

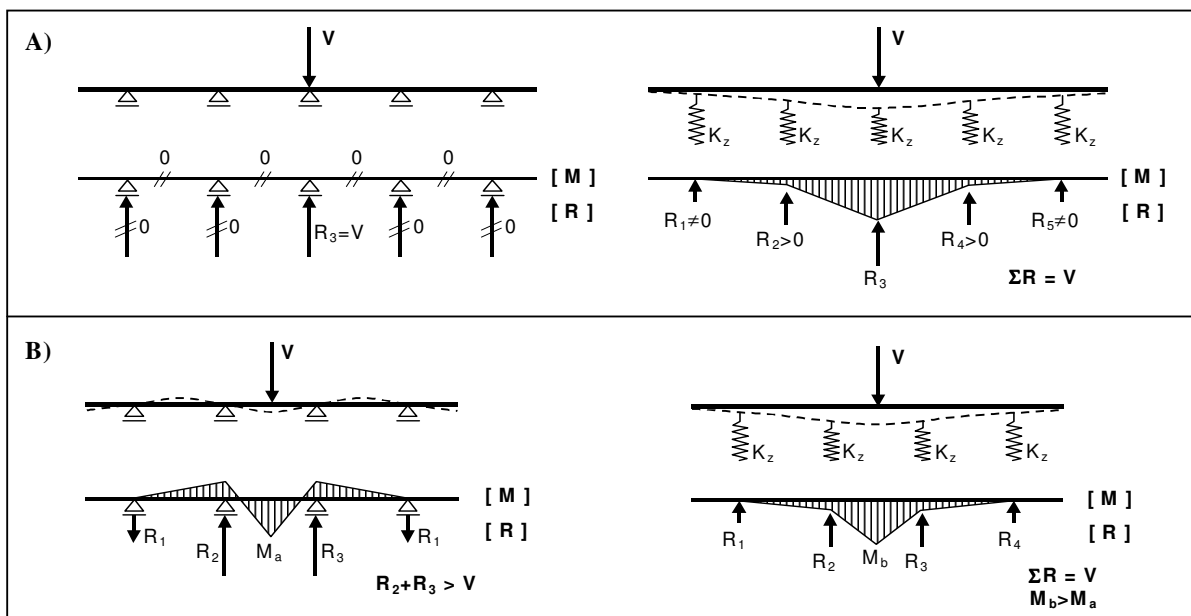
W sprawie obliczania osiadania pali w grupie

Polska Północna, a w szczególności tereny województwa warmińsko-mazurskiego i pomorskiego obfitują w podłoża z gruntami słabonośnymi (obecność gruntów organicznych) lub nośnymi lecz bardzo niejednorodnymi. Wynika to z procesów geologicznych, które ukształtowały geomorfologię tego regionu. Sytuacja ta stwarza wiele ciekawych problemów z punktu widzenia geotechnika lub geologa lecz jest utrapieniem dla projektanta konstrukcji, który musi uporać się z wieloma problemami związanymi z modelowaniem obliczeń statycznych.

Z powodu takich warunków geotechnicznych wiele inwestycji realizowanych na tych obszarach wymusza projektowanie posadowień obiektów na fundamentach palowych.

Wymiarowanie konstrukcji obiektu budowlanego odbywa się zwykle w oderwaniu od obliczeń związanych z

projektowaniem posadowienia tak, jakby były to dwie niezależne części projektu budowli. W przypadku fundamentów palowych powszechnym zwyczajem wśród projektantów jest przyjmowanie sztywnych podpór dla takiego posadowienia budowli. W wyniku obliczeń statycznych otrzymuje się wartości obciążeń, które następnie przenoszone są za pośrednictwem fundamentu na podłoże gruntowe. Zakłada się w ten sposób brak jakichkolwiek osiadań, a przez to pozbawia się konstrukcję oddziaływań, które powinny być uwzględnione w obliczeniach statycznych [1]. W tego rodzaju posadowieniach przemieszczenia fundamentu w dużym stopniu decydują o rozkładzie i wielkości sił przekrojowych w fundamencie i przez to także w konstrukcji nadbudowy. Omawianą sytuację ilustrują schematy przedstawione na rys.1.



Rys. 1. Różnice w wielkościach sił wewnętrznych wynikające z rodzaju przyjmowanych podpór w obliczeniach statycznych [9]

Celem niniejszego artykułu jest zwrócenie uwagi na rolę i znaczenie obliczeń osiadania fundamentów palowych dla obliczeń statycznych całej konstrukcji. Jednocześnie artykuł ten jest okazją do przedstawienia obecnych możliwości obliczeniowych odnośnie osiadania pali w grupie oraz modelowania wzajemnej interakcji między konstrukcją nadbudowy i fundamentem.

