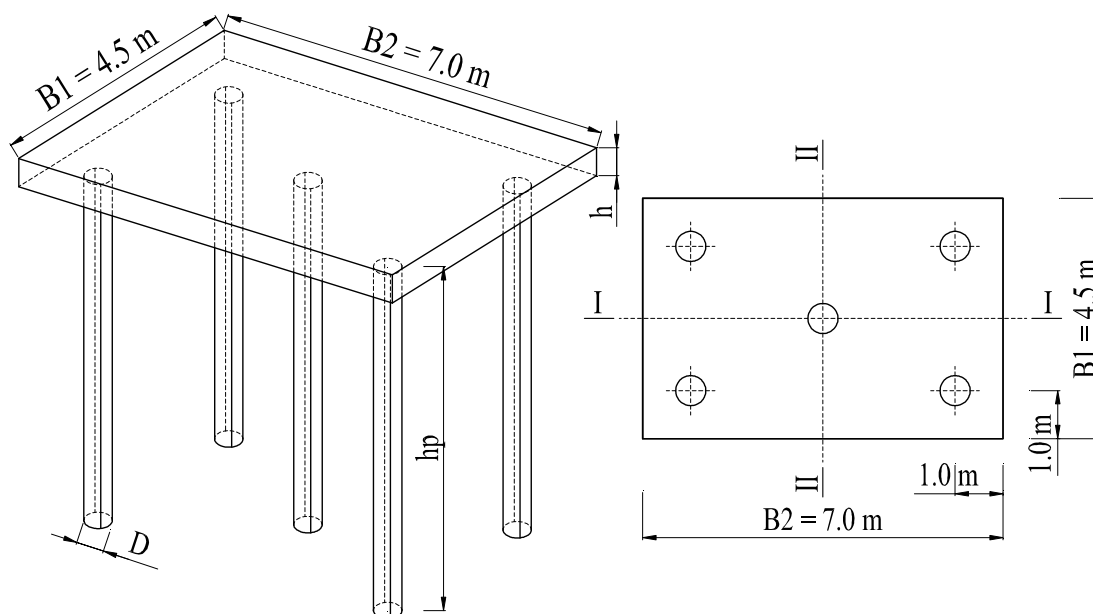
Przegląd rozwiązań, w zakresie analizy płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali, przeprowadzono na przykładzie płyty o wymiarach 4.5x7.0 m. Płyta spoczywa na podłożu i pięciu palach, o usytuowaniu przedstawionym na rysunku 6.46. Analizę uzyskanych rozwiązań przeprowadzono dla dwóch typów pali, osadzonych w odmiennych warunkach gruntowych (Tabl. 6.5 i 6.6).

Tabl. 6.5. Parametry geotechniczne - pal I

Rodzaj gruntu	Mięższość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]
ił pylasty	3.0	17	10	7.0
głina pylasta	6.5	20	21	24.6
ił pylasty	-	19	10	12.5

Tabl. 6.6. Parametry geotechniczne - pal II

Rodzaj gruntu	Mięższość warstwy	Ciężar obj. γ [kN/m ³]	Kąt tarcia wew. ϕ [°]	Moduł odkształcenia E_0 [MPa]
ił pylasty	5.0	17	10	7.0
piasek drobny	7.0	20	32	56.4
piasek drobny	-	20	32	60.0

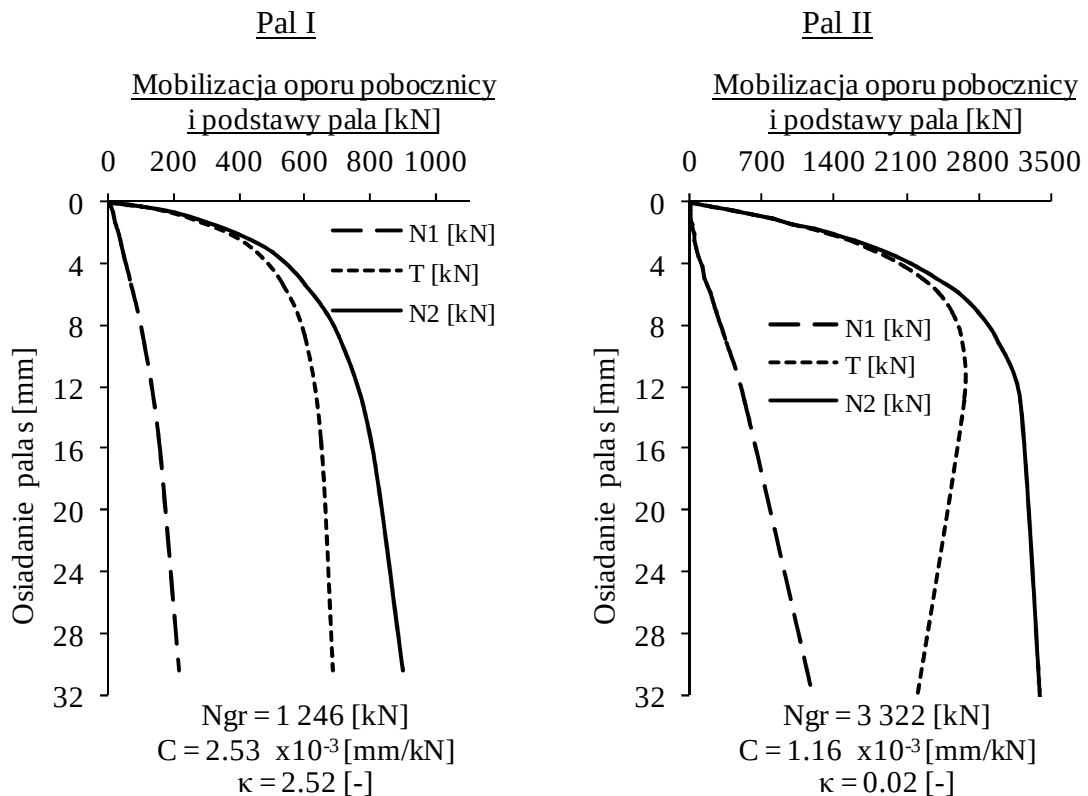


Rys. 6.46. Schemat analizowanego fundamentu - płyta na podłożu i grupie pali

W przeprowadzonym eksperymencie numerycznym wykorzystano te same dwa typy pali, których użyto podczas analizy płyty spoczywającej na podłożu i pojedynczym palu. Charakteryzują się one odmienną technologią wykonania oraz pracą w różnych warunkach gruntowych. Na podstawie wyników próbných obciążeń statycznych oraz metody MK, można przedstawić krzywą opisującą relację obciążenie-osiadanie pala w pełnym zakresie, z wydzieleniem oporu pobocznicy i podstawy pala (rys. 6.47).

Pale wykorzystane w eksperymencie:

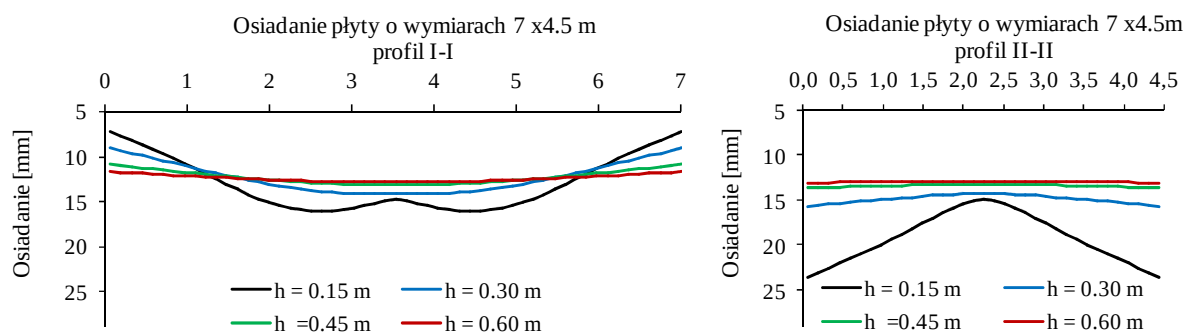
Pal I (pal wiercony nieprzemieszczeniowy)	- $h_p = 10.0$ m,	$D = 0.60$ m
Pal II (pal wbijany)	- $h_p = 13.5$ m,	$D = 0.508$ m



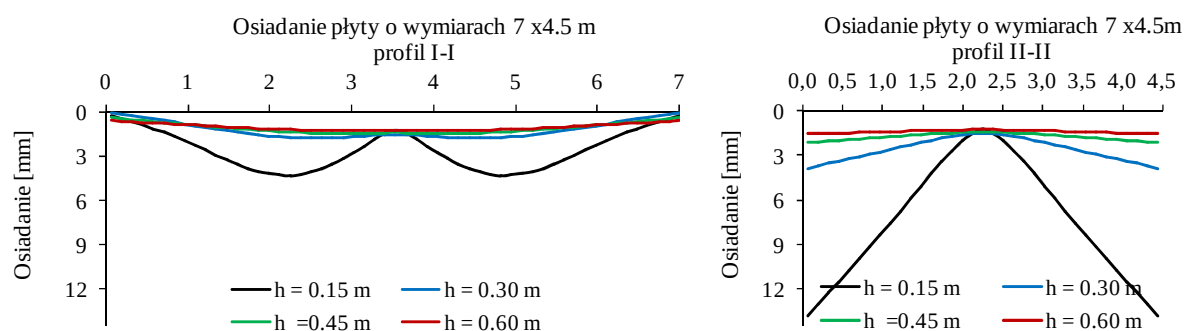
Rys. 6.47. Mobilizacja oporu pobocznicy i podstawy podczas próbnego obciążenia pala

Analiza osiadania i ugięcia płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali

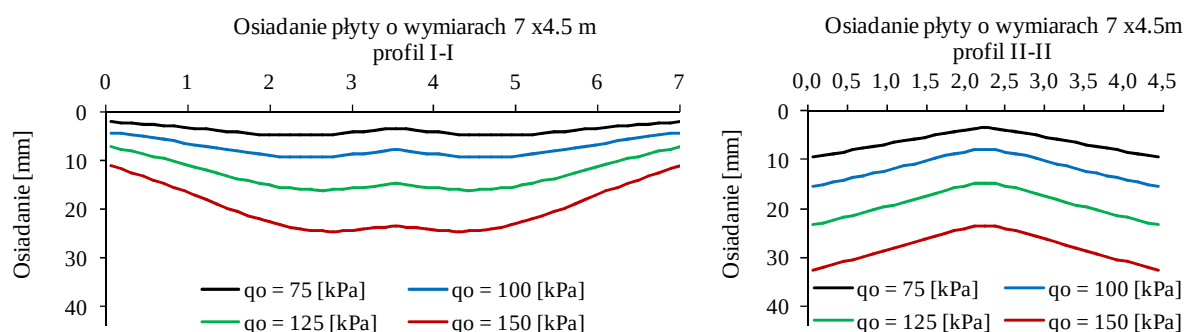
Analizę wpływu sztywności oraz obciążenia płyty przedstawiono na rysunkach 6.48 do 6.53. Przegląd uzyskanych wyników uwzględnia także rodzaj pala wyrażony relacją obciążenie-osiadanie z mobilizacją oporów wokół niego. Na podstawie uzyskanych wyników osiadania płyty można wywnioskować, że dla danego usytuowania i rozstawu pali w grupie, redukcja sztywności płyty wpływa na wzrost obciążenia przekazywanego przez pal centralny. Obrazuje to największe osiadanie w środku płyty, będące jednocześnie wynikiem pracy pali w grupie i nachodzeniem się stref naprężenia od poszczególnych pali. Zgodnie z oczekiwaniami wzrost sztywności płyty wpłynął na wyrównanie osiadania oraz zwiększenie równomierności obciążenia pali narożnych z palem centralnym. Wynika to ze stanu naprężenia w ośrodku gruntowym, jego podatności, redukcji ugięcia płyty zwieńczającej grupę pali, a zatem i wyrównania osiadania podłoża.



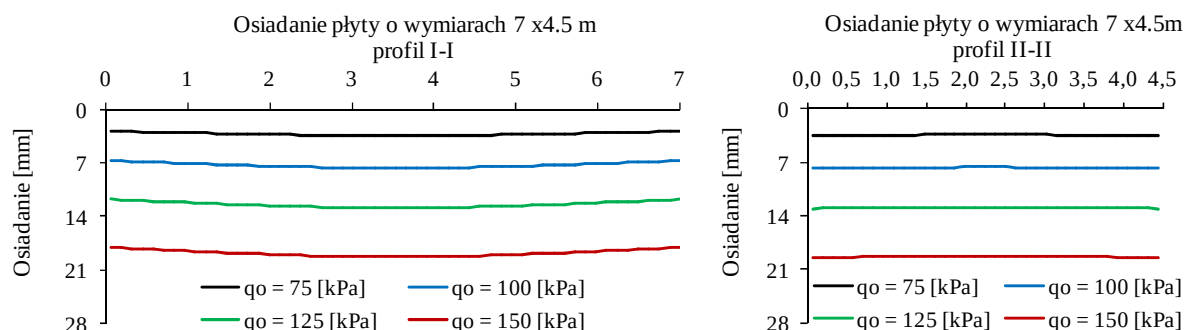
Rys. 6.48. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal I)



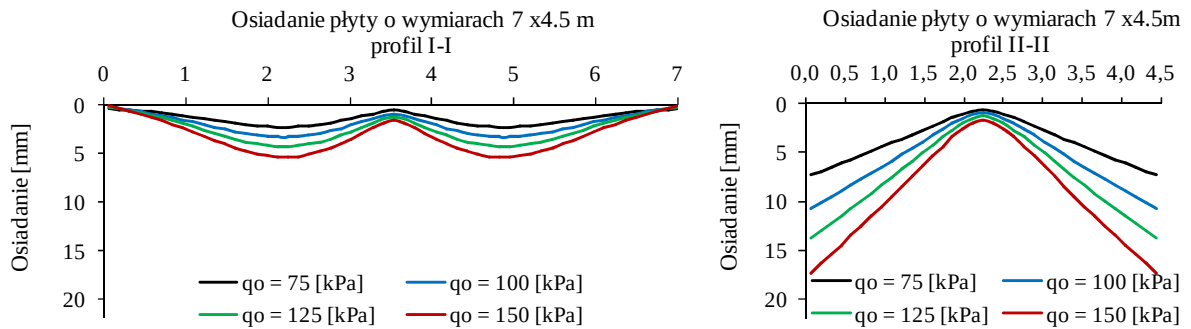
Rys. 6.49. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal II)



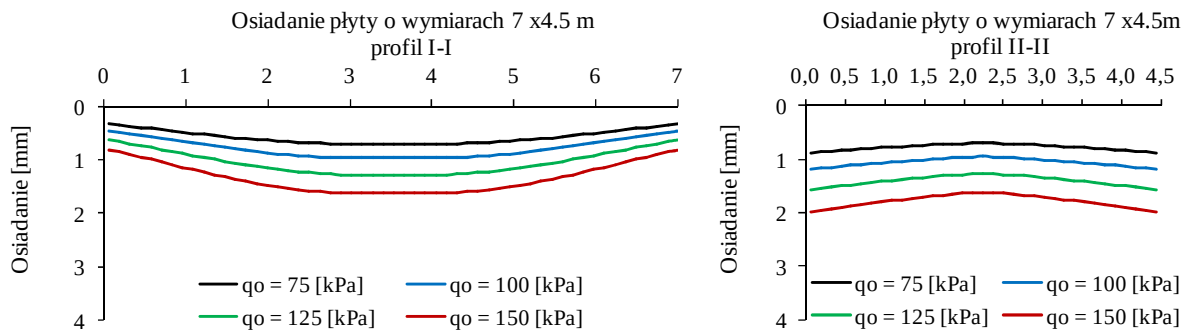
Rys. 6.50. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15$ m (pal I)



Rys. 6.51. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.60$ m (pal I)



Rys. 6.52. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)

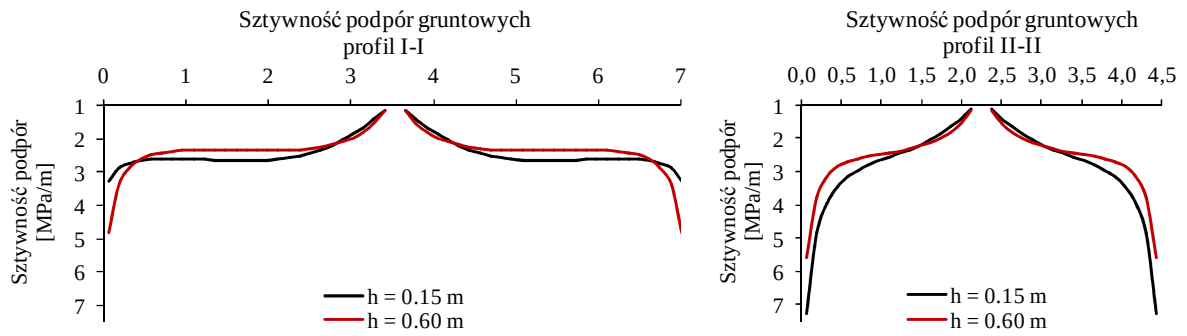


Rys. 6.53. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.60$ m (pal II)

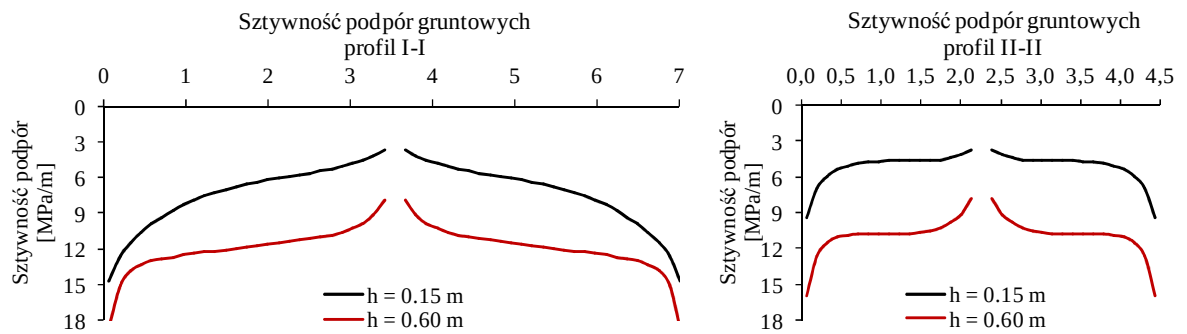
Czynnikami mogącym determinować osiadanie płyty są oczywiście pale. Wpływ ich zależy od osiadania danego pala w grupie pod wpływem obciążenia przyłożonego w głowicy, będącego wynikiem jego usytuowania w grupie, obciążenia płyty, jej sztywności w danych warunkach gruntowych.

