

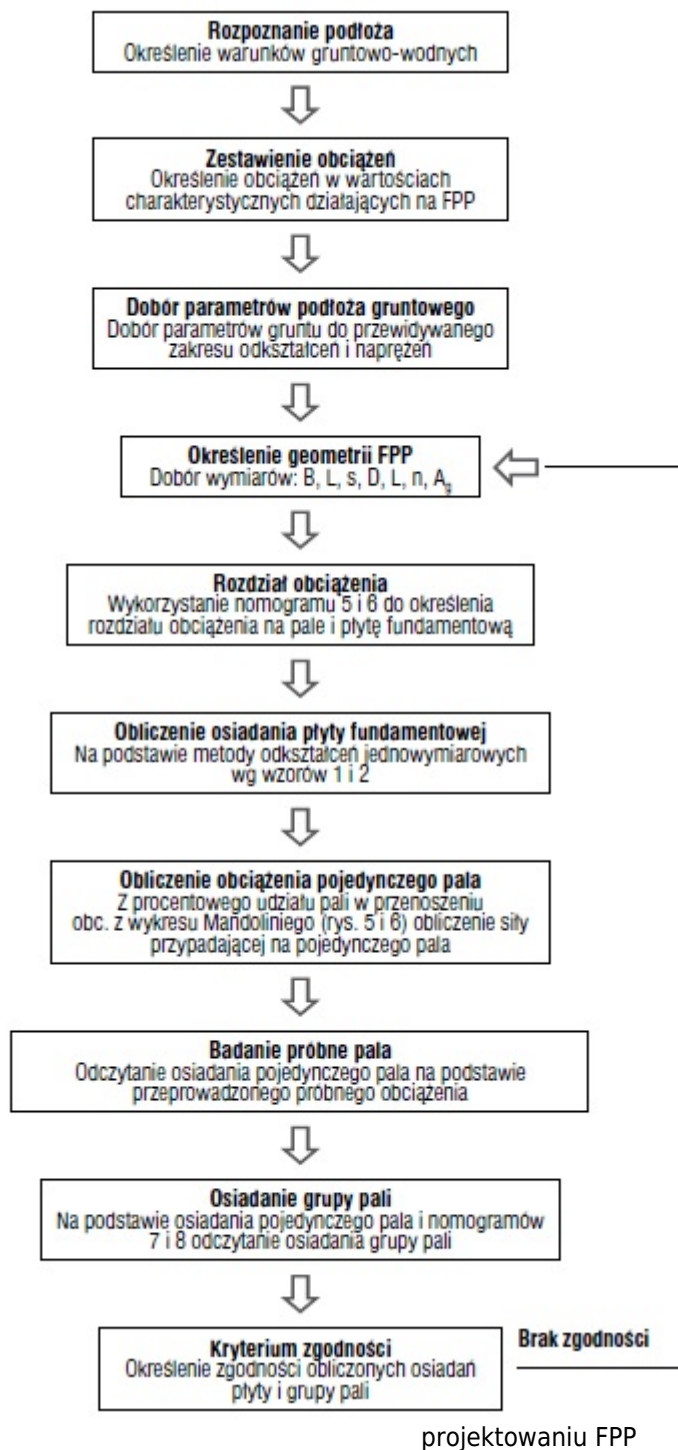
Projektowanie fundamentów płytowo-palowych

Fundamenty płytowo-palowe stanowią optymalne połączenie typowego posadowienia bezpośredniego na płycie z posadowieniem pośrednim na ograniczonej liczbie pali lub baret.

Od początku drugiej połowy dwudziestego wieku zauważa się dynamiczny rozwój największych aglomeracji miejskich świata. Wieżowce, nazywane często „drapaczami chmur”, na dobre zadomowiły się w krajobrazie wielkich nowoczesnych miast, stanowiąc coraz częściej ich integralną całość. Powodów, dlaczego tak się dzieje, można upatrywać m.in. w zauważalnym zapotrzebowaniu na miejsca pracy, będącym konsekwencją wzrastającego zatrudnienia w sektorze usług, powiązanego jednocześnie z rozwojem infrastruktury i transportu miejskiego. Tendencja ta jest potwierdzona faktem, że na świecie w ciągu ostatnich 10 lat powstało około 200 nowych budynków o wysokości przekraczającej 300 m [1]. Panorama Londynu ma wzbogacić się o około 510 budynków ponad 20-kondygnacyjnych [2] w ciągu dekady. W przypadku Polski szczególnie dynamicznie rozwijającym się miastem jest Warszawa, gdzie w ciągu najbliższych kilku lat ma powstać ponad 30 wieżowców wyższych niż 80 m [3, 4]. Stolica Polski ze względu na swoją lokalizację i prestiżowy charakter zachęca największe firmy i oddziały światowych korporacji do rozwijania swojej działalności na terenie miasta. Malejąca ilość dostępnej powierzchni przeznaczonej pod zabudowę, a w związku z tym wzrastające ceny nieruchomości gruntowych, szczególnie w sąsiedztwie I i II linii metra powodują, że inwestorzy zmuszeni są do budowania obiektów coraz wyższych, zajmujących małą powierzchnię w rzucie w stosunku do możliwej do zaoferowania powierzchni użytkowej całego obiektu. Konsekwencją takiego działania jest przekazywanie coraz większych obciążeń na podłoże, pociągających za sobą znaczne osiadania. Budowanie budynków wysokościowych (powyżej 55 m nad poziomem terenu) w bliskim lub bezpośrednim sąsiedztwie istniejącej zabudowy nad- i podziemnej, wymusza zastosowanie odpowiednich typów posadowień. Przed projektantami staje wyzwanie zaprojektowania fundamentów w taki sposób, by zminimalizować wpływ osiadania nowo projektowanych budynków na odkształcenia terenów sąsiednich.