Osiadanie w zagadnieniach projektowych posadowienia budowli na palach

Fundamenty palowe są odmianą posadowienia głębokiego (pośredniego), które zasadniczo stosuje się w przypadku, gdy warunki geotechniczne podłoża nie pozwalają na przeniesienie obciążeń z konstrukcji na grunt w sposób bezpośredni. Obecnie, dzięki intensywnemu rozwojowi technologii geoinżynierskich (kolumny iniekcyjne, mikropale iniekcyjne,

kolumny DSM, inne technologie modyfikacji parametrów słabego podłoża itp.), projektant w takich sytuacjach dysponuje dużym wachlarzem sposobów posadowienia. Decyzja odnośnie wyboru najwłaściwszej technologii dla występujących warunków geotechnicznych (i możliwości finansowych inwestora) nie jest najłatwiejsza. Wybór posadowienia na palach wiąże się z kolejnym problemem decyzyjnym odnośnie technologii wykonawstwa pali fundamentowych. W tej dziedzinie projektant również dysponuje szerokim zakresem wyboru, co wynika z intensywnego transferu najnowszych technologii palowych do Polski oraz coraz większych możliwości technicznych polskich firm wykonawczych. Zagadnienia te opisywane między innymi w pracach K. Gwizdały [6, 7, 8] potwierdzają szybki rozwój w tej dziedzinie, co wymusza na projektantach konieczność ciągłego dokształcania się i śledzenia zachodzących zmian.

Dodając do tego fakt, że aktualna polska norma do projektowania pali datowana jest rokiem 1983 [10] (PN-83/B-02482) oraz nieuchronnie zbliżający się termin ostatecznego wprowadzenia całego pakietu europejskich norm projektowania konstrukcji (eurokody), wśród których znajduje się również norma projektowania geotechnicznego [11] (PN-EN 1997-1:2005. Eurokod 7) powoduje, że zagadnienie zaprojektowania fundamentu na palach nie należy do prostych. Jeśli projektant konstrukcji odpowiedzialnie podchodzi do swojego zadania i nie polega tylko na możliwościach obliczeniowych dostępnych programów do projektowania konstrukcyjnego to przekazuje to zagadnienie (czyli projekt posadowienia) inżynierowi geotechnikowi z odpowiednim doświadczeniem (niekoniecznie z uprawnieniami do projektowania konstrukcji budowlanych). Często zadanie takie otrzymuje wykonawca robót palowych dysponujący odpowiednim doświadczeniem w zakresie oceny pracy wykonywanych przez siebie pali.

Projekt posadowienia jest zwykle wykonywany na etapie, gdy na podstawie obliczeń statycznych konstrukcji oszacowane są już wartości obciążeń przekazywane z konstrukcji na fundament. W ten sposób pomija się w całym procesie projektowania efekt wzajemnej współpracy konstrukcji z fundamentem. Elementem takiej interakcji są osiadania, które stanowią dodatkowe oddziaływanie na cały układ konstrukcyjny i wpływają na wartość i rozkład sił wewnętrznych w przekrojach elementów konstrukcyjnych.

Skupiając się dalej tylko na zagadnieniu projektowania posadowienia na palach można wymienić kilka podstawowych zadań:

- określenie wartości i rozkładu obciążeń na poszczególne pale w fundamencie;
- projektowanie pali (wybór technologii, ustalenie wymiarów i liczby pali);
- obliczenie (oszacowanie) osiadania pali w grupie;
- wyznaczenie sił wewnętrznych oraz przemieszczeń (odkształceń) w układzie konstrukcyjnym składającym się z pali i elementów wieńczących pale w grupie (plyta, ławy, ruszt itp.).

Zadania te powinny być rozwiązywane przy właściwie i dostatecznie rozpoznanym podłożu gruntowym. Element ten stanowi dodatkowy kłopot dla projektanta, ponieważ zwykle dysponuje on dokumentacją geotechniczną o zakresie niedostatecznym dla celów projektowych fundamentu głębokiego. Projektant zmuszony więc jest wykonać dodatkowe badania geotechniczne umożliwiające rzetelne zaprojektowanie posadowienia.

Wymienione zagadnienia są wzajemnie powiązane a procedura projektowania powinna mieć charakter iteracyjny

Z powyższego wynika, że obliczenia osiadań stanowią niezbędny składnik właściwego zaprojektowania fundamentu na palach. Ponadto, różne przypadki awarii konstrukcji wskazują, że przekroczenie dopuszczalnych osiadań budowli jest znacznie częściej spotykane niż przekroczenie nośności podłoża. Dlatego też Eurokod 7 [11] duży nacisk kładzie na kryteria stanu granicznego użyteczności.

Mimo tych oczywistych faktów, projektując posadowienie konstrukcji budowlanej na palach zwykle pomija się obliczenia osiadań pali. Wiąże się to z dostępnością odpowiednich narzędzi umożliwiających racjonalne oszacowanie osiadań pali w grupie. Te natomiast wynikają z braku odpowiednich badań w tym zakresie. Taka praktyka powszechna jest nie tylko w Polsce. W tym miejscu przytoczę dwa cytaty dwóch niezaprzeczalnych autorytetów w dziedzinie geotechniki, a pochodzących z różnych kontynentów:

- według B.H. Felleniusa (Kanada-Szwecja, 1999): "Settlement calculations are rarely performed when designing a ordinary pile group. When it is, the methods of

calculation range from those using simple rules of thumb to those incorporating detailed finite element analysis. While the design of pile capacity is often verified by full-scale field testing, design for settlement is almost totally without the benefit of full-scale verification".