Analiza sztywności podpór gruntowych

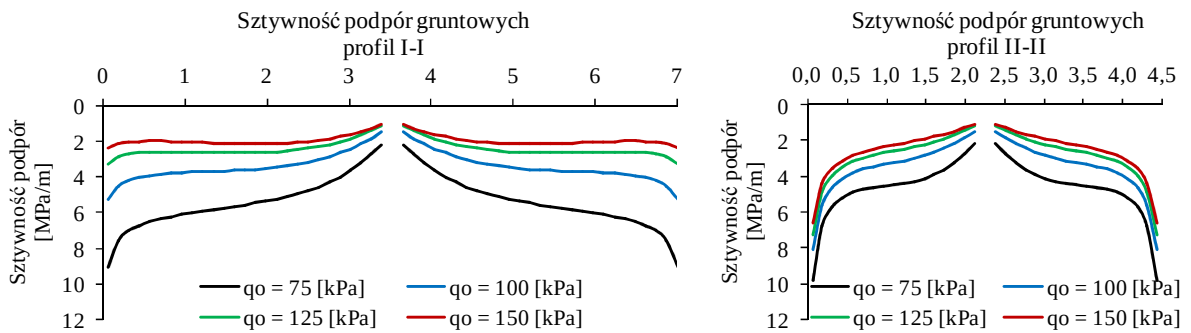
Rozkład wartości sztywności podpór modelujących podłoże w analizie płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali przedstawiono na rysunkach 6.54 do 6.59. Wyniki obliczeń pozwalają potwierdzić wnioski uzyskane podczas badań płyty na podłożu i pojedynczym palu. Obserwujemy ponadto wyraźny wpływ sztywności płyty na wartość charakterystyk podpór gruntowych, dla pali wykazujących zdolność do przeniesienia dodatkowego obciążenia przy niewielkim wzroście osiadania wygenerowanego zmianę sztywności płyty.



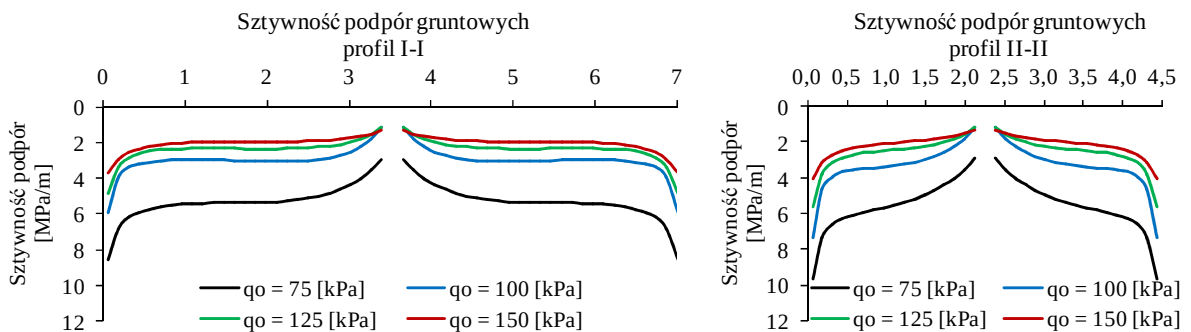
Rys. 6.54. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal I)



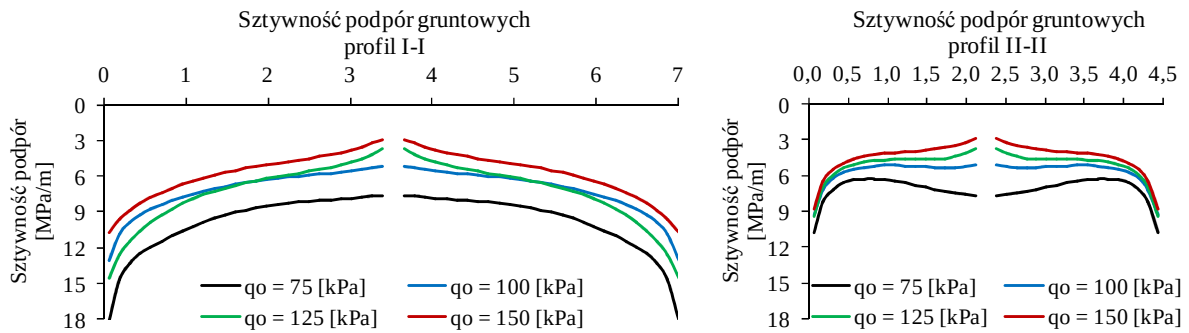
Rys. 6.55. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal II)



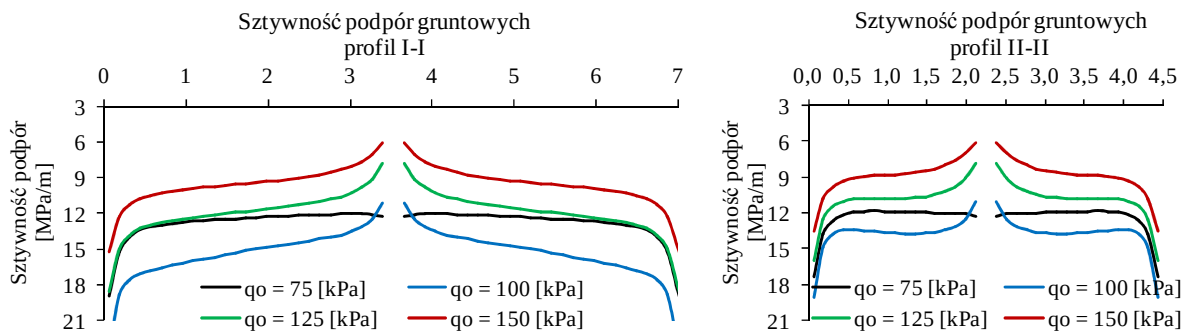
Rys. 6.56. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal I)



Rys. 6.57. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.60$ m, pal I)



Rys. 6.58. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal II)

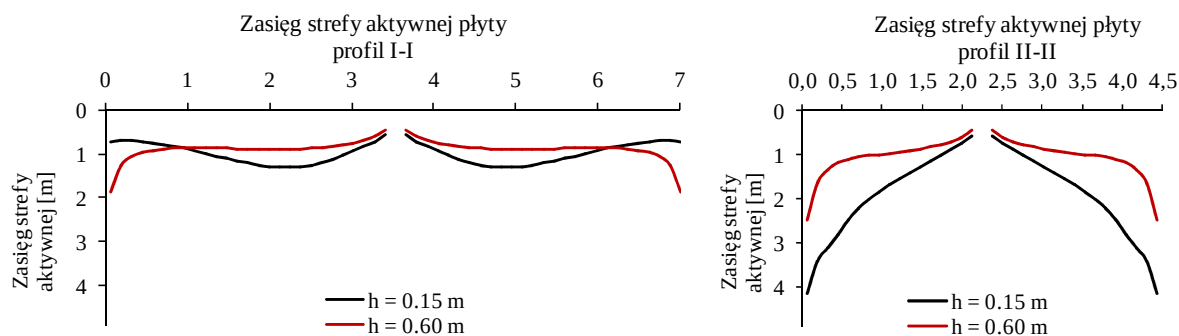


Rys. 6.59. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.60$ m, pal II)

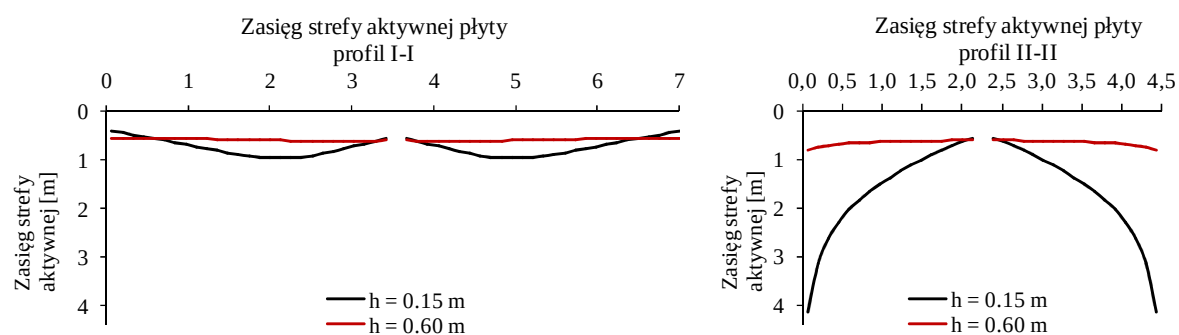
Przegląd uzyskanych wyników potwierdza złożoność wpływów poszczególnych parametrów na wartość sztywności podpór modelujących podłoże z uwzględnieniem osadzonych w nim pali. Zarówno parametry charakteryzujące płytę, pale jak i podłoże, należałoby rozpatrywać nierozdzielnie w celu wyznaczenia wartości i zmienności charakterystyk podpór gruntowych.

Analiza zasięgu strefy aktywnej płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali

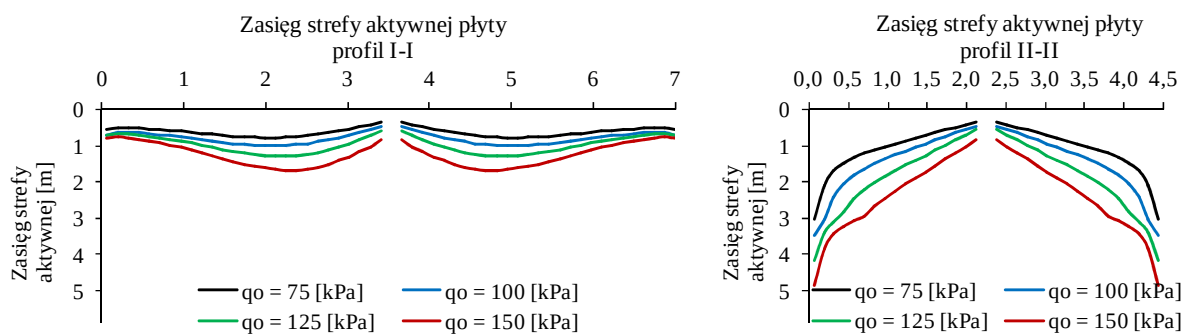
Wartości oraz rozkład zmienności zasięgu strefy aktywnej pod płytą spoczywającą na podłożu i grupie pali przedstawiono na rysunkach poniżej (rys. 6.60 do 6.65). Prezentowane wyniki obrazują zarazem charakter i zmienność naprężenia kontaktowego płyta-podłoże. Obserwujemy wyraźny wpływ występowania pala pod płytą na redukcję jej strefy aktywnej w bezpośrednim otoczeniu pala. Przyczyn powyższego zjawiska szukać należy we wpływie naprężenia generowanego przez mobilizację oporu pobocznic i podstawy pal na wartość naprężenia kontaktowego płyty.



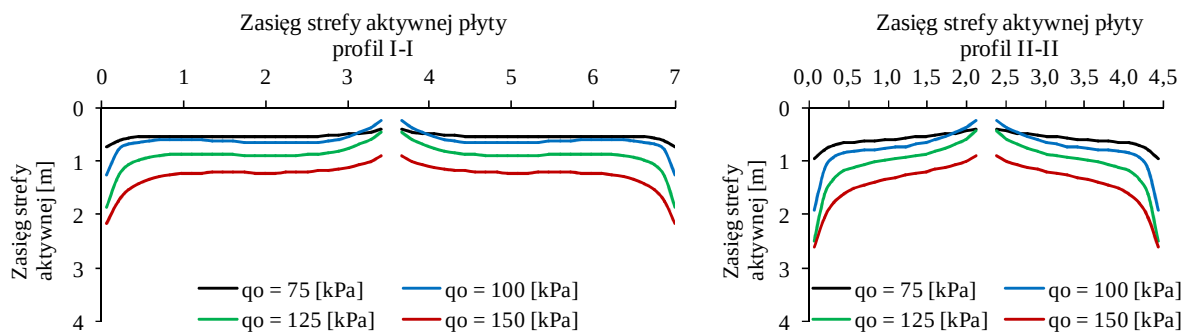
Rys. 6.60. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal I)



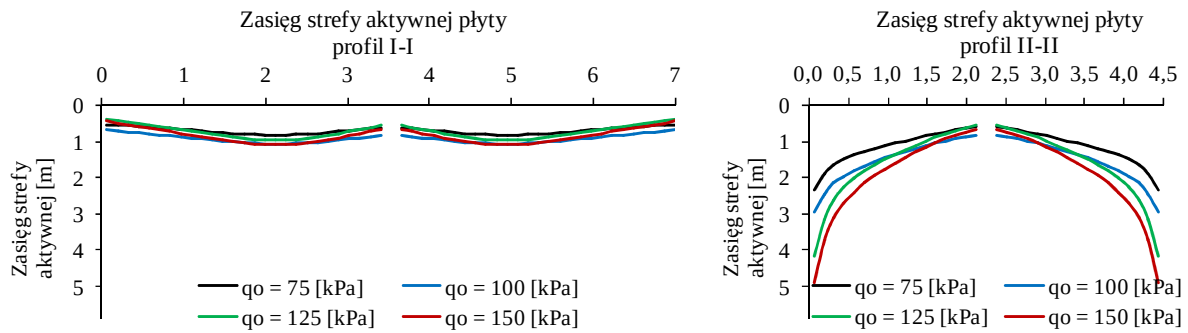
Rys. 6.61. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal II)



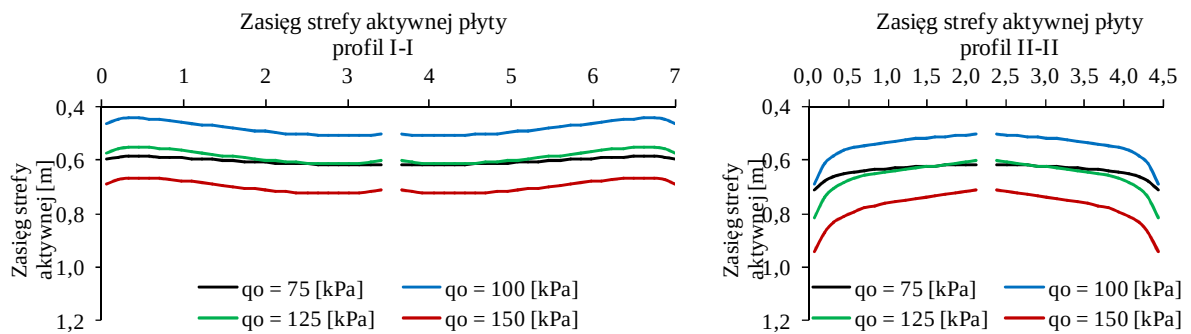
Rys. 6.62. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal I)



Rys. 6.63. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.60$ m (pal I)



Rys. 6.64. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)



Rys. 6.65. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.60$ m (pal II)