Projektowanie optymalne polega zatem na właściwym doborze grubości płyty fundamentowej uzależnionej od ilości, długości, średnicy i rozstawu pali.

W niniejszym artykule przedstawiono algorytm doboru właściwego rozwiązania fundamentu zespolonego tzn. płytowo-palowego FPP (ang. piled raft foundation) (rys. 1) na podstawie analizy wstecznej zaproponowanej przez Mandoliniego [5], bazującej na praktycznym doświadczeniu współpracy konstrukcji z podłożem, zebranych z 22 obiektów budowlanych. Proponowane podejście analityczne zakłada wykorzystanie pali lub baret w fundamencie płytowo-palowym jako reduktorów osiadania fundamentu.



Rys. 1. Schemat postępowania przy

Fundamenty budowli wysokich

Spośród znanych rodzajów fundamentów do posadowienia budynków wysokich stosowane są najczęściej:

- bezpośrednio – płytowe
- bezpośrednio – płytowe, na podłożu wzmocnionym z wykorzystaniem różnych technologii
 - głębokie – palowe, na baretach oraz studniach
 - fundamenty zespolone, najczęściej płytowo-palowe.

Dobór odpowiedniego sposobu posadowienia zależy od warunków gruntowych, sposobu przekazywania obciążenia na podłoże, warunków wykonawczych, obecności w sąsiedztwie innych budowli oraz poziomu wody gruntowej. Duże obciążenia generowane przez wysokie budynki, które przekazywane są na podłoże gruntowe, wymagają korzystnych warunków posadowienia albo odpowiedniego fundamentu pozwalającego na umiejętną redystrybucję obciążenia na podłoże.

Budynki o wysokości nieprzekraczającej 100 m są najczęściej posadowione na płycie o grubości od 2 do 3

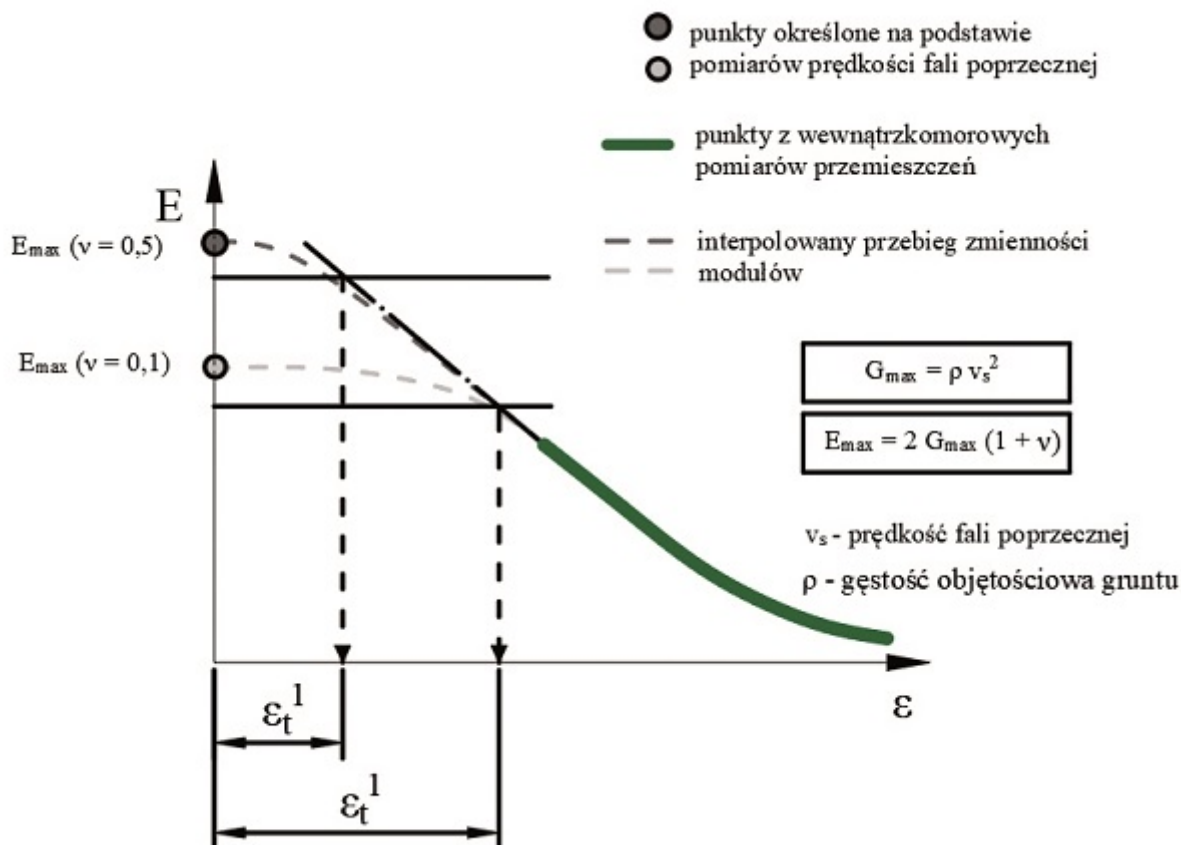
m. Odpowiedni dobór grubości płyty zależy od wielkości przekazywanych przez ściany i słupy obciążeń oraz od ich rozstawu. Ważnym aspektem jest umiejętne dobranie układu konstrukcyjnego obiektu wysokiego, tak aby uzyskać możliwie najbardziej równomierny rozkład momentów zginających w płycie fundamentowej.