- według M.F. Randolph'a (Australia, 2003): „Much of the design of pile foundations is still dominated by estimation of axial capacity, even in applications such as pile groups for buildings and bridge piers, where the critical issue is more likely to be the magnitude of displacements under operating conditions”

Z drugiej strony Eurokod 7 [11] zaleca by zarówno dla sprawdzenia stanów granicznych nośności (ULS) jak i użyteczności (SLS) wykonywać obliczenia osiadań pala pojedynczego i pali w grupie.

W przypadku osiadania pala pojedynczego wynik obliczeń łatwo zweryfikować za pomocą próbnego obciążenia, statycznego lub dynamicznego. Z tego powodu metody analityczne służące określeniu krzywej osiadania pala pojedynczego są bardziej powszechne od metod obliczania osiadania pali w grupie [3].

Praca pali w grupie w sposób jakościowy i ilościowy różni się od pracy pali pojedynczych. Można przyjąć, że nośność pali w grupie jest co najmniej równa sumie nośności poszczególnych pali pojedynczych. Natomiast w przypadku osiadania pali w grupie można z całą pewnością stwierdzić, że osiadanie pali w grupie będzie większe niż osiadanie pala pojedynczego w tych samych warunkach.

Dla wstępnego określenia średniego osiadania fundamentu palowego można wykorzystać wzór [2]:

$$S_G = S_p \cdot n^w$$

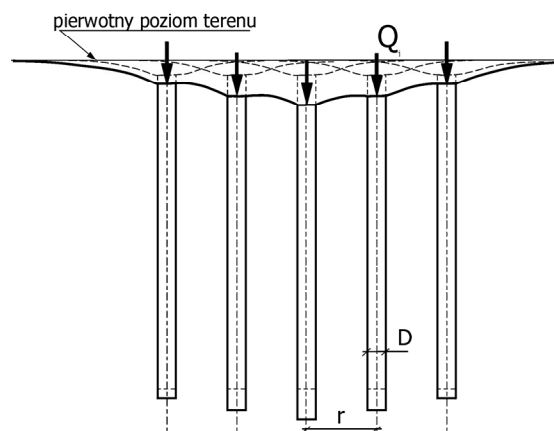
gdzie:

S_p – osiadanie pala pojedynczego;

n – liczba pali w fundamencie;

w – wykładnik ($w = 0.4 - 0.6$).

Wynika to między innymi z wzajemnego oddziaływania między palami, które determinuje pracę pali w grupie. Jeżeli jeden z pali obciążymy siłą osiową, spowoduje to również osiadanie pali sąsiednich. Gdy obciążony jest każdy pal, następuje wzajemne przenikanie i nakładanie pól przemieszczeń oraz stref naprężeń wokół poszczególnych pali (rys.2).



Rys. 2. Schemat osiadania pali w grupie

Metody obliczania osiadania pali w grupie

Zagadnienie oszacowania realistycznych osiadań dla fundamentów palowych jest bardziej skomplikowane niż w przypadku fundamentów posadowionych bezpośrednio. Na

kształt zależności "obciążenie-odkształcenie" ma wpływ bardzo dużo czynników:

- rodzaj obciążenia:
 - ◆ statyczne lub dynamiczne,
 - ◆ krótko- lub długo- trwałe,
 - ◆ pionowe, mimośrodowe, poziome;
- warunki gruntowe:
 - ◆ charakterystyki naprężenie-odkształcenie (statyczne lub dynamiczne),
 - ◆ uwarstwienie podłoża wzdłuż długości pali
 - ◆ uwarstwienie podłoża poniżej podstaw pali (w szczególności warstw o zwiększonej odkształcalności);
- wpływ wykonawstwa pali:
 - ◆ zmiana charakterystyk mechanicznych w czasie,
 - ◆ zmiana charakterystyk mechanicznych w przestrzeni gruntowej: pale wiercone, pale "przemieszczeniowe", np. Atlas, Omega, FDP, itp.,
 - ◆ oddziaływanie naprężeń rezydualnych dla pali wbijanych, w początkowym stadium obciążania pali,
 - ◆ wykonawstwo przy użyciu technik specjalnych powodujące dodatkowe wpływy, np. wplukiwanie powodujące zwiększone rozluźnianie gruntu;
- geometria grupy pali:
 - ◆ rozmieszczenie pali,
 - ◆ różne długości pali,
 - ◆ zmiany przekroju pali, zwiększenie średnicy podstawy;
- oddziaływanie między poszczególnymi elementami grupy:
 - ◆ wzajemne oddziaływanie między palami,
 - ◆ wpływ kontaktu oczep-podłoże.

W rzeczywistości nie jest możliwe uwzględnienie wszystkich tych czynników w jednej metodzie obliczeniowej. Każdy dodatkowy czynnik powoduje konieczność wprowadzenia do obliczeń dodatkowych parametrów, które należy oszacować w wyniku skomplikowanych i drogich badań terenowych lub/i laboratoryjnych. Większa liczba uwzględnianych czynników stawia większe wymagania narzędziom obliczeniowym i powoduje większe skomplikowanie numerycznej procedury obliczeniowej.