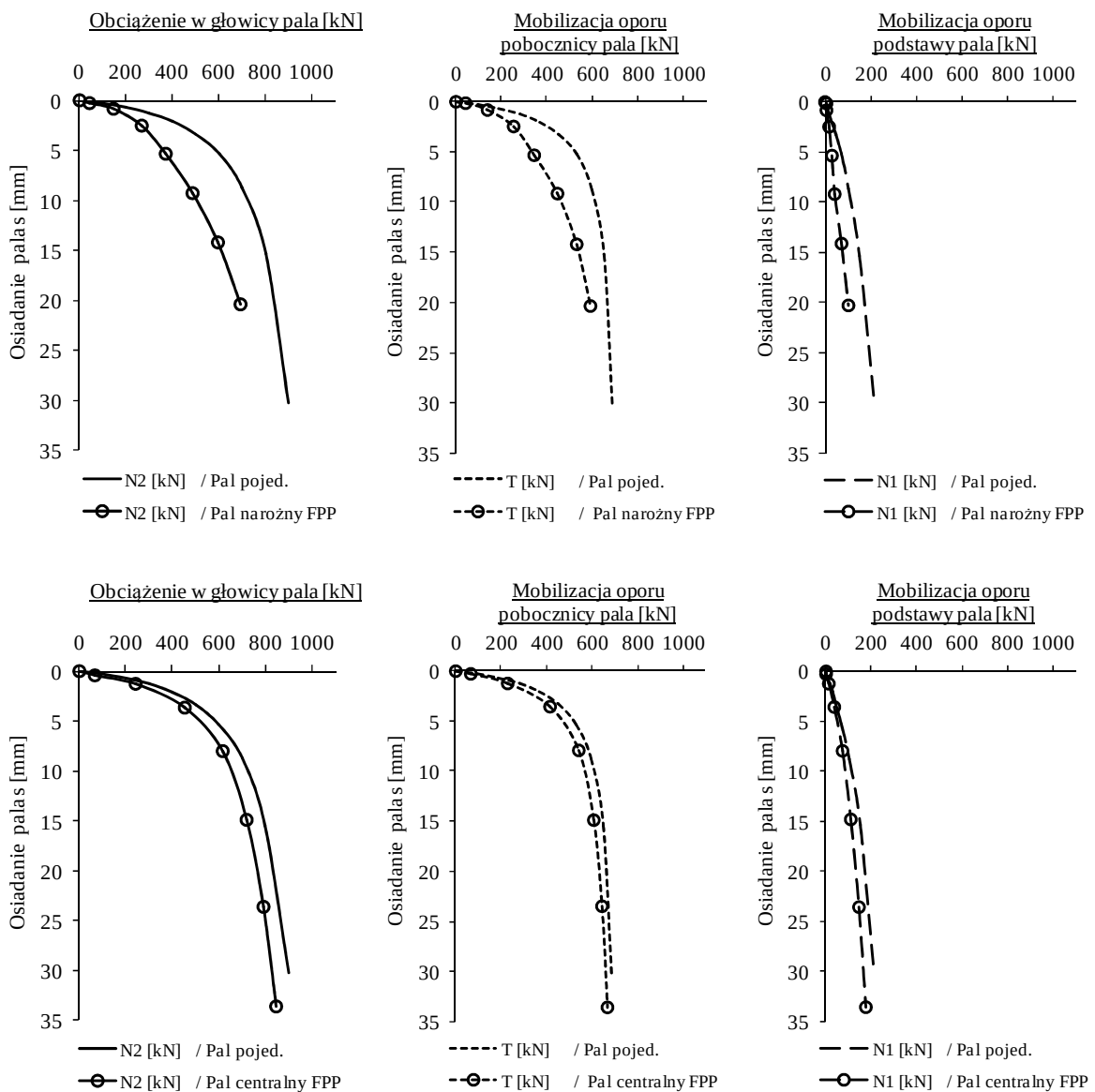
W analizie osiadania fundamentów wiedza na temat zasięgu strefy aktywnej naprężenia jest istotnym czynnikiem w uzyskaniu poprawnych wyników. Płyta fundamentowa spoczywająca na podłożu i grupie pali komplikuje wyznaczenie naprężenia kontaktowego, a w związku z powyższym zasięgu strefy aktywnej. Wyznaczenie jej związane jest z uwzględnieniem wzajemnej interakcji poszczególnych elementów przekazujących obciążenie na podłoże, przy uwzględnieniu charakterystyki pracy pali w grupie i sprężystych własności płyty.

Analiza mobilizacji oporu pobocznicy i podstawy pala

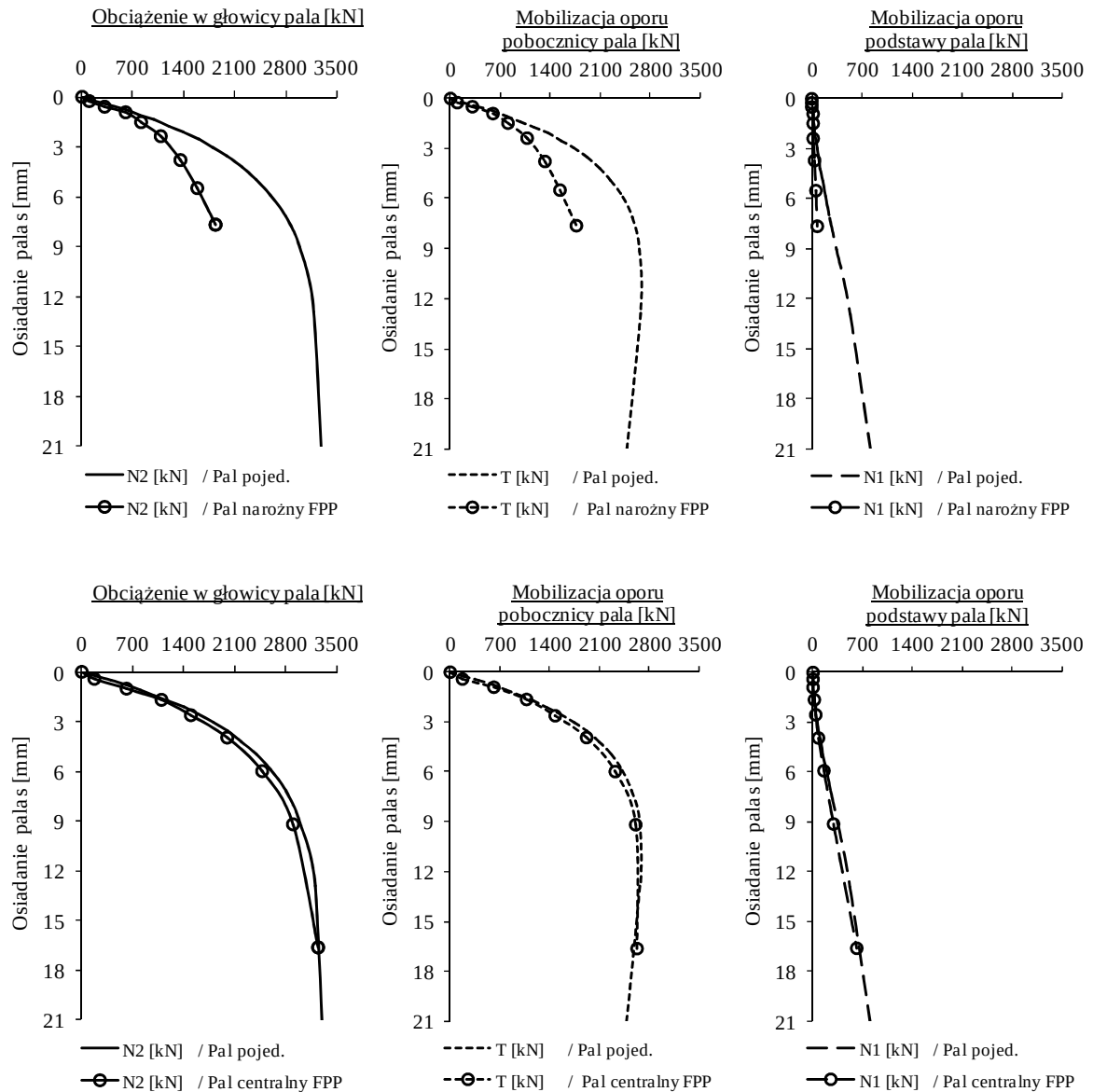
Poniżej przedstawiono uzyskane wyniki obliczeń mobilizacji oporów wokół pala, z uwzględnieniem pracy pala w grupie i współdziałania płyty (rys. 6.66 do 6.71). Analizie poddano sztywność płyty dla dwóch reprezentatywnych grubości 15 cm i 60 cm oraz usytuowanie pala na jej planie. Do badań wykorzystano dwa pale o odmiennej nośności i charakterystyce pracy w gruncie. W związku z powyższym analizę przeprowadzono w zakresie obciążenie dla pala I i pala II odpowiednio od 0 do 175 kPa i 400 kPa.

Dla pali pracujących w grupie z uwzględnieniem współpracy płyty, mobilizacja oporów wokół nich przebiega w sposób odmienny niż podczas analizy pala

pojedynczego. Przyczyny powyższego zjawiska odnaleźć można w stanie naprężenia w ośrodku gruntowym, od oddziaływania poszczególnych pali na siebie. Mobilizacja oporu pobocznicy i podstawy rośnie wraz ze wzrostem osiadania pala względem podłoża, co w analizowanym przykładzie związane jest z obciążeniem przyłożonym w głowicy pala. Osiadanie pali współdziałających z grupą i płytą zależy także od wzajemnego oddziaływania ich na siebie, co wpływa na większe osiadania przy danym stopniu obciążenia pala w głowicy (rys. 6.66 i 6.67). W związku z powyższym mobilizacja oporów wokół pala w grupie przy współpracy płyty występuje dla większych osiadań niż dla pala pojedynczego. W analizowanym przykładzie, ze względu na zasięg strefy aktywnej płyty, naprężenia kontaktowe płyta-podłoże nie wpływają na osiadanie pali.



Rys. 6.66. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal I)

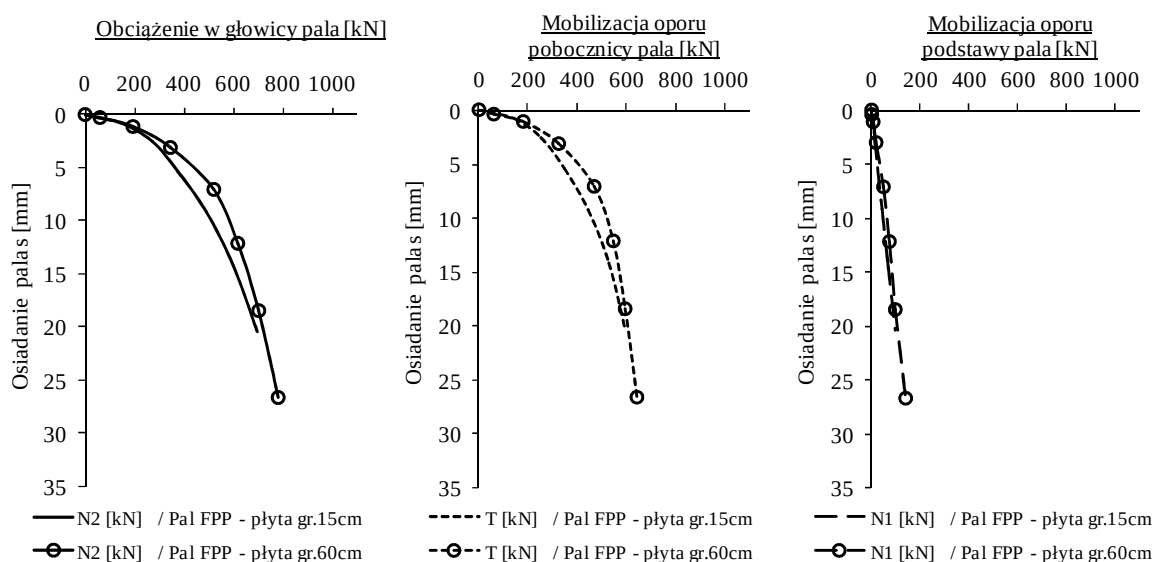


Rys. 6.67. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal II)

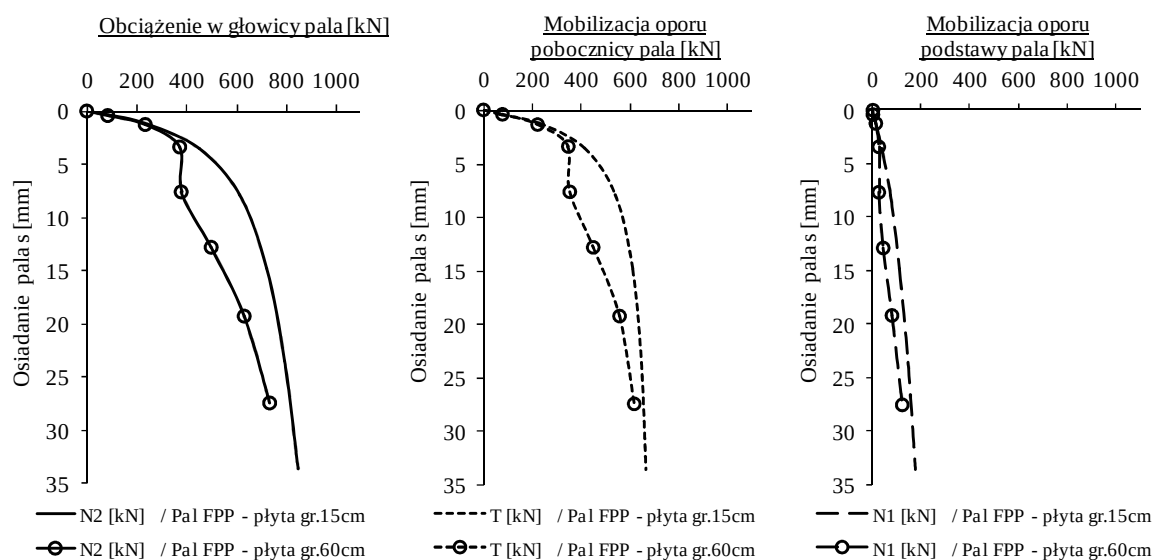
W opracowanym przykładzie dla płyty o niższej sztywności (grubość 15 cm) pal centralny jest bardziej obciążony, wykazując większe osiadanie w porównaniu z palami narożnymi. Opory wokół pala centralnego, a zatem i naprężenia przez niego generowane w ośrodku gruntowym, w większym stopniu wpływają na osiadanie pali sąsiednich. Stan ten odzwierciedla się większą rozbieżnością mobilizacji oporu gruntu względem osiadania dla pali narożnych w zestawieniu z palem pojedynczym.

Wpływ sztywności płyty w istotny sposób wpływa na obciążenie przekazywane przez poszczególne pale w grupie. Po pierwsze, co jest zgodne z oczekiwaniami, wzrost sztywności płyty wpływa na wyrównanie osiadań. W opracowanym przykładzie płyty o niższej sztywności charakteryzują się przekazywaniem największego obciążenia przez

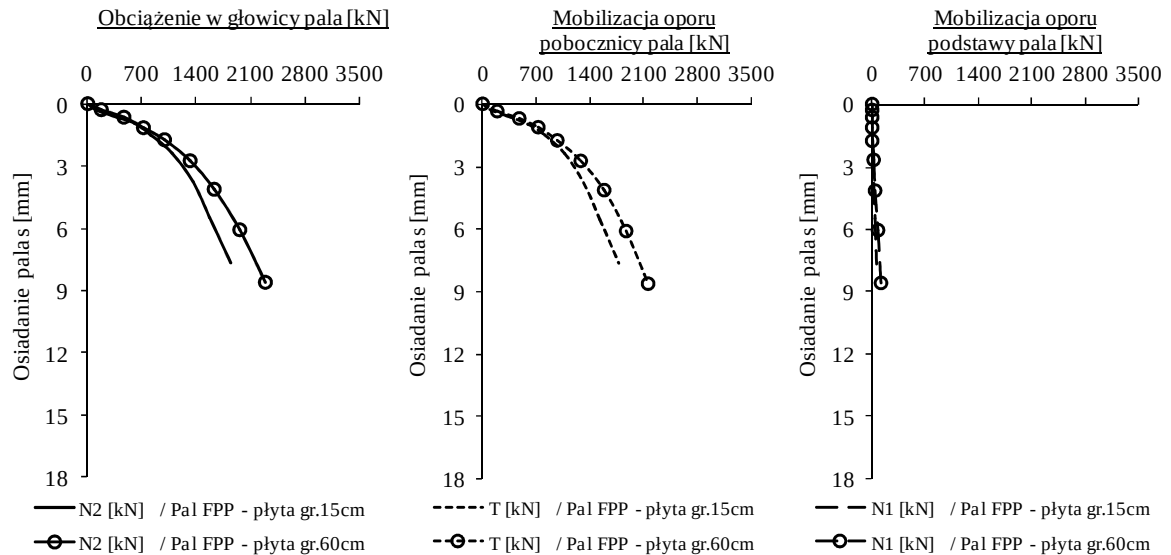
pal centralny. Natomiast dla płyty o grubości 60 cm, obserwujemy znaczny wzrost udziału pali narożnych w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Dla pala I przy płycie grubości 60 cm stwierdzono większą siłę w głowicy pali narożnych w porównaniu z palem centralnym, natomiast dla pali II można zaobserwować znaczne wyrównanie obciążeń przekazywanych przez wszystkie pale.