Z drugiej strony okazuje się, że stopień skomplikowania modelu obliczeniowego nie zawsze idzie w parze z dokładnością odwzorowania rzeczywistego zachowania układu konstrukcyjnego. W efekcie wszystkie metody obliczeniowe związane są z większymi lub mniejszymi uproszczeniami.

Na świecie istnieje wiele metod służących do wyznaczania osiadania fundamentów palowych począwszy od prostych i mało dokładnych metod empirycznych po wyrafinowane techniki obliczeniowe korzystające z metod numerycznych za pośrednictwem komputerów. Wśród tych metod można wymienić następujące:

- A. metoda współczynnika osiadania; w celu otrzymania średniego osiadania fundamentu palowego wartość osiadania pala pojedynczego (s_p), określoną dla charakterystycznego projektowanego obciążenia, mnoży się przez współczynnik osiadania R , który odzwierciedla tzw. efekt grupy;
- B. metoda fundamentu zastępczego polegająca na zastąpieniu grupy pali zastępczym fundamentem bezpośrednim (equivalent raft method) lub zastępczą kolumną (equivalent pier method); osiadanie fundamentu zastępczego można obliczyć następnie metodami stosowanymi dla tego rodzaju fundamentów;
- C. metody z wykorzystaniem współczynników wpływu przy zachowaniu zasady superpozycji osiadań, współczynniki wpływu odzwierciedlają wzrost osiadania pala w grupie wskutek obciążenia innego pala [12];

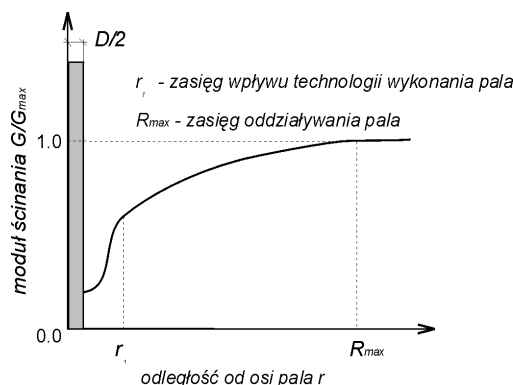
D. metody polegające na modyfikacji krzywej osiadania pala pojedynczego wskutek oddziaływania innych pali w grupie;

E. metody numeryczne takie jak MES, MEB, MRS.

Metody grupy B dość dobrze odzwierciedlają średnie osiadanie fundamentu palowego. Podstawowym ich mankamentem jest brak możliwości określenia osiadań poszczególnych pali w grupie, a przez to brak możliwości uwzględniania różnych obciążeń na pale. Taką samą niedogodność prezentują metody grupy A.

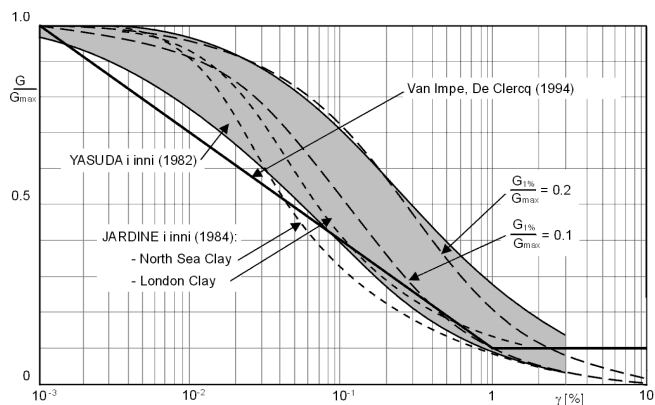
W polskiej normie palowej [10] przytoczono metodę C w wersji z 1980 roku [14]. Metoda ta jest jednak praktycznie nie stosowana. Powodem tego jest uzyskiwanie zawyżonych osiadań w stosunku do obserwowanych w rzeczywistości [4, 18]. Osiadania otrzymywane tą metodą są kilkakrotnie większe od obserwowanych. Różnica jest tym większa, im większa jest liczba pali w grupie. W przykładzie opisywanym w dalszej części artykułu (264 pale) pomierzone osiadania (16 mm) były 6-krotnie mniejsze od obliczonych metodą normową (92 mm). Powodem uzyskiwania tak dużych wartości osiadań jest stosowanie w tej metodzie założeń teorii sprężystości, jak dla ośrodka liniowo-sprężystego, niezależnie od stanu naprężenia. Oznacza to, że stosowana jest stała wartość modułu odkształcenia gruntu, zarówno dla osiadania pala pojedynczego, jak i dla oddziaływania między palami.

Obecne prace Poulos'a [13], autora metody zapożyczonej do polskiej normy palowej [10], wprowadzają rozróżnienie między modułem odkształcenia dla bezpośredniego sąsiedztwa z poboczną palą, modułem odkształcenia pod podstawą pala oraz modułem odkształcenia dla oddziaływania między palami. Moduł odkształcenia dla oddziaływania między palami szacuje się 3-5 razy większy niż dla strefy w bezpośrednim sąsiedztwie pala (rys.3). Ponadto rozpatruje się również interakcje oddziaływań pali o różnych charakterystykach geometrycznych oraz zmienność modułu odkształcenia wzdłuż pala wynikającą z niejednorodnego profilu geotechnicznego. W efekcie nastąpiła radykalna weryfikacja współczynników wpływu w stosunku do tych występujących w normie [10] i pracach [12, 14].



Rys.3. Zmienność modułu odkształcenia gruntu wokół pala

W obliczeniach osiadania decydującym parametrem jest moduł odkształcenia. Parametr ten dla gruntów nie jest wartością stałą nawet w niewielkim zakresie odkształceń. Wykazuje on dużą nieliniowość w stosunku do zmieniającego się odkształcenia. Niektóre z teoretycznych charakterystyk modułu odkształcenia postaciowego przedstawiono na rys. 4.

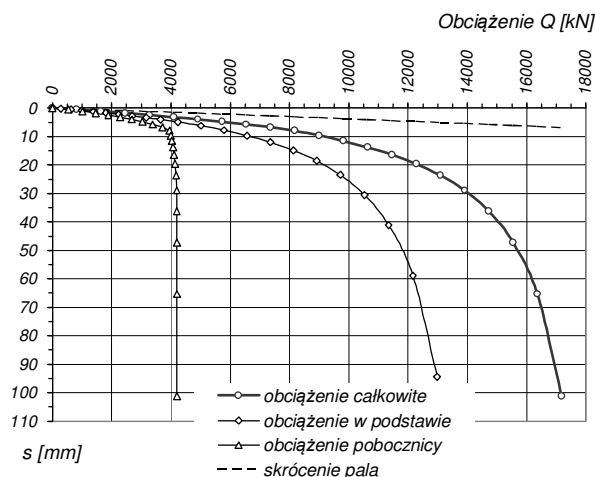


Rys. 4. Funkcje opisujące degradację modułu okształcenia postaciowego G .

W przypadku pali fundamentowych krzywoliniowy charakter zależności między przemieszczeniem i obciążeniem wynika nie tylko z nieliniowości gruntu ale ma związek również ze zjawiskami zachodzącymi w strefie bezpośredniego kontaktu między palem a gruntem. Pal obciążony coraz większą siłą mobilizuje opory na pobocznicy w coraz większym stopniu (rys. 5, a wskutek przekroczenia oporów granicznych wyłączają się z pracy coraz dłuższe odcinki pobocznicy pali. W ten sposób rośnie wielkość obciążenia przekazywana przez dolne części pali oraz podstawę. W tym procesie swój udział ma również uwarstwienie gruntu z różnymi parametrami dla poszczególnych warstw. Do tego nakłada się oddziaływanie między palami w grupie. Oddziaływanie to związane jest z dużo mniejszymi okształceniami gruntu między palami więc mamy tu do czynienia z większymi modułami okształcenia.

Uwzględniając te wszystkie uwagi można skonkludować, że metoda obliczeń osiadania pali w grupie powinna uwzględniać:

- uwarstwienie podłoża gruntowego z właściwymi cechami wytrzymałościowymi poszczególnych warstw,
- zmienność modułu okształcenia poszczególnych warstw gruntowych,
- nieliniową pracę pala w gruncie poprzez uwzględnienie nierównomiernej mobilizacji oporów gruntu wzdłuż pobocznicy i pod podstawą,
- oddziaływanie między palami w grupie w zakresie małych okształceń (moduł okształcenia dla małych okształceń).



Rys. 5. Porównanie krzywych osiadań dla pala pojedynczego, pal wiercony $D=1800$ mm, $L=30$ m [3, 5]

Metoda obliczeń opisywana między innymi w [3, 5] spełnia powyższe kryteria. Za jej pomocą można obliczyć osiadanie poszczególnych pali w grupie osadzonych w uwarstwowionym podłożu. Pojedyncza warstwa opisana jest następującymi parametrami:

- a) graniczny, jednostkowy opór pobocznicy pala τ_f ,
- b) graniczny, jednostkowy opór pod podstawą pala q_f ,
- c) początkowy moduł okształcenia postaciowego G_{max} ;
- d) współczynnik Poissona ν .

Zmienność modułu okształcenia może być opisana dowolną funkcją (rys. 4).

Mankamentem tej metody jest brak możliwości uwzględnienia sztywności oczepu wieńczącego pale. Pale są obciążone siłą skupioną na głowicy a wyniki obliczeń należy traktować jak dla fundamentu wiotkiego.

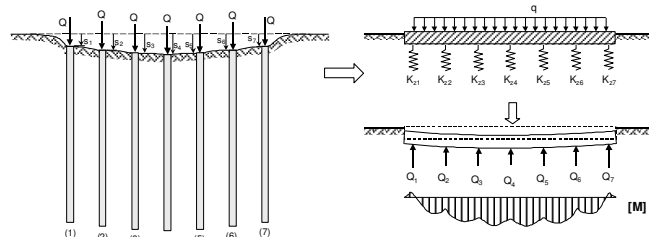
Obliczenia statyczne fundamentów palowych

Poniżej zostanie przedstawiona procedura, która umożliwia projektowanie fundamentów palowych z uwzględnieniem sztywności nadbudowy. Do tego celu potrzebna nam jest metoda obliczania osiadań pali w grupie oraz program do obliczeń statycznych różnych układów konstrukcyjnych. Jest to procedura iteracyjna, w której dostateczną zbieżność wyników kolejnych iteracji uzyskuje się w 3-4 krokach.