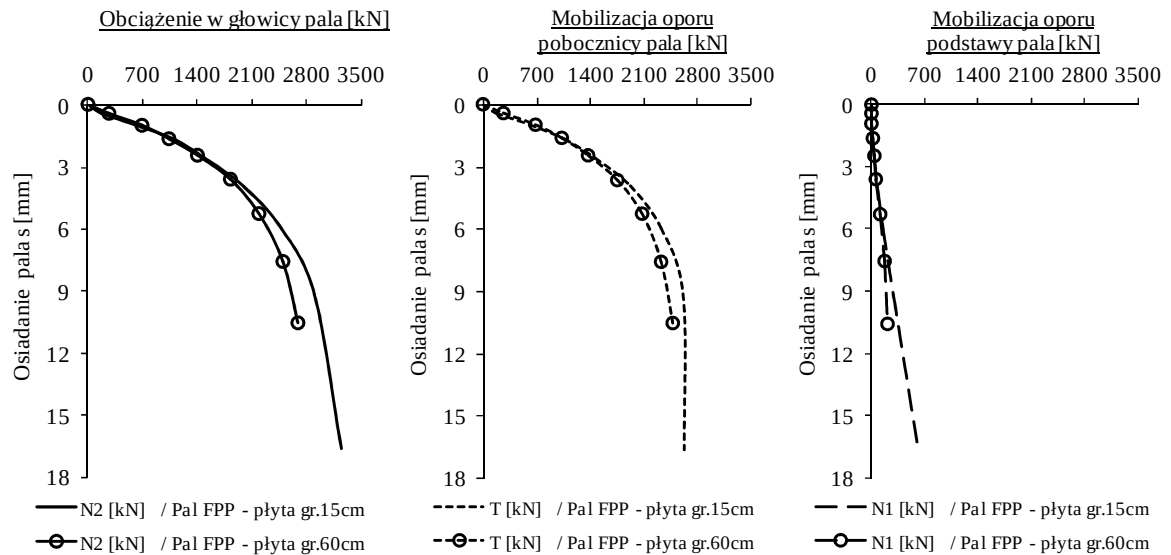
Rys. 6.68. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal narożny (pal I)



Rys. 6.69. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal centralny (pal I)



Rys. 6.70. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal narożny (pal II)



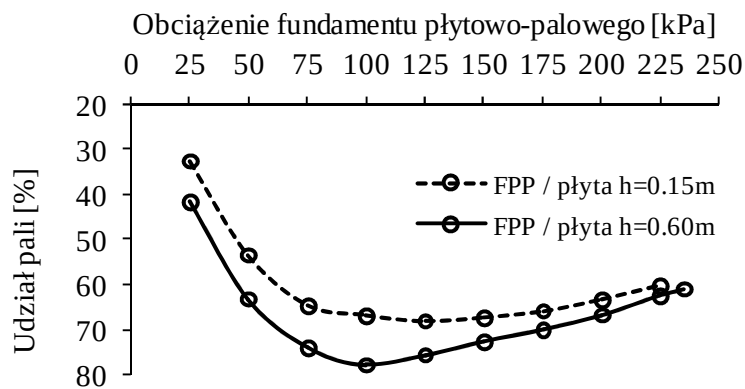
Rys. 6.71. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal centralny (pal II)

Wyniki zaprezentowane na rysunku 6.69 wyraźnie obrazują wpływ sztywności płyty na wartość mobilizacji oporów przy danym stopniu obciążenia pala w głowicy. Dla płyty o grubości 60 cm, pal centralny osiadł niemal bez wzrostu przekazywanego przez niego obciążenia. Związane jest to z wymuszonym sztywnością płyty, oddziaływaniem pali narożnych na stan naprężenia w otoczeniu pala centralnego.

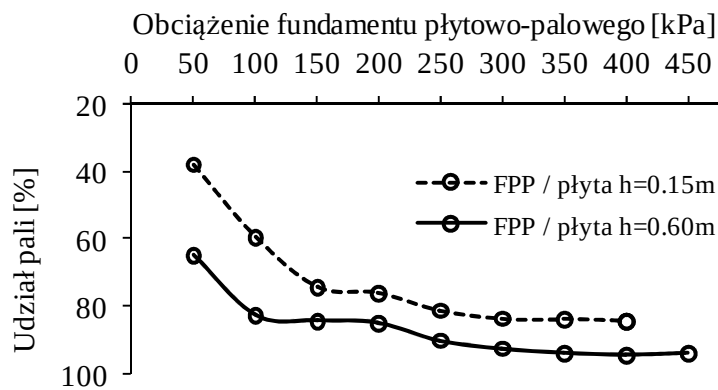
Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu numerycznego można wnioskować, że mobilizacja oporu poboczniczy i podstawy pala w grupie przy współpracy płyty w sposób istotny zależy od sztywności płyty, usytuowania pala w grupie i na planie płyty oraz wielkości wzajemnych oddziaływań pomiędzy płytą, palami i podłożem.

Analiza udziału pali w przekazywaniu obciążenia

Analiza rozdziału obciążenia pomiędzy płytę a pale nierozdzielnie wiąże się z rodzajem pala i warunkami geotechnicznymi podłoża, tzn. wielkością osiadania pala od siły w głowicy względem osiadania płyty, dla danego stopnia ich obciążenia. Charakterystyka pracy pala, sztywność płyty, z uwzględnieniem geotechnicznych warunków podłoża pod danym obciążeniem, determinują udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Wpływ rodzaju pala i sztywności płyty na rozdział obciążenia przedstawiono na rysunkach poniżej.



Rys. 6.72. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal I)



Rys. 6.73. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal II)

Udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże rośnie razem ze sztywnością płyty. W analizowanym przykładzie wzrost sztywności płyty scharakteryzowanej grubością 15 cm i 60 cm, dla pala I i pala II wpłynął na większy udział pali o średniej wartości wynoszącej odpowiednio 8 % i 13 % w analizowanym zakresie obciążenia. Natomiast maksymalna różnica w rozdziale obciążenia wynosiła odpowiednio 11 % i 27 %. W obu rozpatrywanych przypadkach udział pali rośnie wraz ze wzrostem obciążenia przyłożonego do powierzchni płyty, do pewnej wartości. Przekroczenie jej rozpoczyna proces zmniejszania udziału pali. Przyczyn omówionego zjawiska szukać

należy w obciążeniu pala i odpowiadającego mu osiadaniu. Dokładniej zaś w nieproporcjonalnym wzroście osiadania dla kolejnych stopni obciążenia, co odzwierciedla nieliniową charakterystyką pracy pala.

7. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE

7.1. Wprowadzenie do praktycznego wykorzystania modelu matematycznego

Proponowany model matematyczny, służący analizie fundamentów płytowo-palowych, bazuje na wyznaczeniu sztywności podpór modelujących podłoże i pale. Powszechnie uznaje się, że najpewniejszą metodą uzyskania tych parametrów jest badanie podłoża płytą statyczną oraz pali wykonując próbne obciążenie statyczne. Niestety wyniki tych badań jesteśmy w stanie uzyskać dopiero podczas realizacji robót budowlanych, wykonując wykop na odpowiednią rzędną oraz wykonując pale.

Wyznaczenie sztywności podłoża na wstępnym etapie analizy jest możliwe w oparciu o dokumentację badań podłoża gruntowego, wykorzystując w tym celu moduł odkształcenia gruntu bądź edometryczny moduł ściśliwości. Z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, można tego dokonać w oparciu o jedną z metod opisanych w pracach [58,106,111]. Niewątpliwie trudniejszym zagadnieniem jest wyznaczenie realnej sztywności podpór modelujących pale.

Przy dużych inwestycjach racjonalne jest wykonanie w pierwszej kolejności pali służących próbnemu obciążeniu statycznemu w celu weryfikacji metody obliczeniowej określającej zachowanie pala pod obciążeniem. Test statyczny umożliwia także, przy wykorzystaniu znajomości parametrów geotechnicznych podłoża, zaprojektowanie palowania zasadniczego z optymalizacją kosztów i czasu jego wykonania. Powyższe podejście jest praktykowane jedynie przy dużych inwestycjach, w których korzyści z niego płynące przewyższają możliwość wystąpienia przerw pomiędzy palowaniem wstępnym a zasadniczym bądź kosztami związanymi z dodatkową mobilizacją sprzętu.

Niemożliwe jest z powyższych względów powszechne stosowanie opisanego podejścia podczas realizacji fundamentów płytowo-palowych. Dlatego też wielką rolę praktyczną odgrywają obecnie bazy wyników próbnych obciążeń pali z rozpoznaniem warunków gruntowych, będące bardzo cennym źródłem danych do projektowania. Bazami takimi dysponują przede wszystkim firmy zajmujące się wykonawstwem robót palowych, a w ramach prowadzonej działalności także projektowaniem. Wyniki próbnych obciążeń statycznych z porównywalnych doświadczeń mogą zostać wykorzystane w analizie fundamentu płytowo-palowego proponowanym modelem matematycznym, bez konieczności wykonywania wstępnego palowania. W takiej

sytuacji próbne obciążenia statyczne pali pełnią jedynie funkcję weryfikującą poprawność przyjętych założeń.

W przekonaniu autora proponowany model matematyczny zyskuje istotne znaczenie praktyczne, w połączeniu z zawartą w Eurokodzie 7 metodą projektowania pali na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych.

Aktualne pozostaje pytanie, czy istnieje możliwość wykorzystania omawianego modelu matematycznego jedynie na podstawie wyników badań podłoża? Aby na nie odpowiedzieć warto zwrócić uwagę, że opracowana metoda analizy fundamentów płytowo-palowych bazuje na krzywej obciążenie-osiadanie pala pod obciążeniem przyłożonym w jego głowicy. Dlatego też wykorzystanie modelu matematycznego jedynie na podstawie badań podłoża związane jest z możliwością oszacowania na ich podstawie krzywej prezentującej zachowanie pala pod obciążeniem. Na potrzeby prowadzonej analizy posadowienia można wykorzystać m.in. metodę funkcji transformacyjnych Gwizdały [25,26] bądź metodę Meyera [59].

W niniejszym rozdziale wykorzystano zależności autorstwa Meyera umożliwiające oszacowanie parametrów krzywej MK, bazujące na wynikach badań podłoża. Do tego celu posłużyły przedstawione już wzory (4.35) do (4.37). Obliczenia zachowania fundamentów palowych i płytowo-palowych przeprowadzono dla takich samych fundamentów jakie posłużyły weryfikacji modelu matematycznego. W rozdziale piątym przedstawiono profile geotechniczne oraz ogólną charakterystykę wykorzystanych obiektów, dlatego też poniżej zostaną zaprezentowane jedynie uzyskane wyniki obliczeń.

7.2. Fundament palowy

Analizę zachowania fundamentów palowych przeprowadzono dla trzech podpór estakady drogowej w ciągu ul. Elbląskiej w Gdańsku, wykorzystując w tym celu jedynie wyniki badań podłoża. Uśrednione profile geotechniczne przedstawiono w tabelach 5.1, 5.2 i 5.3. Na ich podstawie oraz wykorzystując wzory (4.35) do (4.37) oszacowano parametry krzywych opisujących relację obciążenia-osiadanie pali poszczególnych podpór (Tabl.7.1). Charakterystyka krzywych MK umożliwiła przeprowadzenie oraz prezentację wyników obliczeń uzyskanych przy wykorzystaniu omawianego modelu matematycznego. Poniżej przedstawiono uzyskane wyniki

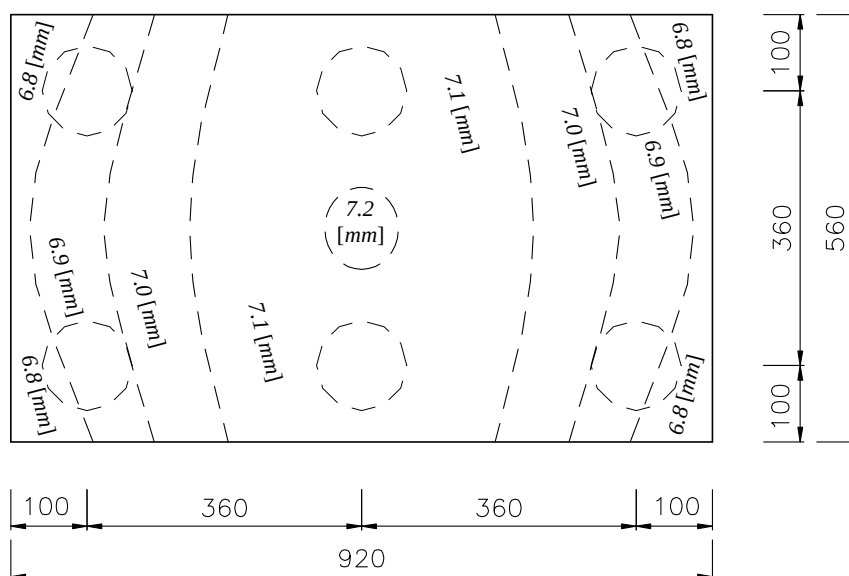
osiadania podpór oraz obciążenie poszczególnych pali z mobilizacją oporów ich pobocznic i podstaw.

Tabl. 7.1. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pali poszczególnych podpór

Parametry krzywej Meyera-Kowalowa	Podpora II $h_p = 12.0$ m	Podpora III $h_p = 10.0$ m	Podpora IV $h_p = 11.0$ m
κ [-]	0.46	0.34	0.40
$C \times 10^{-3}$ [mm/kN]	2.33	2.75	2.52
N_{gr} [kN]	13 459	11 380	12 417

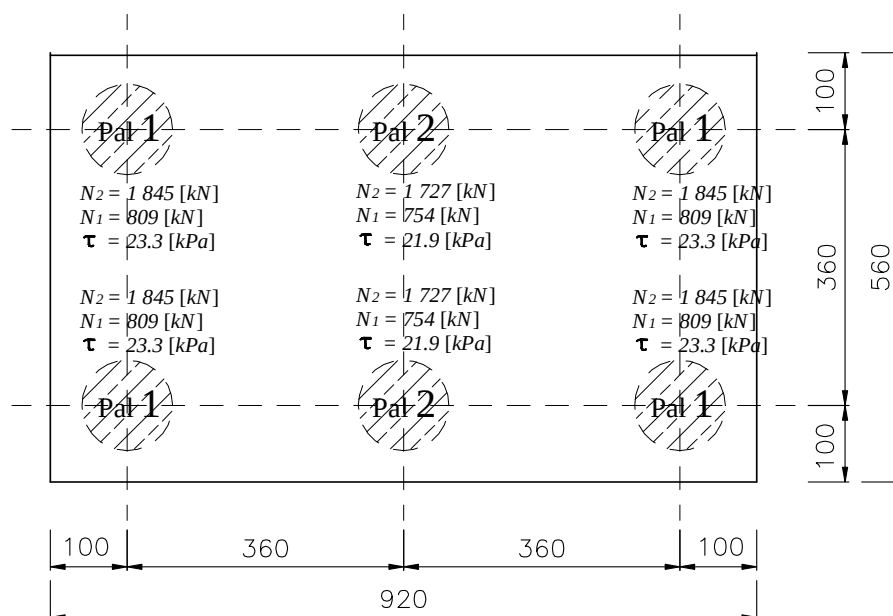
- Podpora II

Osiadanie zmierzone na podporze II wynosi $s_{pom} = 8.5$ mm, natomiast osiadanie obliczone na podstawie opracowanego modelu matematycznego przedstawiono poniżej:



Rys. 7.1. Obliczone osiadanie oczepu podpory II. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku

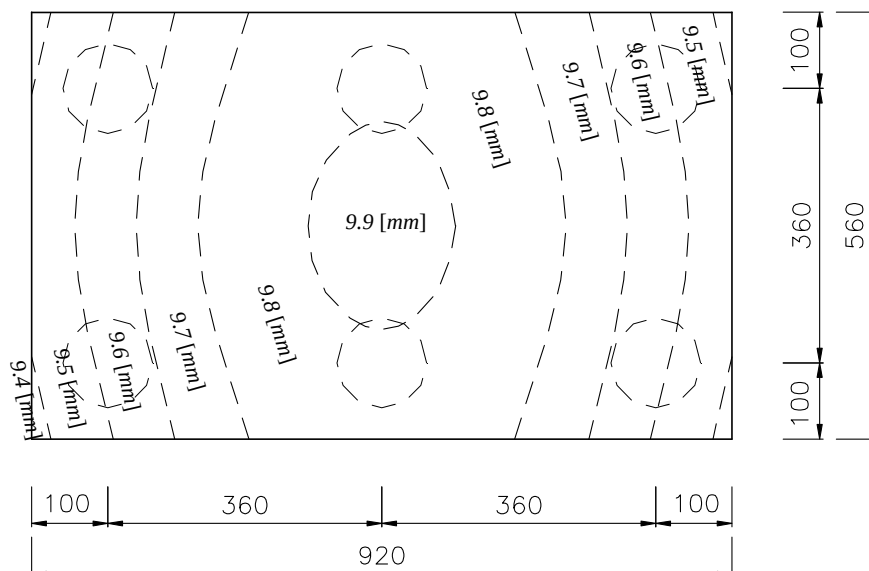
Wyznaczoną na podstawie obliczeń wartość mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali podpory II przedstawiono na rysunku poniżej:



Rys. 7.2. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory II

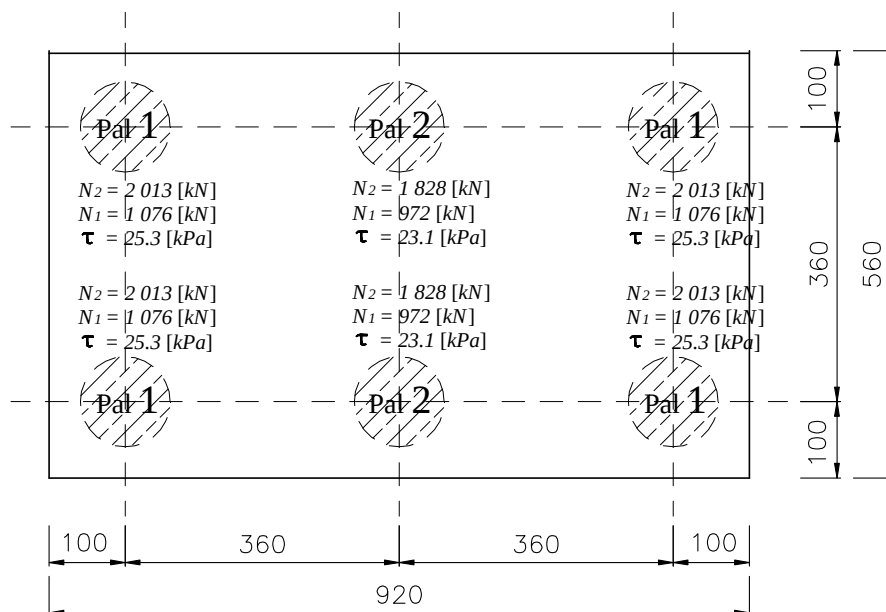
- Podpora III

Osiadanie zmierzone na podporze III wynosi $s_{pom} = 11.0 \text{ mm}$, natomiast osiadanie obliczone na podstawie opracowanego modelu matematycznego przedstawiono poniżej:



Rys. 7.3. Obliczone osiadanie oczepu podpory III. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku

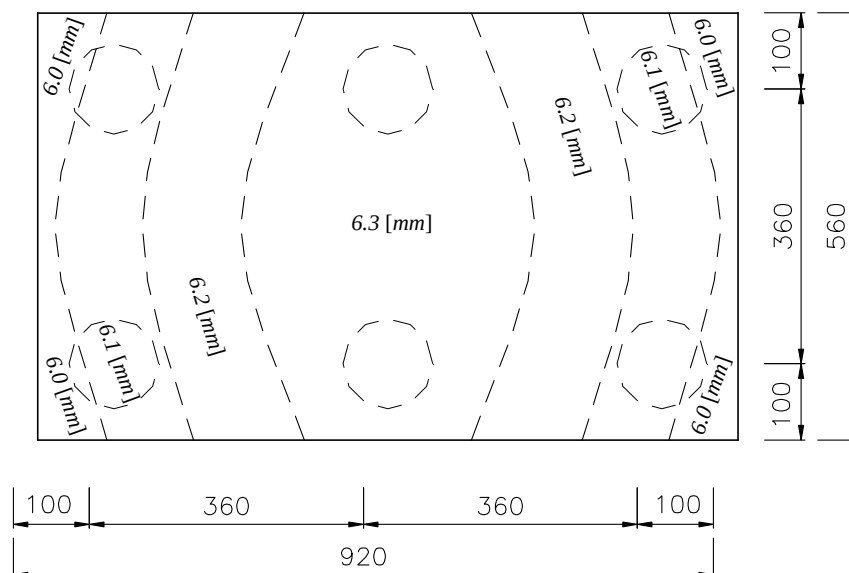
Wyznaczoną na podstawie obliczeń wartość mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali podpory III przedstawiono na rysunku poniżej:



Rys. 7.4. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory III

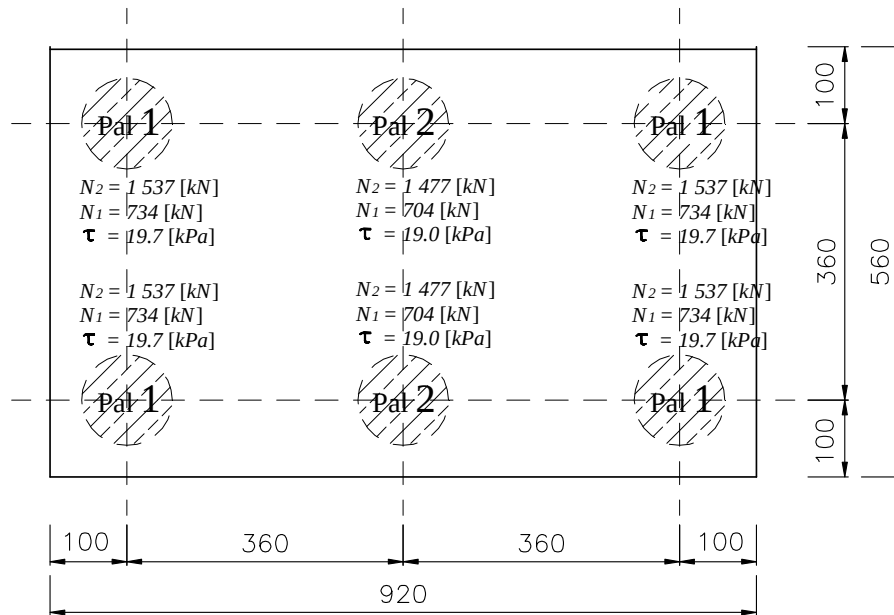
- Podpora IV

Osiadanie zmierzone na podporze IV wynosi $s_{pom} = 6.5 \text{ mm}$, natomiast osiadanie obliczone na podstawie opracowanego modelu matematycznego przedstawiono poniżej:



Rys. 7.5. Obliczone osiadanie oczepu podpory IV. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku

Wyznaczoną na podstawie obliczeń wartość mobilizacji oporów pobocznic i podstaw pali podpory IV przedstawiono na rysunku poniżej:



Rys. 7.6. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory IV

Ocenie można poddać uzyskane wyniki osiadań, ponieważ dokonywano ich pomiarów wraz z postępem i po zakończeniu robót budowlanych. Można stwierdzić, że z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością uzyskane wyniki obliczeń wykazują zgodność z wynikami badań terenowych. Na uwagę zasługuje fakt, że oszacowane nośności graniczne pali na podstawie wyników badań podłoża są wyższe od wyznaczonych w oparciu o próbne obciążenie statyczne pala (Tabl. 5.4 i 7.1).

7.3. Fundament płytowo-palowy

Analizę osiadania oraz rozdziału obciążenia pomiędzy płytę i pale, na podstawie parametrów geotechnicznych podłoża, przeprowadzono dla dwóch zbiorników Podczyszczalni ścieków w Tychach posadowionych na fundamentach płytowo-palowych. Jak już wspomniano, posadowienie tych obiektów od etapu projektowania po realizację wykonywano z uwzględnieniem udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże.

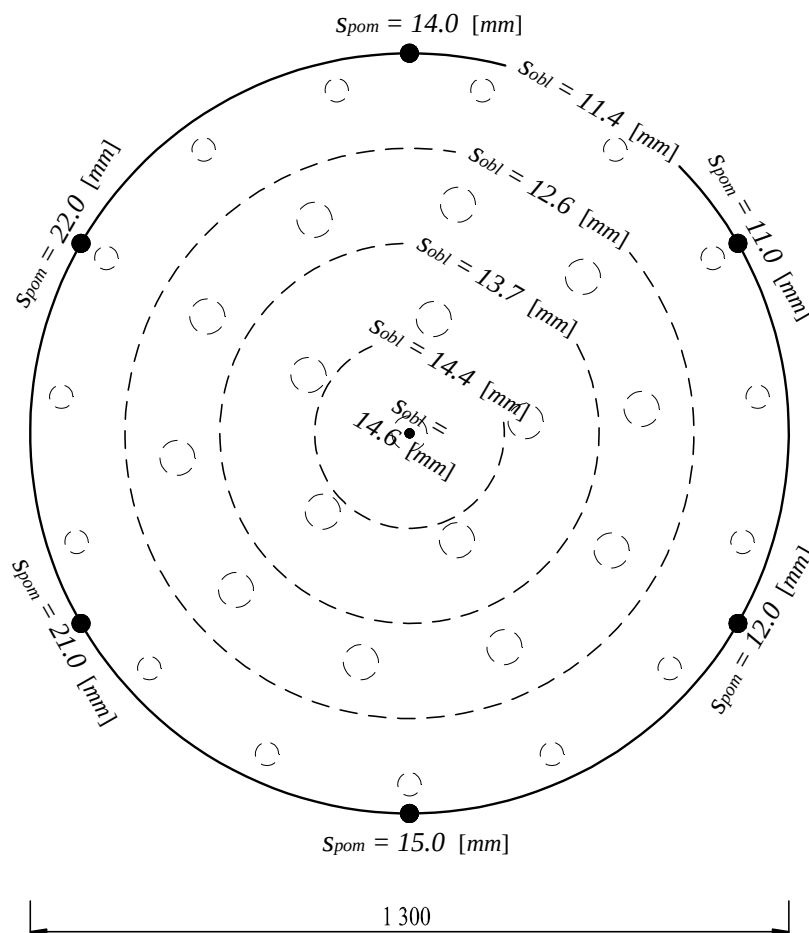
- Zbiornik awaryjny (Obiekt 2)

Uśredniony profil geotechniczny podłoża pod zbiornikiem awaryjnym przedstawiono w tabeli 5.6. Na jego podstawie oraz zależnościach (4.35) do (4.37) wyznaczono parametry krzywych MK dla poszczególnych pali tworzących fundament (Tabl. 7.2).

Tabl. 7.2. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla poszczególnych pali fundamentu zbiornika awaryjnego

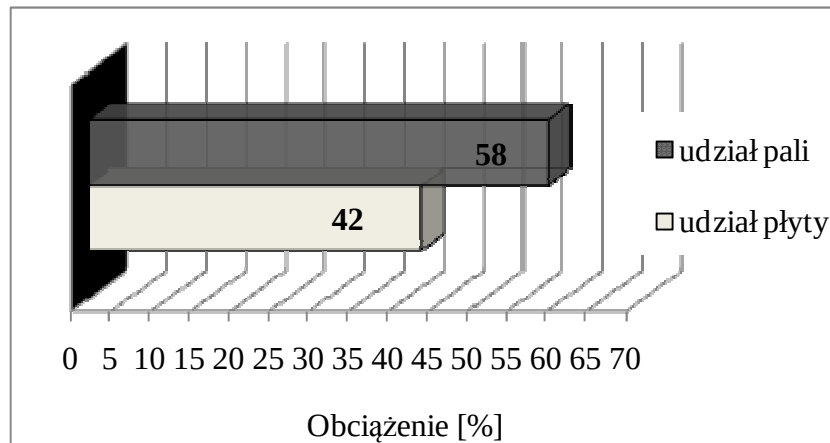
Parametry krzywej Meyera-Kowalowa	Pal $D = 0.6 \text{ m}$ $h_p = 10.0 \text{ m}$	Pal $D = 0.6 \text{ m}$ $h_p = 9.5 \text{ m}$	Pal $D = 0.4 \text{ m}$ $h_p = 9.5 \text{ m}$
κ [-]	1.34	1.29	1.71
$C \times 10^{-3}$ [mm/kN]	1.04	1.09	1.16
N_{gr} [kN]	1 525	1 463	913

Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane opracowanym modelem matematycznym, przy wykorzystaniu jedynie wyników badań podłoża. Przedstawiono wyniki osiadań obliczonych wraz z ich zestawieniem z wartościami osiadań pomierzonych podczas próby wodnej (rys. 7.7). Na płycie fundamentowej zbiornika wykonano sześć reperów pomiarowych. Dla dwóch z nich zmierzono wyższe wartości osiadań. Jak stwierdzono podczas weryfikacji, przyczyny nierównomiernego osiadania szukać można w lokalnym pogorszeniu warunków gruntowych pod częścią powierzchni zbiornika.



Rys. 7.7. Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika awaryjnego

Na rysunku 7.8. przedstawiono ponadto rozdział obciążenia pomiędzy płytę a pale. Prezentowany wynik pełni jedynie rolę informacyjną, ponieważ nie były przedmiotem badań terenowych. Podczas analizy fundamentów płytowo-palowych w oparciu o parametry geotechniczne podłoża uzyskano większy o 9 % udział pali w przekazywaniu obciążenia w porównaniu z analizą bazującą na wynikach próbnych obciążeń statycznych pali (rys. 5.14 i 7.8).



Rys. 7.8. Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik awaryjny

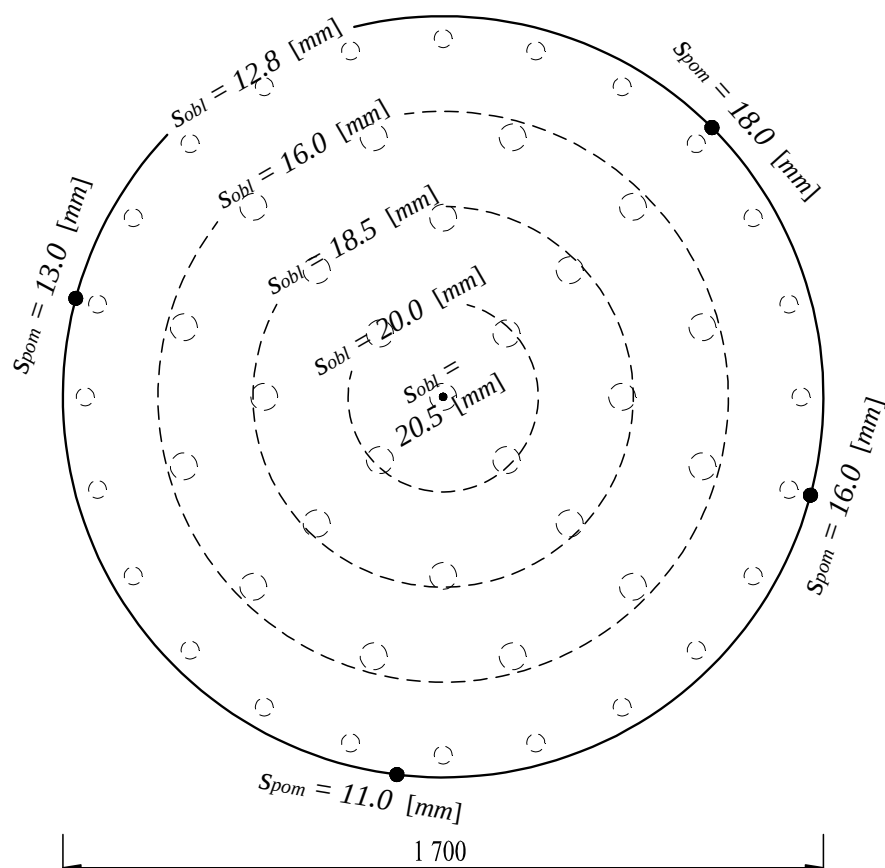
- Zbiornik doczyszczający (Obiekt nr 6)

Uśredniony profil geotechniczny podłoża pod zbiornikiem doczyszczającym przedstawiono w tabeli 5.10. Na jego podstawie oraz zależnościach (4.35) do (4.37) wyznaczono parametry krzywych MK dla poszczególnych pali tworzących fundament (Tabl. 7.3).

Tabl. 7.3. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla poszczególnych pali fundamentu zbiornika doczyszczającego

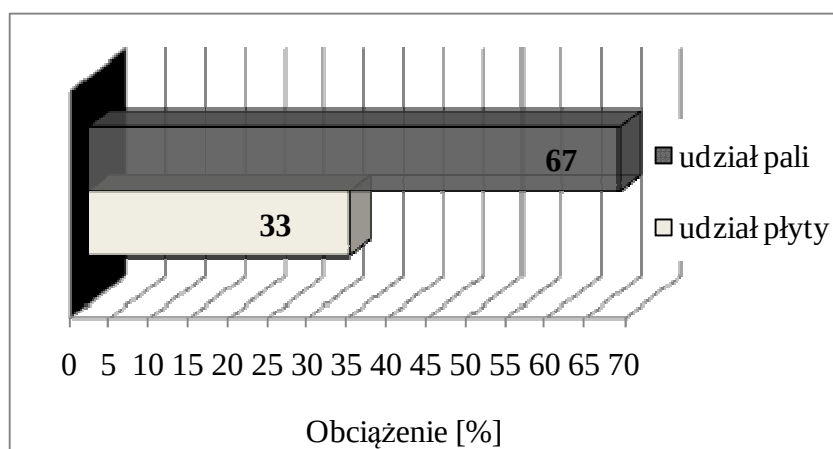
Parametry krzywej Meyera-Kowalowa	Pal $D = 0.6 \text{ m}$ $hp = 12.0 \text{ m}$	Pal $D = 0.4 \text{ m}$ $hp = 12.0 \text{ m}$
κ [-]	1.25	1.67
$C \times 10^{-3}$ [mm/kN]	7.95	8.51
N_{gr} [kN]	2 002	1 247

Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane opracowanym modelem matematycznym, przy wykorzystaniu jedynie parametrów geotechnicznych podłoża. Na rysunku 7.9 przedstawiono wyniki osiadań obliczonych wraz z ich zestawieniem z wartościami osiadań pomierzonych podczas próby wodnej.



Rys. 7.9. Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika doczyszczającego

Poniżej przedstawiono uzyskany obliczeniowo rozdział obciążenia. Udział pali w analizie bazującej na parametrach geotechnicznych podłoża jest wyższy o 8 % w porównaniu do wyników uzyskanych podczas weryfikacji, tj. uwzględniających rzeczywistą pracę pala pod obciążeniem bazując na wynikach próbnych obciążeń statycznych (rys. 5.19 i 7.10).