Pojedynczy krok obliczeń obejmuje (rys. 6):

- (I) obliczenie osiadań pali w grupie $s_{g,i}$ dla określonych obciążeń na pal Q_i , przy założeniu wiotkiego oczepu;
- (II) obliczenie konstrukcji (oczep + nadbudowa) współpracującej z palami na liniowych podporach sprężystych w miejscu pali (rys. 8) o współczynnikach sprężystości k_i wynikających z obliczeń osiadań w kroku (I);
- (III) obliczenie osiadań pali w grupie dla obciążeń na pal równych wartościom reakcji podpar sprężystych wyznaczonych w kroku (II).

W pierwszym kroku obliczeń siły na poszczególny pal Q_i otrzymuje się z obliczeń statycznych nadbudowy podpartej podporami stałymi. Innym rozwiązaniem jest przyłożenie na każdy pal takiej samej siły, której wartość oblicza się jako średnie obciążenie przypadające na pojedynczy pal.



Rys. 6. Schemat procedury obliczeń statycznych fundamentu palowego [9].

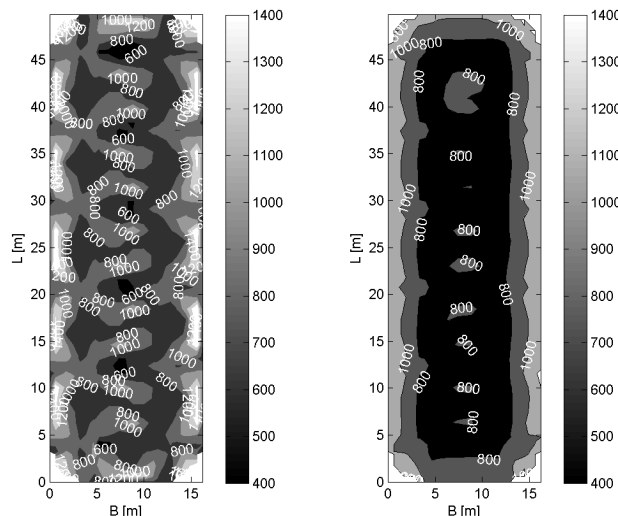
Efekt zastosowania takiej procedury obliczeniowej można prześledzić na podstawie przykładu. Wykorzystano do tego celu obiekt opisywany między innymi w [4]. Fundament stanowi grupa 264 pali rozmieszczonych pod baterią 12 silosów w układzie 2×6 . Do celów analizy głowice pali zwieńczone są płytą żelbetową o grubości 0.5 m, która obciążona została obciążeniem równomiernie rozłożonym. Średnie obciążenie przypadające na pojedynczy pal wynosi $Q = 880$ kN.

Wyjściowe obciążenia do obliczenia osiadania pali można otrzymać na dwa sposoby:

- 1) obliczenie reakcji podpar stałych umieszczonych w punktach rozmieszczenia pali fundamentowych;
- 2) obliczenie średniego obciążenia przypadającego na pojedynczy pal ($Q=880$ kN).

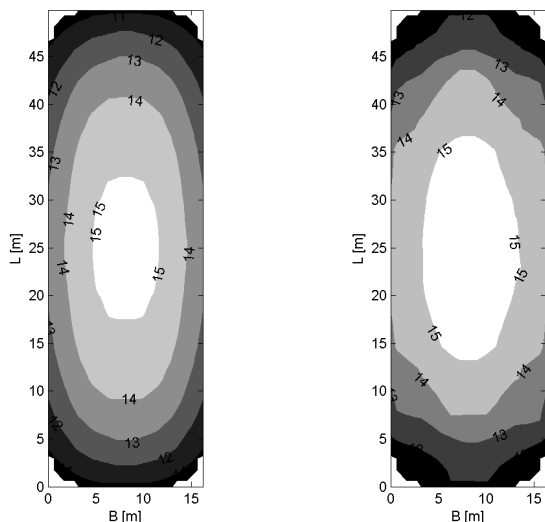
Niezależnie od przyjętego sposobu po 3-4 iteracjach otrzymuje się zbliżone rozwiązanie.

W pierwszym sposobie uzyskuje się bardzo nierównomierne obciążenia na poszczególne pale ($Q_{\max}=1700$ kN, $Q_{\min}=400$ kN) z tendencją do otrzymywania największych wartości na krawędziach fundamentu, rys.7a. Po czwartej iteracji otrzymano dużo bardziej równomierny rozkład obciążeń ($Q_{\max}=1250$ kN, $Q_{\min}=700$ kN), rys.7b.



Rys. 7 Mapy rozkładu obciążeń poszczególnych pali: a) dla podpór stałych; b) dla podpór sprężystych z uwzględnieniem osiadań pali po 4 iteracjach.

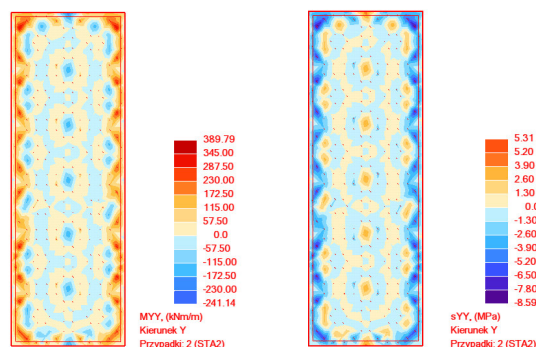
Na rysunku 8 przedstawione są mapy otrzymanych osiadań pali. Możemy zaobserwować wpływ uwzględnienia sztywności fundamentu i dystrybucji obciążeń pali. Po czterech iteracjach obliczeń otrzymuje się bardziej równomierną „nieckę” osiadań pali w grupie, bardziej rozciągniętą, a same osiadania mają wartości nieco większe niż w przypadku fundamentu wiotkiego z palami obciążonymi takimi samymi siłami.



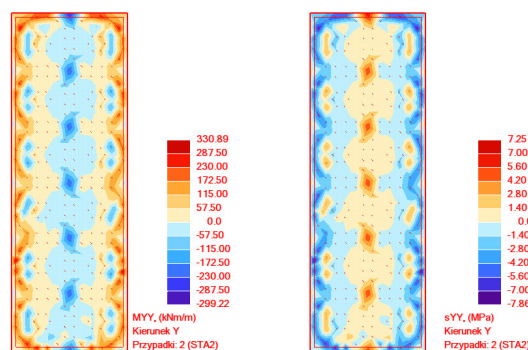
Rys. 8. Mapy rozkładu osiadań poszczególnych pali: a) dla fundamentu wiotkiego i obciążeń $Q=Q_0$; b) dla fundamentu na podporach sprężystych z uwzględnieniem dystrybucji obciążeń pali po 4 iteracjach.

Kolejne rysunki przedstawiają wyniki obliczeń sił wewnętrznych. Możemy na ich podstawie porównać wpływ zastosowanej procedury obliczeniowej na otrzymywane wyniki,

na podstawie których dokonujemy wymiarowania konstrukcji z doбором zbrojenia oraz rodzaju betonu.



Rys. 9. Siły wewnętrzne otrzymane dla fundamentu na podporach stałych: a) momenty zginające dla warstwy dolnej przekroju; b) naprężenia normalne dla warstwy dolnej przekroju.



Rys. 10. Siły wewnętrzne otrzymane dla fundamentu na podporach sprężystych po 4 iteracjach: a) momenty zginające dla warstwy dolnej przekroju; b) naprężenia normalne dla warstwy dolnej przekroju.

Różnice nie są znaczące, aczkolwiek zauważalne. W tym przypadku nie będą one miały większego wpływu na dobór zbrojenia czy klasy betonu. Widać natomiast efekt błędu jakim jest przyjmowanie stałych podpór bez uwzględnienia osiadań pali. W takim przypadku momenty zginające koncentrują się w okolicach podpór zaniżając rzeczywiste ich wartości. Uwzględnienie osiadań poprzez „uwolnienie” podpór palowych powoduje powstanie większych sił wewnętrznych determinujących wymiarowanie elementów konstrukcyjnych. Różnice te z pewnością byłyby większe dla fundamentów z mniej gęstym rozmieszczeniem pali oraz dla większych osiadań. W omawianym przykładzie obciążenie obliczeniowe na pal stanowiło zaledwie połowę nośności obliczeniowej pala.

Podsumowanie

Projektant konstrukcji powinien dążyć do tego, by projektowany obiekt był zaprojektowany optymalnie pod każdym względem. Takie wymagania są narzucane przez rosnące wymagania inwestorów, konkurencję rynkową oraz zwykłe zasady rzetelności sztuki budowlanej. Wydaje się więc oczywiste, że projektant konstrukcji powinien wykorzystać całą swą wiedzę i możliwości obliczeniowe aby wyniki jego obliczeń w jak największym stopniu odzwierciedlały rzeczywiste zachowanie konstrukcji budowlanej.

W przypadku projektowania posadowienia obiektu na fundamencie palowym projektant musi się liczyć z wieloma problemami, które zostały omówione w tym artykule. W tych

zagadnieniach bardzo ważna wydaje się współpraca projektanta konstrukcji z inżynierem geotechnikiem.

Ze względu na złożoność zagadnień występujących w temacie współpracy fundamentu palowego z podłożem gruntowym oraz z konstrukcją nadbudowy wciąż poszukuje się lepszych rozwiązań analitycznych. Należy w tym miejscu podkreślić celowość prowadzenia monitoringu przemieszczeń fundamentu na etapie trwania budowy, jak i w trakcie wieloletniej eksploatacji. Otrzymany na tej podstawie materiał jest doskonałym źródłem wiedzy o współpracy fundamentów z podłożem i może stanowić materiał naukowy służący tworzeniu bardziej racjonalnych metod obliczeniowych [17].

Powszechna praktyka pomijania obliczeń osiadania fundamentu powoduje tym samym nieuwzględnianie oddziaływania, które generuje dodatkowe siły wewnętrzne w przekrojach konstrukcji. Te dodatkowe siły mogą być określone, pod warunkiem zastosowania odpowiednich modeli i procedur obliczeniowych adekwatnych do rozpatrywanego problemu.