Rys. 7.10. Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytą i pale - zbiornik doczyszczający

Na podstawie wyników pomiarów osiadań dokonanych na obwodzie płyt fundamentowych obu zbiorników, można zaobserwować ich nierównomierność. Przyczyn powyższego zjawiska szukać należy w zmienności warunków gruntowych pod zbiornikami ale także w dokładności i jej powtarzalności podczas wykonywania robót palowych. Drugi z czynników wymaga szczególnej uwagi podczas wykonywania pali CFA, zastosowanych na omawianych obiektach. W związku z powyższym można stwierdzić, że uzyskane wyniki obliczeń osiadań dwóch zbiorników spoczywających na podłożu i grupie pali mieszczą się, z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, w akceptowalnych granicach. Zaobserwowano ponadto, że wyniki osiadania uzyskane na podstawie parametrów geotechnicznych podłoża są nieznacznie niższe od uzyskanych podczas obliczeń bazujących na wynikach próbnego obciążenia statycznego pala. Związane jest to ze wspomnianym już zawyżaniem wartości nośności granicznych pali podczas określania parametrów krzywej MK w oparciu o wyniki badań podłoża. Wyższa nośność graniczna pali wpływa na ich wyższą sztywność osiową, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie udziału pali w przekazywaniu obciążenia. Różnice w uzyskiwanym podczas obliczeń rozdziale obciążenia pomiędzy płytę a pale, w zestawieniu wyników bazujących na parametrach geotechnicznych podłoża a wynikach próbnych obciążeń pali, nie są wyższe niż 10 %. Dla wielu inżynierskich zadań uzyskane rozbieżności wyników są dopuszczalne.

7.4. Podsumowanie praktycznego wykorzystania opracowanego modelu

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdza się, że uzyskane w oparciu o parametry geotechniczne podłoża wartości nośności granicznych pali są we wszystkich analizowanych fundamentach wyższe od wartości uzyskanych na podstawie próbnych obciążeń statycznych pali. Przyczyn powyższego zjawiska szukać należy chociażby w przybliżonym charakterze metod określających zachowanie pala do jego nośności granicznej na podstawie parametrów geotechnicznych podłoża. Nośność graniczna pala rozumiana jako obciążenie wywołujące niekontrolowane osiadanie bez zmiany oporu pobocznicy i podstawy, odpowiada pionowej asymptocie krzywej obciążenie-osiadanie. Tak zdefiniowaną nośność graniczną obserwujemy dla osiadań znacznie przekraczających wartości dopuszczalne, co wpływa na jej niewielkie znaczenie praktyczne [44], chyba że w celu wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa. Wyjątek mogą stanowić pale pracujące jako reduktory osiadania

i projektowane na obciążenie zbliżone bądź odpowiadające ich nośności granicznej. W związku z powyższym, przy wykluczeniu pali pełniących rolę reduktorów osiadania, wykorzystanie zależności służących oszacowaniu parametrów krzywej MK na podstawie parametrów geotechnicznych podłoża, w zakresie dopuszczalnych w praktyce osiadań, jest akceptowalne. Zgodnie z Eurokodem 7 empiryczne i analityczne metody projektowania pali wymagają weryfikacji na podstawie próbnego obciążenia statycznego. Tak też jest z prezentowanym podejściem analizy zachowania fundamentów palowych i płytowo-palowych. Uzyskane wyniki obliczeń pozwalają na stwierdzenie, że przy zachowaniu wymaganej ostrożności podczas szacowania zachowania pojedynczego pala pod obciążeniem, istnieje możliwość wykorzystania omawianego modelu matematycznego także do analizy pracy fundamentów palowych i płytowo-palowych jedynie na podstawie parametrów geotechnicznych podłoża.

Na uwagę zasługuje także fakt, że niezależnie od wyboru metody projektowania pali, bazujących na wynikach próbnych obciążeń statycznych bądź parametrach geotechnicznych podłoża, nie ma obowiązku ostatecznego wymiarowania płyty do momentu wykonania badań podłoża bezpośrednio pod nią oraz próbnych obciążeń statycznych pali. W związku z powyższym proponowany w pracy model matematyczny także może odegrać istotną rolę podczas wymiarowania płyt, dostarczając wiedzy na temat charakterystyk podpór sprężystych modelujących podłoże i pale, przy uwzględnieniu podatności całego ośrodka gruntowego.

Ponadto w sytuacji uzyskania niezadowalających wyników próbnego obciążenia statycznego pala proponowany model matematycznym może zostać wykorzystany do uwzględnienia udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże. W pewnych warunkach gruntowych istnieje możliwość wykorzystania nośności gruntu w górnych obszarach podłoża, zwiększając jednocześnie współczynnik bezpieczeństwa całego fundamentu. W takiej sytuacji istniałaby szansa uniknięcia wykonywania prac naprawczych.

Niezależnie od przedstawionych powyżej możliwości praktycznego zastosowania opracowanego modelu matematycznego warto zwrócić uwagę, że Eurokod 7 zaleca podczas wykonywania fundamentów płytowo-palowych stosowanie metody obserwacyjnej. Odbiega ona od powszechnie spotykanych w Polsce metod projektowania, jednak w trudnych warunkach gruntowych, przy niepewnym prognozowaniu zachowania podłoża może być jedyną metodą bezpiecznego i świadomego wykonania posadowienia. Wymaga ona odmiennego podejścia

oraz ciągłej współpracy projektanta konstrukcji i geotechnika podczas wykonywania robót ziemnych, palowania i fundamentowania. Z drugiej strony daje jednak możliwość przyjęcia, optymalnej pod względem ekonomiczno-użytkowym, geometrii i wymiarów fundamentu (tzn. parametrów pali, ich rozstawu i usytuowania, grubości i niezbędnej ilości zbrojenia płyty) dla danych warunków, z założonym zapasem bezpieczeństwa.

Zdaniem autora prezentowany w niniejszej pracy model matematyczny może odegrać ważną i praktyczną rolę podczas analizy fundamentów palowych i płytowo-palowych.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedmiotem badań jest analiza współpracy płyty spoczywającej na podłożu i palach w przekazywaniu obciążenia pionowego w danych warunkach gruntowych.

Przed przystąpieniem do analizy własnej przedstawiono przegląd literatury w zakresie istniejących metod obliczania fundamentów płytowo-palowych. Na jego podstawie stwierdzono, że dotychczas zostały opracowane liczne metody służące analizie badanego fundamentu z wyszczególnieniem badań nad uproszczonymi, przybliżonymi i szczegółowymi metodami. Stwierdzono ponadto, że brakuje prac wykorzystujących krzywą obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala w pełnym zakresie w analizie krzywej obciążenie-osiadanie pala występującego w grupie pod płytą. Następnie przedstawiono badania laboratoryjne i płynące z nich wnioski, które nie zawsze można w sposób bezpośredni utożsamiać z zachowaniem się analizowanego fundamentu w skali naturalnej. Na pewno pełnią one jednak ważną rolę poznawczą, dając wiedzę na temat współdziałania płyty, pali i gruntu, zmiany nośności całego ustroju, z uwzględnieniem rozdziału obciążenia przekazywanego przez płytę i pale. Przegląd literatury zakończono wnioskami płynącymi z istniejących badań terenowych rzeczywistych obiektów posadowionych na fundamentach płytowo-palowych.

Podczas realizacji powyższego zadania zaproponowano metodę obliczania płyt fundamentowych spoczywających na podłożu i palach. Główny nacisk położono na realną charakterystykę osiadania płyty o zadanej sztywności oraz faktyczną pracę pala w gruncie jako czynnikach determinujących osiadanie fundamentu, a w związku z powyższym także stanu naprężenia kontaktowego pod płytą. Jedną z metod projektowania pali podaną przez Eurokod 7 są próbne obciążenia statyczne, a uzyskane nimi wyniki niewątpliwie wiarygodnie przedstawiają relację obciążenie-osiadanie pojedynczego pala w danych warunkach gruntowych. Umożliwia ona także wykorzystanie wyników próbnych obciążeń pali z porównywalnych doświadczeń oraz ich weryfikację podczas realizacji konkretnego palowania. Przedstawiono ponadto możliwość wykorzystania opracowanego modelu matematycznego bazując jedynie na parametrach geotechnicznych podłoża.

W pracy wykorzystano badania nad zasięgiem stref aktywnych Meyera w wyznaczaniu osiadania fundamentów oraz krzywą Meyera-Kowalowa,

umożliwiająca ekstrapolację wyników próbnego obciążenia statycznego pala do jego nośności granicznej. Wiedza na temat zachowania pala poza zakresem objętym testem statycznym, z uwzględnieniem jego pracy w grupie zwieńczonej płytą, umożliwia optymalne projektowanie fundamentów wykorzystujących pale w celu ograniczenia osiadań oraz wyrównania momentów w płytach fundamentowych.

Przedstawiony w pracy model matematyczny uwzględnia wzajemne oddziaływania płyty, pali i podłoża, odzwierciedlające zarazem podatność ośrodka gruntowego i osadzonych w nim pali. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskujemy osiadania i ugięcia płyty, z określeniem rozdziału obciążenia przekazywanego przez płytę i poszczególne pale w grupie.

Przedstawiony model matematyczny zweryfikowano na podstawie istniejących wyników pomiarów osiadań obiektów rzeczywistych. W tym celu wykorzystano trzy podpory estakady drogowej, które ze względu na warunki gruntowe zaprojektowano jako fundamenty palowe oraz dwa zbiorniki, które od etapu projektowania do realizacji wykonano z założeniem udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Uzyskana znaczna zgodność wyników obliczeń i pomierzonych osiadań obiektów rzeczywistych pozwalają wnioskować o poprawności przyjętych założeń omawianego modelu matematycznego współpracy płyty i pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże.

W pracy przedstawiono ponadto możliwość praktycznego zastosowania opracowanego modelu matematycznego podczas analizy posadowienia fundamentów płytowo-palowych. Prezentowany model matematyczny zaliczany do metod przybliżonych, umożliwia względnie sprawną w porównaniu z metodami szczegółowymi optymalizację posadowienia. Ponadto możliwość wykorzystania badań podłoża bezpośrednio pod płytą oraz wyników próbnego obciążenia statycznego pala, odpowiadających faktycznej współpracy płyty i pali z podłożem gruntowym, pozwalają uznać wagę jego praktycznego znaczenia.

Wnioski

Na podstawie opracowanego modelu matematycznego, przeglądu systematycznego rozwiązania oraz obliczeń rzeczywistych fundamentów sformułowano następujące wnioski:

1. Przeprowadzone w pracy analizy i wyniki badań potwierdzają postawioną tezę, że istnieje możliwość wykorzystania z dostateczną dla celów praktycznych

- dokładnością krzywej obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala w pełnym zakresie N_2 -s, do analizy krzywej obciążenie-osiadanie pala występującego w grupie pali pod płytą.
2. Przy analizie geotechnicznych warunków posadowienia fundamentów płytowych na palach istotną rolę pełni uwzględnienie faktycznej współpracy pala z gruntem oraz sprężystych własności płyty. Należy rozpatrywać łącznie sztywność i wielkość płyty, nieliniową charakterystykę pracy poszczególnych pali w grupie, ich rozstaw i usytuowanie na planie płyty, dla konkretnych warunków geotechnicznych posadowienia.
 3. Wyznaczenie wartości i zmienności sztywności podpór modelujących podłoże, przy uwzględnieniu osadzonych w nim pali oraz stref aktywnych naprężenia płyty jest zagadnieniem złożonym. Wymaga wzięcia pod uwagę, poza warunkami geotechnicznymi, wzajemnej interakcji poszczególnych elementów przekazujących obciążenie na podłoże, przy uwzględnieniu charakterystyki pracy pali w grupie i sprężystych własności płyty.
 4. Sztywność płyty fundamentowej w znacznym stopniu wpływa na równomierność osiadania oraz obciążenie poszczególnych pali w grupie. Wzrost sztywności płyty przyczynia się do wzrostu udziału pali zewnętrznych.
 5. Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali pracujących w grupie, z uwzględnieniem współpracy płyty, przebiega odmiennie niż podczas badania pala pojedynczego. Powyższe zjawisko stanowi efekt nachodzenia się stref naprężenia od poszczególnych pali, czego wynikiem jest mobilizacja oporów dla większych osiadań w porównaniu z palem pojedynczym. Czynnikiem wpływającym na mobilizację oporów wokół pala w grupie przy współpracy płyty jest jej sztywność, rozstaw z usytuowaniem pala w grupie i na planie płyty, a w związku z tym wielkości wzajemnych oddziaływań.
 6. Istnieje możliwość wyznaczenia, z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością, udziału płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże.
 7. Udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże nierozzerwalnie wiąże się z rodzajem pala, scharakteryzowanego relacją obciążenie-osiadanie głowicy względem osiadania płyty, dla danego stopnia ich obciążenia w zadanych warunkach gruntowych. Charakterystyka pracy pali i płyty z uwzględnieniem jej sztywności w zadanych warunkach geotechnicznych podłoża, pod danym obciążeniem determinują udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże.

8. Udział pali rośnie wraz ze wzrostem sztywności płyty, a także ze wzrostem obciążenia do pewnej wartości, przekroczenie której rozpoczyna proces zmniejszania udziału pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże. Przyczyn powyższego zjawiska szukać należy w nieproporcjonalnym przyroście osiadania pala dla kolejnych stopni obciążenia, odzwierciedlających nieliniową charakterystykę pracy pali w gruncie.

9. PROGRAM DALSZYCH BADAŃ

1. Rozwinięcie proponowanej metody analizy geotechnicznych warunków posadowienia fundamentów płytowych na podłożu i palach o możliwość zróżnicowania warunków geotechnicznych na planie płyty.
2. Rozbudowanie modelu matematycznego analizy pracy płyty fundamentowej o możliwość wprowadzania złożonych schematów obciążenia zewnętrznego.
3. Wykorzystanie geotechnicznych badań in situ, głównie sondy statycznej CPT/CPTU, w prognozowaniu pracy fundamentów palowych i płytowo-palowych
4. Ciągła weryfikacja przyjętych w pracy założeń oraz opracowanego modelu matematycznego na podstawie wyników pomiarów osiadań rzeczywistych obiektów, w odmiennych warunkach gruntowych.

LITERATURA

1. Akinmusuru, J.O. (1980): Interaction of Piles and Cap in Piled Footings. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 106, No. 11, pp. 1263-1268
2. Allievi L., Ferrero S., Mussi A., Persio R., Petrella F. (2013): Structural and geotechnical design of piled raft for a tall building founded on granular soil. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp. 2659-2661
3. Bałachowski L. (2006): Scale effect in shaft friction from the direct shear interface tests. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VI, No. 3, pp. 13-28
4. Balakumar V. (2008): Experimental studies of model piled rafts on sand and field study of prototype behaviour. *Doctoral Dissertation*, Chennai
5. Baziar M.H., Ghorbani A., Katzenbach R. (2009): Small-Scale Model Test and Three-Dimensional Analysis of Pile-Raft Foundation on Medium-Dense Sand. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 170-175
6. Brown P.T., Wiesner T.J. (1975): The behaviour of uniformly loaded piled strip footings. *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp. 13-21
7. Butterfield R., Banerjee P.K. (1971): The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Geotechnique*, Vol. 21, No. 1, pp. 43-60
8. Butterfield R., Banerjee P.K. (1971): The problem of pile group-pile cap interaction. *Geotechnique*, Vol. 21, No. 2, pp. 135-142
9. Choudhury D., Katzenbach R. (2013): ISSMGE Combined Pile-Raft Foundation Guideline. *Institute and Laboratory of Geotechnics*. Technische Universität Darmstadt, Germany
10. Chow Y.K. (1986): Analysis of vertically loaded pile groups. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 10, pp. 59-72
11. Chruściewicz S. (2003): Wpływ stanu naprężeń w ośrodku gruntowym na nośność sztywnego ustroju płytowo-palowego. *Rozprawa doktorska*. Szczecin

12. Clancy P., Randolph M.F. (1993): An approximate analysis procedure for piled raft foundations. *International Journal for Numerical Methods in Geomechanics*, Vol. 17, pp. 849-869
13. Cooke R.W. (1986): Piled raft foundations on stiff clay - a contribution to design philosophy. *Geotechnique*, Vol. 36, No. 2, pp. 169-203
14. Cudny M. (2013): Some aspects of the constitutive modeling of natural fine grained soils. Wydawnictwo IMOGEO, Gdańsk
15. De Sanctis L., Russo G., Viggiani C. (2002): Piled raft on layered soils. Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations, Deep Foundation Institute, Nice, pp. 279-285
16. Dmitruk S., Izbicki R., Suchnicka H. (1982): *Mechanika ośrodków rozdrobnionych*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław
17. Dyka I. (2001): *Analiza i metoda obliczeń osiadania grupy pali*. Rozprawa doktorska, Gdańsk
18. El Gendy M., Hanisch J., Kany M. (2006): Empirische nichtlineare Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen (KPP). *Bautechnik*, Vol. 83, No. 6, pp. 604-617
19. Garg K.G. (1979): Bored Pile Groups under Vertical Load in Sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, No. 8, pp. 939-956
20. Gibson R.E. (1967): Some results concerning displacements and stresses in a non-homogeneous elastic half-space. *Geotechnique*, Vol. 17, No. 1, pp. 58-97
21. Giretti D. (2010): *Modelling of Piled Raft Foundations in Sand*. Doctoral Dissertation, Ferraro
22. Glazer Z. (1985): *Mechanika Gruntów*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa
23. Griffiths D.V., Clancy P., Randolph M.F. (1991): Piled raft foundation analysis by finite elements. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 1153-1157
24. Gryczmański M. (1995): *Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów*, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa
25. Gwizdała K. (1996): *Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Wodne XLI, Gdańsk
26. Gwizdała K. (2010): *Fundamenty palowe: Technologie i obliczenia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa

27. Gwizdała K. (2013): Fundamenty palowe: Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
28. Gwizdała K., Cudny M., Florkowska S. (2015): Osiadanie grup palowych-analiza posadowienia obiektów inżynierskich na Trasie Sucharskiego w Gdańsku. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, s. 291-296
29. Gwizdała K., Florkowska S. (2015): Problematyka osiadań fundamentów palowych w skomplikowanych warunkach gruntowych i złożonych stanach obciążenia. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 4, s. 596-601
30. Hain S.J., Lee I.K. (1978): The analysis of flexible raft-pile systems. *Geotechnique*, Vol. 28, No. 1, pp. 65-83
31. Hanisch J., Katzenbach R., König G. (2002): Kombinierte Pfahl-Plattengründungen. Ernst & Sohn, Berlin
32. Hansbo S. (1984): Foundations on friction creep piles in soft clays. *International Conference on Case Histories In Geotechnical Engineering*, St. Louis, Vol. 2, pp. 913-922
33. Hansbo S., Jendebý L. (1998): A follow-up of two different foundation principles. *Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St. Louis, pp. 259-264
34. Hemsley J.A. (2000): Design applications of raft foundations. Thomas Telford Ltd, London
35. Hongladaromp T., Chen N.J., Lee S.L. (1973): Load distributions in rectangular footings on piles. *Geotechnical Engineering*. Vol. 4, No. 2, pp. 77-90
36. Horikoshi K., Randolph M.F. (1996): Centrifuge Modeling of Piled Raft Foundations on Clay. *Geotechnique*, Vol. 46, No. 4, pp. 741-752
37. Horikoshi K., Randolph M.F. (1998): A Contribution to Optimal Design of Piled Raft. *Geotechnique*, Vol. 48, No. 3, pp. 301-317
38. Jeong S.J., Cho J. (2013): Interactive 3-D analysis method of piled raft foundation for high-rise buildings. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp. 2763-2766
39. Katzenbach R., Bachmann G., Boled-Mekasha G., Ramm H. (2005): Combined pile raft foundations (CPRF): An appropriate solution for the foundations of high-rise buildings. *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 3, pp.19-29

40. Katzenbach R., Gutberlet Ch., Bachmann G. (2007): Soil-Structure Interaction aspects for ultimate limit state design of complex foundations. ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, pp. 585-596
41. Katzenbach R., Schmitt A., Turek J. (2005): Assessing Settlement of High-Rise Structures by 3D Simulations. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 20, pp. 221-229
42. Kitiyodom P., Matsumoto T., Sonoda R. (2011): Approximate numerical analysis of a large piled raft foundation. Soils and Foundations, Vol. 51, No. 1, pp. 1-10
43. Kłosiński B. (2013): Posadowienia budynków wysokich – problemy, konstrukcje i projektowanie. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, s. 279-304
44. Kłosiński B. (2013): Projektowanie pali na podstawie normy PN-EN 1997 "Projektowanie geotechniczne". XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, s. 247-278
45. Knabe W. (1971): Badania modelowe nośności granicznej ławy fundamentowej posadowionej na krótkich palach w podłożu piaszczystym. Archiwum Hydrotechniki, Zeszyt 2, s. 185-209
46. Knabe W. (1974): Wzajemne oddziaływanie ośrodka gruntowego i płyty fundamentowej na palach. Archiwum Hydrotechniki, Zeszyt 4, s. 637-653
47. Knabe W. (1975): Wzajemne oddziaływanie ośrodka gruntowego i płyty fundamentowej na palach – Część II. Archiwum Hydrotechniki, Zeszyt 2, s. 241-247
48. Knabe W. (1976): Badania modelowe płyty fundamentowej na palach. Rozprawy Hydrotechniczne, Zeszyt 36, s. 75-131
49. Kowalska M. (2009): Identyfikacja parametryczna modeli gruntów w zagadnieniach geotechniki. Praca doktorska, Gliwice
50. Kasiński A. (1998): Analiza jednostkowego oporu gruntu niespoistego wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala w zależności od średnicy pala oraz uziarnienia i stanu naprężenia w gruncie. Rozprawa doktorska, Gdańsk
51. Kuwabara F. (1989): An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil. Soils and Foundations, Vol. 29, No. 1, pp. 82-92
52. Lee I.K. (1993): Analysis and Performance of Raft and Raft-Pile Systems. Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, pp. 1331-1345

53. Lee S.H., Chung, C.K. (2005): An experimental study of the interaction of vertically loaded pile groups in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 5, pp. 1485-1493
54. Mandolini A., Russo G Viggiani C. (2005): Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design. XVI ICSMGE, Osaka, Vol. 1, p. 177-213
55. Mandolini A., Viggiani C. (1997): Settlement of piled foundations. *Geotechnique*, Vol. 47, No. 4, pp. 791-816
56. Matsumoto T., Nemoto H., Mikami H., Yaegashi K., Arai T., Kitiyodom P. (2010): Load test of piled raft models with different pile head connection conditions and their analyses. *Soils and Foundations*, Vol. 50, No. 1, pp. 63-81
57. Meyer Z. (2010): Analiza naprężeń na pobocznicę pala oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa. XVIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin, s. 81-91
58. Meyer Z. (2012): Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów. Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin
59. Meyer Z. (2016): Wykorzystanie wyników testu statycznego pala do określenia mobilizacji oporu pobocznic. XXIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin, s. 57-68
60. Meyer Z., Chruściewicz S. (2003): Analiza wpływu współczynnika koncentracji naprężeń Fröhlich'a na osiadanie sztywnego ustroju płytowo-palowego. Konferencja Naukowo-Techniczna Olsztyn-Kortowo
61. Meyer Z., Chruściewicz S. (2003): O wpływie niejednorodności ośrodka gruntowego pod płytą na osiadanie sztywnej konstrukcji płytowo-palowej. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 11, s. 644-645
62. Meyer Z., Cichocki P. (2015): Numeryczny sposób wyznaczania naprężeń na pobocznicę pala fundamentów płytowo-palowych w gruncie niespoistym. Wybrane zagadnienia konstrukcji i materiałów budowlanych oraz geotechniki, Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, s. 309-316
63. Meyer Z., Cichocki P. (2015): Wpływ zasięgu strefy aktywnej naprężeń na sztywny fundament płytowo-palowy. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 4, s. 601-608

64. Meyer Z., Cichocki P. (2017): Analiza sprężystej płyty na palach z uwzględnieniem krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, s. 117-124
65. Meyer Z., Kowalów M. (2010): Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, s. 438-441
66. Meyer Z., Szmechel G. (2015): Określenie oporów poboczniczy pala na podstawie próbnych statycznych obciążeń pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, s. 441-444
67. Meyer Z., Żarkiewicz K. (2014): Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 1, s. 30-35
68. Meyer Z., Żarkiewicz K. (2015): Analiza mobilizacji oporu poboczniczy i podstawy pala na podstawie interpretacji badań modelowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, s. 350-354
69. Meyer Z., Żarkiewicz K. (2015): Analiza współpracy pala z gruntem w dużym zakresie osiadania. XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna *Awarie Budowlane*, Szczecin-Międzyzdroje, s. 405-412
70. Meyer Z., Żarkiewicz K. (2016): Formowanie się oporu na poboczniczy pala wyznaczonego na podstawie badań laboratoryjnych. XXIII Seminarium Naukowe z cyklu *Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska*, Szczecin, s. 79-90
71. Mitew-Czajewska M., Gastebled O. J. (2009): Analiza numeryczna MES 3D płyty fundamentowej współpracującej z rusztem palowym. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 9, s. 505-506
72. Ottaviani M. (1975): Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. *Geotechnique*, Vol. 25, No. 2, pp. 159-174
73. Pawłowski A.Z., Cała I. (2006): *Budynki wysokie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
74. Phung D.L. (1993): *Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil*. Swedish Geotechnical Institute, Linköping
75. Phung D.L. (2015): Settlement analysis for piled raft foundations. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Vol. 2, No. 34, pp. 1244-1249
76. Pietrzak J., Rakowski G., Wrześniowski K. (1979): *Macierzowa analiza konstrukcji*. PWN, Warszawa-Poznań

77. Poulos H.G. (1991): Analysis of Piled Strip Foundations. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Rotterdam, pp. 183-191
78. Poulos H.G. (1994): An approximate numerical analysis of piled-raft interaction. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 18, pp. 73-92
79. Poulos H.G. (2001): Methods of analysis of piled raft foundations. A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations
80. Poulos H.G. (2001): Piled raft foundation: design and applications. Geotechnique, Vol. 51, No. 2, pp. 95-113
81. Poulos H.G. (2011): The Design of High-Rise Building Foundation. Geotec, Hanoi
82. Poulos H.G., Davis E.D. (1980): Pile foundations analysis and design. John Wiley & Sons, New York
83. Randolph M.F. (1994): Design methods for pile groups and piled rafts. Proc. XIII ICSMFE, New Delhi, pp. 61-82
84. Randolph M.F., Wroth P.C. (1978): Analysis of deformation of vertically loaded piles. Journal of Geotechnical Engineering Division, pp. 1465-1488
85. Reul O., Randolph M.F. (2003): Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses. Geotechnique, Vol. 53, No. 3, pp. 301-315
86. Reul O., Randolph M.F. (2004): Design Strategies for Piled Rafts Subjected to Nonuniform Vertical Loading. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 1, pp. 1-13
87. Russo G. (1998): Numerical analysis of piled rafts. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 22, pp. 477-493
88. Sadecka L. (2010): Metoda różnic skończonych i metoda elementów skończonych w zagadnieniach mechaniki konstrukcji i podłoża. Studia i Monografie, z. 258, Opole
89. Sinha A. (2013): 3-D Modeling of Piled Raft Foundation. Doctoral Dissertation, Montreal
90. Słabek A. (2003): Współdziałanie płyty fundamentowej na palach z podłożem gruntowym. Rozprawa doktorska, Gdańsk
91. Świniański J. (2003): Ocena podatności podłoża przy wymiarowaniu płyt fundamentowych. Inżynieria Morska i Geotechnika, Nr 5, s. 314-319

92. Szmechel G. (2014): Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska, Szczecin
93. Tejchman A., Gwizdała K., Dyka I., Świniarski J., Kasiński A. (2001): Nośność i osiadanie fundamentów palowych. Politechnika Gdańska, Gdańsk
94. Tejchman A., Gwizdała K., Słabek A. (2004): Obliczenia fundamentów płytowo-palowych. Materiały II Problemowej Konferencji Geotechniki Współpraca budowli z podłożem gruntowym. Białystok – Białowieża, s. 323-334
95. Tejchman A., Gwizdała K., Słabek A. (2004): Investigations of settlement of piled raft foundation. Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. New York
96. Tejchman A., Kasiński A., Słabek A. (2002): A proposal of calculation of piled raft foundations. Proc. International Conf. on Deep Foundation. Nicea
97. Terzaghi K., Peck R.B. (1948): Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, New York
98. Tomlinson M.J. (1994): Pile design and construction practice. E & FN Spon, London
99. Topolnicki M., Sołtys G., Kwiatkowski W. (2006): Wgłębne zagęszczenie podłoża oraz przestrzenna analiza MES posadowienia wieżowca Sea Towers w Gdyni. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Zeszyt 28, s. 457-465
100. Truty A. (2012): Trójwymiarowa analiza wzmocnienia podłoża gruntowego pod płytami fundamentowymi budynków wielokondygnacyjnych z zastosowaniem kolumn CFA. Czasopismo Techniczne. Środowisko, Zeszyt 27, 3-Ś, s. 129-143
101. Truty A., Obrzud R. (2013): Komputerowe analizy współdziałania konstrukcji budowlanych z podłożem przy zastosowaniu zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntów kalibrowanych na podstawie wyników badań laboratoryjnych i polowych. XXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, s. 241-278
102. Truty A., Podleś K. (2010): Zastosowanie modelu Hardening Soil-small do analizy problemów interakcji konstrukcji budowlanych z podłożem. Czasopismo Techniczne. Środowisko, Zeszyt 16, 1-Ś, s. 117-134
103. Tschuchnigg F., Schweiger H.F. (2013): Comparison of Deep Foundation Systems using 3D Finite Element Analysis Employing Different Modeling Techniques. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, Vol. 44, No. 3, pp. 40-46

104. Vrettos Ch., Borchert K.-M. (2011): Combined foundation of a high-rise building complex on sand: analysis and observation. *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 2, pp. 343-350
105. Whitaker T. (1957): Experiments with model piles in groups. *Geotechnique*, Vol. 7, No. 4, pp.147-167
106. Wiłun Z. (2005): *Zarys Geotechniki*. WKiŁ. Warszawa
107. Yamashita K. (2012): Field measurements on piled raft foundations in Japan. 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, pp. 79-94
108. Yamashita K., Yamada T., Hamada J. (2011): Investigation of settlement and load sharing on piled rafts by monitoring full-scale structures. *Soils and Foundations*, Vol. 51, No. 3, pp. 513-532
109. Żarkiewicz K. (2017): *Analiza formowania się oporu poboczniczy pala w gruntach niespoistych na podstawie modelowych badań laboratoryjnych*. Praca doktorska, Szczecin

NORMY

110. DIN 4014 :1990 – Bored cast-in-place pile: Formation, design and bearing capacity.
111. PN-81-B-03020 :1983 – Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
112. PN-EN 1997-1:2008 – Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.

SPIS RYSUNKÓW I WYKRESÓW

Rys. 3.1.	Schemat współpracy układu fundament-podłoże oraz wzajemnych oddziaływań [31,40]	12
Rys. 3.2.	Krzywe obciążenie-osiadanie dla różnych koncepcji projektowania fundamentu [80].....	14
Rys. 3.3.	Schemat wyboru odpowiedniego podejścia projektowego płyty spoczywającej na podłożu i grupie pali w oparciu o analizę osiadania i współczynnika bezpieczeństwa [54].....	15
Rys. 3.4.	Schemat wpływu udziału pali na redukcję osiadania [41].....	15
Rys. 3.5.	Schemat usytuowania fundamentu zastępczego [17]	17
Rys. 3.6.	Wydzielenie pojedynczego elementu płyta-pal z fundamentu [12].....	19
Rys. 3.7.	Uproszczona relacja obciążenie-osiadanie fundamentu płytowo-palowego [82].....	20
Rys. 3.8.	Całkowanie równania Mindlina [6]	22
Rys. 3.9.	Naprężenia kontaktowe pasmo fundamentowe z podłożem i palami [6]	23
Rys. 3.10.	Schemat fundamentu [8]	23
Rys. 3.11.	Płyta fundamentowa na dwóch palach [11]	26
Rys. 3.12.	Relacja obciążenie-osiadanie pojedynczego pala zgodnie z normą DIN 4014 [110].....	27
Rys. 3.13.	Fundament pasmowo-palowy [77]	28
Rys. 3.14.	Interakcja płyty, pali i podłoża w badaniach Hain i Lee [30].....	30
Rys. 3.15.	Podstawowa charakterystyka modelu fundamentu płytowo-palowego [87]	32
Rys. 3.16.	Dyskretny model fundamentu płytowo-palowego [12]	33
Rys. 3.17.	Numeryczny model fundamentu płytowo-palowego [56]	34
Rys. 3.18.	Wpływ płyty na rozkład naprężenia wzdłuż pobocznic pali na przykładzie grupy palowej 3x3 (pal narożny I, pal krawędziowy II, pal centralny III) [72].....	36
Rys. 3.19.	Trójwymiarowy model płyty na podłożu i palach [52]	36
Rys. 3.20.	Przykładowy model MES fundamentu płytowo-palowego [41]	37
Rys. 3.21.	Trójwymiarowy model ścian szczelinowych rozpartych stropem z palami [102].....	39