W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu obliczeń osiadania pali w grupie na wielkości statyczne otrzymywane w projektowaniu fundamentu palowego. W ten sposób podkreślono znaczenie obliczeń osiadania fundamentu dla poprawnego projektowania fundamentu oraz konstrukcji budowlanej opartej na nim.

Wyniki obliczeń statycznych zaprezentowane w tym artykule uzyskano przy użyciu programu Autodesk Robot Structural Analysis. Innym popularnym programem do

obliczeń podobnych układów jest ABC-Płyta. Porównanie wyników wykazuje jednak dość znaczne różnice nawet dla takiej samej siatki podziału na elementy. Dla wyników obliczeń oprócz samych parametrów wejściowych równie ważna okazuje się procedura obliczeniowa i stosowane rozwiązania numeryczne.

Można do tego dodać słowa prof. Starosolskiego: „Przy zbrojeniu złożonych fundamentów żelbetowych bardziej, niż w przypadku innych elementów konstrukcyjnych, ogromną rolę odgrywa doświadczenie i intuicja inżynierska. Wyniki obliczeń komputerowych są bowiem zawsze rezultatami rozwiązania wirtualnego modelu będącego jedynie przybliżeniem do rzeczywistości fizycznej. Niezależnie od stopnia zaawansowania modelu wyniki obliczeń stanowią jedynie bazę dla ostatecznej decyzji podejmowanej przez projektanta [16].

Szczególnie w tak złożonym problemie, jakim jest współpraca pali z otaczającym, niejednorodnym, często silnie uwarstwowionym podłożem gruntowym wymagane jest szeroko rozumiane „wyczucie inżynierskie”, poparte wszystkimi dostępnymi wynikami badań podłoża, pali oraz obserwacji podobnych rzeczywistych obiektów w fazie eksploatacji.

Zastosowana w opisanym przykładzie metoda obliczeń osiadania pali w grupie była weryfikowana na podstawie pomiarów osiadań rzeczywistych obiektów posadowionych na palach [17], które wykazywały dużą zgodność z wynikami obliczeń.

PIŚMIENNICTWO

- [1] *Dyka I., Srokosz P.: Obliczenia statyczne fundamentów płytowo-palowych*, Materiały XIV Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Geoinżynierii, Augustów-Białystok 2006. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Zeszyt 28, Tom 2.
- [2] *Fleming, W.G.K. i inni: Piling Engineering*. New York and Toronto: John Wiley & Sons 1994.
- [3] *Gwizdała K., Dyka I.: Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego*. Inżynieria i Budownictwo, Nr 12/2001.
- [4] *Gwizdała K., Dyka I.: Ocena wielkości osiadań pali w grupie*. Materiały XLVII Konferencji Naukowej, Opole-Krynica, 2001.
- [5] *Gwizdała K., Dyka I.: Osiadanie pali i fundamentów palowych*. Materiały Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, czerwiec 2004 r.
- [6] *Gwizdała K.: Nowe techniki fundamentowania*. Inżynieria Morska i Geotechnika, Nr 3-4/2003.
- [7] *Gwizdała K.: Pale i fundamenty palowe, projektowanie i realizacja wzmocnień*. Mat. konf. „XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji”. Wisła, 17-2 marca 2009 r.
- [8] *Gwizdała K.: Współczesne technologie pali*. Materiały Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, czerwiec 2004 r.
- [9] *Kraśiński A.: Obliczenia statyczne fundamentów palowych*. Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, 25 czerwca 2004.
- [10] PN-83/B-02482. *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.
- [11] PN-EN 1997-1:2005. Eurokod 7, Projektowanie geotechniczne. PKN, Warszawa, 2005.
- [12] *Poulos H.G.: Analysis of the Settlement of Pile Groups*. *Geotechnique*, Vol. 18/1968, s. 449-471.
- [13] *Poulos H.G.: Pile Group Settlement Estimation — Research to Practice*. Foundation Analysis and Design: Innovative Methods (GSP 153). Proceedings of Sessions of GeoShanghai 2006.
- [14] *Poulos H.G., Davis E.H.: Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [15] *Randolph, M.F.: Science and empiricism in pile foundation design*. *Geotechnique*, Vol. 53, No 10/2003, s. 847-875.
- [16] *Starosolski W.: Metody obliczeń płyt fundamentowych*. Geoinżynieria, drogi, mosty, tunele, Nr 03/2008.
- [17] *Tejchman A, Gwizdała K., Dyka I., Świniński J., Kraśiński A.: Nośność i osiadanie grup palowych*. Monografia, Politechnika Gdańska, 2001.

Notka bibliograficzna

W sprawie obliczania osiadania pali w grupie

Zwrócono uwagę na znaczenie oceny osiadania pali w grupie dla poprawnego projektowania fundamentu oraz całej konstrukcji. Omówiono czynniki wpływające na wiarygodny opis pracy pala w grupie. Przedstawiono metody obliczeń umożliwiające racjonalne oszacowanie osiadań fundamentu palowego. Przedstawiono wyniki analizy wpływu obliczeń osiadania pali na obliczenia statyczne fundamentu palowego.

Regarding the calculation of pile group settlement