Rys. 3.22. Schemat obszarów stanu granicznego pod płytą spoczywającą na podłożu i grupie palowej [74]	41
Rys. 3.23. Współczynnik efektywności fundamentu płytowo-palowego [48]	42
Rys. 3.24. Mobilizacja oporu pobocznic i podstawy pala przed i po kontakcie płyty z podłożem [48]	43
Rys. 3.25. Rozkład tarcia na pobocznicach po kontakcie płyty z podłożem [48]	44
Rys. 3.26. Współczynniki efektywności α i β płyty spoczywającej na podłożu i palach [1]	45
Rys. 3.27. Krzywe obciążenie-osiadanie dla płyty fundamentowej, grupy 49 pali wolnostojących oraz fundamentu płytowo-palowego [13]	46
Rys. 3.28. Wzrost oporu pobocznic pala wywołanego udziałem płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże [74]	47
Rys. 3.29. Schemat wpływu usytuowania pali na redukcję nierównomiernego osiadania [36]	48
Rys. 3.30. Rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale [90]	50
Rys. 3.31. Elementy badawcze fundamentu płytowo-palowego [53]	51
Rys. 3.32. Wpływ czasu i typu posadowienia na osiadanie budynków [33]	54
Rys. 3.33. Wpływ czasu i typu posadowienia na wartość obciążenia przekazywanego przez pale [33]	55
Rys. 3.34. Budynek Messe-Torhaus, Frankfurt	56
Rys. 3.35. Wpływ czasu na rozdział obciążenia i osiadanie [34]	57
Rys. 3.36. Wpływ głębokości i usytuowania profilu pomiarowego na przemieszczanie podłoża pod płytą [34]	57
Rys. 3.37. Obciążenie poszczególnych pali pracujących w grupie zwieńczonych płytą [34]	58
Rys. 3.38. Wpływ usytuowania pala na dystrybucję siły w trzonie oraz mobilizację oporu pobocznic [31,34]	58
Rys. 3.39. Budynek Messeturm, Frankfurt	59
Rys. 3.40. Schemat fundamentu i planu palowania wieżowca Messeturm [34]	60
Rys. 3.41. Wpływ usytuowania pala na dystrybucję siły w trzonie oraz mobilizację oporu pobocznic [31,34]	60
Rys. 3.42. Wpływ postępu robót na strefę tarcia negatywnego [93]	61
Rys. 3.43. Budynek Commerzbank, Frankfurt	62
Rys. 3.44. Widok posadowienia wieżowca Commerzbank [73]	62

Rys. 3.45.	Schemat fundamentu z planem palowania wieżowca Commerzbank [93] .	63
Rys. 3.46.	Dystrybucja siły w trzonie oraz mobilizacja oporu poboczniczy pala [34]...	63
Rys. 3.47.	Schemat 47-piętrowego budynku, Nagoya [107]	64
Rys. 3.48.	Schemat płyty fundamentowej i planu palowania, Nagoya [107]	64
Rys. 3.49.	Wpływ głębokości na osiadanie podłoża [108]	65
Rys. 3.50.	Siła w trzonie pala 5D [108]	65
Rys. 3.51.	Siła w trzonie pala 7D [108]	65
Rys. 4.1.	Schemat fundamentu płytowo-palowego.....	69
Rys. 4.2.	Schemat dyskretyzowanej płyty na podporach sprężystych.....	71
Rys. 4.3.	Naprężenie pionowe w układzie kartezjańskim.....	72
Rys. 4.4.	Schemat rozkładu naprężenia w gruncie z uwzględnieniem stref aktywnych [64].....	74
Rys. 4.5.	Rozkład naprężenia w gruncie pod płytą od obciążenia polem własnym i sąsiednim	78
Rys. 4.6.	Schemat analizowanych stanów oporu wokół pojedynczego pala	80
Rys. 4.7.	Schemat mobilizacji oporu poboczniczy i podstawy pala	81
Rys. 4.8.	Rozkład naprężenia w gruncie w osi pala od siły w podstawie pala sąsiedniego	84
Rys. 4.9.	Rozkład naprężenia w gruncie w osi pala od naprężenia stycznego wzdłuż poboczniczy pala sąsiedniego.....	85
Rys. 4.10.	Rozkład naprężenia w gruncie w osi pala od obciążenia polem elementarnym płyty	86
Rys. 4.11.	Rozkład naprężenia w gruncie pod płytą od siły w podstawie pala	87
Rys. 4.12.	Rozkład naprężenia w gruncie pod płytą od naprężenia stycznego wzdłuż poboczniczy pala	87
Rys. 4.13.	Punkt wewnętrzny siatki podziału płyty	88
Rys. 4.14.	Punkt krawędziowy i narożny siatki podziału płyty	89
Rys. 4.15.	Schemat obliczeń płyty na uwarstwionym podłożu i palach	91
Rys. 5.1.	Schemat podpór i pala próbnego estakady drogowej [17].....	93
Rys. 5.2.	Profil geotechniczny - pal próbny nr 79 [93].....	95
Rys. 5.3.	Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala estakady drogowej w ciągu ul. Elbląskiej [93].....	95
Rys. 5.4.	Obliczone osiadanie oczepu podpory II. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku	97

Rys. 5.5.	Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory II	97
Rys. 5.6.	Obliczone osiadanie oczepu podpory III. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku	98
Rys. 5.7.	Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory III	98
Rys. 5.8.	Obliczone osiadanie oczepu podpory IV. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku	99
Rys. 5.9.	Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory IV	99
Rys. 5.10.	Plan palowania zbiornika awaryjnego [90].....	101
Rys. 5.11.	Profil geotechniczny - zbiornik awaryjny [90]	102
Rys. 5.12.	Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala nr 21 zbiornika awaryjnego [90].....	102
Rys. 5.13.	Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika awaryjnego	104
Rys. 5.14.	Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik awaryjny	105
Rys. 5.15.	Plan palowania zbiornika doczyszczającego [90].....	105
Rys. 5.16.	Profil geotechniczny - zbiornik doczyszczający [90]	106
Rys. 5.17.	Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala nr 37 zbiornika doczyszczającego [90]	107
Rys. 5.18.	Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika doczyszczającego	108
Rys. 5.19.	Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik doczyszczający	109
Rys. 6.1.	Schemat analizowanego fundamentu - płyta na podłożu.....	110
Rys. 6.2.	Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie ($q_0 = 125$ kPa, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa).....	111
Rys. 6.3.	Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie ($q_0 = 125$ kPa, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa).....	111
Rys. 6.4.	Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.15$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa).....	111
Rys. 6.5.	Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.60$ m, profil I - $E_0 = 10.0$ MPa).....	112
Rys. 6.6.	Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.15$ m, profil II - $E_0 = 19.5$ MPa).....	112
Rys. 6.7.	Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty ($h = 0.60$ m, profil II -	

$E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	112
Rys. 6.8. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych ($q_0 = 125 \text{ kPa}$, profil I - $E_0 = 10.0 \text{ MPa}$)	113
Rys. 6.9. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych ($q_0 = 125 \text{ kPa}$, profil II - $E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	113
Rys. 6.10. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.15 \text{ m}$, profil I - $E_0 = 10.0 \text{ MPa}$)	113
Rys. 6.11. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.60 \text{ m}$, profil I - $E_0 = 10.0 \text{ MPa}$)	114
Rys. 6.12. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.15 \text{ m}$, profil II - $E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	114
Rys. 6.13. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych ($h = 0.60 \text{ m}$, profil II - $E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	114
Rys. 6.14. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej płyty ($q_0 = 125 \text{ kPa}$, profil I - $E_0 = 10.0 \text{ MPa}$)	115
Rys. 6.15. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej płyty ($q_0 = 125 \text{ kPa}$, profil II - $E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	115
Rys. 6.16. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.15 \text{ m}$, profil I - $E_0 = 10.0 \text{ MPa}$)	115
Rys. 6.17. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.60 \text{ m}$, profil I - $E_0 = 10.0 \text{ MPa}$)	116
Rys. 6.18. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.15 \text{ m}$, profil II - $E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	116
Rys. 6.19. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty ($h = 0.60 \text{ m}$, profil II - $E_0 = 19.5 \text{ MPa}$)	116
Rys. 6.20. Schemat analizowanego fundamentu - płyta na podłożu i pojedynczym palu	117
Rys. 6.21. Mobilizacja oporu pobocznic i podstawy podczas próbnego obciążenia statycznego pala	118
Rys. 6.22. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 100 \text{ kPa}$, pal I)	119
Rys. 6.23. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 100 \text{ kPa}$, pal II)	119
Rys. 6.24. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15 \text{ m}$ (pal I)	

.....	119
Rys. 6.25. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.30$ m (pal I)	119
Rys. 6.26. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)	120
Rys. 6.27. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.30$ m (pal II)	120
Rys. 6.28. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal I).....	121
Rys. 6.29. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal II)	121
Rys. 6.30. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal I).....	121
Rys. 6.31. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.30$ m, pal I).....	121
Rys. 6.32. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal II)	122
Rys. 6.33. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.30$ m, pal II)	122
Rys. 6.34. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal I).....	123
Rys. 6.35. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 100$ kPa, pal II)	123
Rys. 6.36. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal I).....	123
Rys. 6.37. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.30$ m (pal I).....	123
Rys. 6.38. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)	124
Rys. 6.39. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.30$ m (pal II)	124
Rys. 6.40. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal I).....	125

Rys. 6.41. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal II)	125
Rys. 6.42. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z płytą (pal I)	126
Rys. 6.43. Wpływ sztywności płyty na mobilizację oporów wokół pala współpracującego z płytą (pal II).....	126
Rys. 6.44. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal I)	127
Rys. 6.45. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal II)	127
Rys. 6.46. Schemat analizowanego fundamentu-płyta na podłożu i grupie pali	128
Rys. 6.47. Mobilizacja oporu pobocznic i podstawy podczas próbnego obciążenia pala.....	129
Rys. 6.48. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal I).....	130
Rys. 6.49. Wpływ sztywności płyty na jej osiadanie i ugięcie (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal II).....	130
Rys. 6.50. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15$ m (pal I)	130
Rys. 6.51. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.60$ m (pal I)	130
Rys. 6.52. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)	131
Rys. 6.53. Wpływ obciążenia na osiadanie i ugięcie płyty grubości $h = 0.60$ m (pal II)	131
Rys. 6.54. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal I).....	132
Rys. 6.55. Wpływ grubości płyty na sztywność podpór gruntowych (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal II)	132
Rys. 6.56. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal I).....	132
Rys. 6.57. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.60$ m, pal I).....	132

Rys. 6.58. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.15$ m, pal II)	133
Rys. 6.59. Wpływ obciążenia na sztywność podpór gruntowych (płyta grubości $h = 0.60$ m, pal II)	133
Rys. 6.60. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal I).....	134
Rys. 6.61. Wpływ sztywności płyty na zasięg strefy aktywnej (obciążenie $q_0 = 125$ kPa, pal II)	134
Rys. 6.62. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal I).....	134
Rys. 6.63. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.60$ m (pal I).....	134
Rys. 6.64. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.15$ m (pal II)	135
Rys. 6.65. Wpływ obciążenia na zasięg strefy aktywnej płyty grubości $h = 0.60$ m (pal II)	135
Rys. 6.66. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal I).....	136
Rys. 6.67. Porównanie krzywej obciążenie-osiadanie pala w głowicy oraz mobilizacji oporów wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i współpracującego z płytą grubości $h = 0.15$ m (pal II)	137
Rys. 6.68. Wpływ sztywności płyty na mobilizacji oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal narożny (pal I).....	138
Rys. 6.69. Wpływ sztywności płyty na mobilizacji oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal centralny (pal I).....	138
Rys. 6.70. Wpływ sztywności płyty na mobilizacji oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal narożny (pal II).....	139
Rys. 6.71. Wpływ sztywności płyty na mobilizacji oporów wokół pala współpracującego z palami i płytą - pal centralny (pal II).....	139
Rys. 6.72. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal I)	140
Rys. 6.73. Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia (pal II)	140

Rys. 7.1.	Obliczone osiadanie oczepu podpory II. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku	144
Rys. 7.2.	Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory II	145
Rys. 7.3.	Obliczone osiadanie oczepu podpory III. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku	145
Rys. 7.4.	Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory III	146
Rys. 7.5.	Obliczone osiadanie oczepu podpory IV. Estakada drogowa na ul. Elbląskiej w Gdańsku	146
Rys. 7.6.	Mobilizacja oporów pobocznic i podstaw pali podpory IV	147
Rys. 7.7.	Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika awaryjnego	148
Rys. 7.8.	Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik awaryjny	149
Rys. 7.9.	Obliczone i pomierzone osiadanie płyty fundamentowej zbiornika doczyszczającego	150
Rys. 7.10.	Obliczony rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pale - zbiornik doczyszczający	150

SPIS TABEL

Tabl. 5.1. Uśredniony profil geotechniczny - pal próbny nr 79 [93]	94
Tabl. 5.2. Uśredniony profil geotechniczny - podpora estakady II i II [93]	94
Tabl. 5.3. Uśredniony profil geotechniczny - podpora estakady IV [93].....	94
Tabl. 5.4. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pala próbnego oraz pali poszczególnych podpór	96
Tabl. 5.5. Charakterystyka geometryczna fundamentu zbiornika awaryjnego [90] ..	101
Tabl. 5.6. Uśredniony profil geotechniczny - zbiornik awaryjny [90,95].....	101
Tabl. 5.7. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pala próbnego oraz poszczególnych pali fundamentu zbiornika awaryjnego	103
Tabl. 5.8. Podstawowe parametry programu próby wodnej [90].....	103
Tabl. 5.9. Charakterystyka geometryczna fundamentu zbiornika doczyszczającego [90]	105
Tabl. 5.10. Uśredniony profil geotechniczny - zbiornik doczyszczający [90,95].....	106
Tabl. 5.11. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pala próbnego oraz poszczególnych pali fundamentu zbiornika doczyszczającego	107
Tabl. 5.12. Podstawowe parametry programu próby wodnej [90].....	108
Tabl. 6.1. Parametry geotechniczne - profil I.....	110
Tabl. 6.2. Parametry geotechniczne - profil II	110
Tabl. 6.3. Parametry geotechniczne - pal I.....	117
Tabl. 6.4. Parametry geotechniczne - pal II	117
Tabl. 6.5. Parametry geotechniczne - pal I.....	128
Tabl. 6.6. Parametry geotechniczne - pal II	128
Tabl. 7.1. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla pali poszczególnych podpór	144
Tabl. 7.2. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla poszczególnych pali fundamentu zbiornika awaryjnego.....	148
Tabl. 7.3. Charakterystyka krzywej Meyera-Kowalowa dla poszczególnych pali fundamentu zbiornika doczyszczającego.....	149

STRESZCZENIE

Analiza współpracy fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym z uwzględnieniem oporu pobocznicy i podstawy pala wywołanych osiadaniem

Fundamenty płytowo-palowe stosujemy w celu uwzględnienia współpracy płyty fundamentowej z grupą pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże. W wielu warunkach gruntowych takie posadowienie, jako optymalne zarówno w aspekcie użytkowym, jak i ekonomicznym, wypełnia lukę wśród konwencjonalnych rozwiązań, to znaczy fundamentów bezpośrednich i palowych.

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że pomimo opracowanych licznych metod obliczeniowych służących analizie fundamentów płytowo-palowych, brakuje w nich opisu matematycznego z uwzględnieniem stref aktywnych płyty i pali, odpowiadających miąższości podłoża ulegającej odkształceniu pod wpływem obciążenia. Ponadto brakuje badań związanych z możliwością wykorzystania krzywej obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala w pełnym zakresie, do analizy krzywej obciążenie-osiadanie pala pracującego w grupie pod płytą. W niniejszej rozprawie odpowiedziano na powyższe postulaty badawcze, formułując model matematyczny, w którym szczególny nacisk położono na zagadnienie faktycznej relacji obciążenie-osiadanie płyty o zadanej sztywności oraz rzeczywistej pracy pojedynczego pala w gruncie, przy uwzględnieniu interakcji płyty, pali i podłoża. Opracowany model matematyczny został zweryfikowany na podstawie wyników badań terenowych zaczerpniętych z literatury. Wykorzystano w tym celu wyniki osiadań podpór estakady drogowej oraz dwóch zbiorników.

Sformułowany opis matematyczny współpracy fundamentu płytowo-palowego z podłożem oraz jego weryfikacja pozwoliły potwierdzić postawioną w rozprawie tezę, że istnieje możliwość wykorzystania z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością krzywej obciążenie-osiadanie z testu statycznego pala w pełnym zakresie, do analizy krzywej obciążenie-osiadanie pala występującego w grupie pali pod płytą.

SUMMARY

Analysis of the cooperation of a piled raft foundation with a subsoil taking into account the resistance of skin and pile base caused by settlement

Piled raft foundations are used to account for cooperation of raft with a group of piles in transferring the load to the ground. In many ground conditions, such a foundation fills the gap among conventional solutions as optimal in both utility and economic terms i.e. spread foundations and pure pile foundations.

Based on the review of literature, it can be concluded that, despite developed numerous calculation methods for the analysis of piled raft foundations, they lack the mathematical description, that would include the active zones of the raft and piles, corresponding to the thickness of the subsoil undergoing deformation under load. In addition, there is a lack of research related to the possibility of using a load-settlement curve from a static pile test in the full range, to analyze the load-settlement curve of a pile working in a group under the raft. In this dissertation, the above research postulates were answered, formulating a mathematical model in which a particular emphasis was placed on the actual load-settlement relation of the raft with a given stiffness and the actual work of a single pile in the ground, taking into account the interaction between the raft, piles and subsoil. The mathematical model developed was verified on the basis of the results of field research taken from the literature. For this purpose, the results of settlement of supports of road flyover and two tanks were used.

The formulated mathematical description of the piled raft foundation cooperation with the subsoil and its verification allowed to confirm the thesis of the dissertation that it is possible to use the load-settlement curve from the static pile test in the full range with sufficient precision for practical purposes to analyze the load-settlement curve of a pile occurring in a pile group under the raft.