Posadowienie obiektów o wysokości ponad 100 m wymaga stosowania fundamentów głębokich pozwalających na odpowiedni rozdział obciążenia pomiędzy płytą fundamentową a palami lub coraz częściej wykorzystywanymi baretami. Stosowane długości pali wynoszą najczęściej od 15 do 30 m, w zależności od wymaganej nośności lub konieczności posadowienia budynku na podłożu nośnym. W celu zwiększenia nośności pali lub baret stosuje się wstępne naprężanie ich podstawy za pomocą niskociśnieniowej (do 2,5 N/mm²) iniekcji cementowej. Za stosowaniem baret w miejscu pali przemawia przede wszystkim wykorzystanie maszyn już używanych na placu budowy do wykonywania ścian szczelinowych. Wykonanie barety będącej pojedynczą sekcją ściany szczelinowej o wymiarach od 60x250 cm do 120x280 cm powoduje znaczne przyspieszenie tempa prac oraz pozwala na osiągnięcie długości rzędu 50 m przekładających się na bardzo dużą nośność. Barety osiągają nośność przekraczającą 30 MN oraz dużą sztywność, którą można dodatkowo zwiększyć poprzez wspomniane wyżej iniekcyjne naprężenie podstawy. W dalszej części artykułu został przedstawiony przykład próbnego obciążenia barety obciążeniem przekraczającym 20 MN.

Rozpoznanie podłoża

Najważniejszym zagadnieniem w przypadku projektowania fundamentu budynku wysokiego jest odpowiednie rozpoznanie podłoża. Poprzez to rozumiane jest dokładne rozpoznanie budowy i układu warstw oraz parametrów opisujących właściwości gruntów zalegających w obszarze przewidywanej inwestycji. Konieczne jest prawidłowe określenie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntów w odniesieniu do zakresu przewidywanych odkształceń i naprężeń. Silna nieliniowość rozkładu modułu odkształcenia gruntu zależy od wielkości zadawanych naprężeń i zakresu przewidywanych odkształceń (rys. 2). Najbardziej miarodajne wyniki parametrów sztywności dają badania laboratoryjne (badania trójosiowe w warunkach bez odpływu i z odpływem z konsolidacją izotropową, badania edometryczne), które pozwalają na bardzo dokładną kontrolę warunków brzegowych odnoszących się do określonego stanu naprężenia i warunków odpływu. Z tych właśnie powodów uznaje się je za referencyjne w stosunku do badań terenowych.

W ostatnim czasie metody sejsmiczne (SCPT, SCPTU, SDMT oraz badania crosshole i downhole) zyskują na popularności ze względu na nieinwazyjny charakter badania oraz szerokie możliwości interpretacji uzyskanych wyników. Metody sejsmiczne polegają na pomiarze prędkości fali poprzecznej i podłużnej, które rozchodzą się w gruncie z różną prędkością w zależności od właściwości ośrodka. Najprostsze w wykonaniu i najtańsze są metody SCPT i SDMT, ponieważ do sond dołączane są geofony rejestrujące fale wywołane na powierzchni ziemi. W celu otrzymania wyników o większej rozdzielczości stosuje się metody CSWS, SASW i MASW, czyli metody powierzchniowego pomiaru refrakcji fal sejsmicznych. Interpretacja badań pozwala między innymi na wyznaczenie położenia zwierciadła wody gruntowej dzięki temu, że fale poprzeczne (S) ulegają odbiciu od jej powierzchni. Najdroższymi i dającymi najbliższe wynikom laboratoryjnym (bender elements w komorze aparatu trójosiowego) są metody downhole i crosshole wykonywane w odwiertach geologicznych. Metody terenowe pomiaru fali sejsmicznej wymagają kalibracji w stosunku do wyników laboratoryjnych. Otrzymane z badań moduły odkształcalności podłoża gruntowego powinny zostać skalibrowane na podstawie doświadczeń i obserwacji osiadań wykonanych obiektów. Stosowanie monitoringu w trakcie budowy pozwala na weryfikację przyjętych założeń.



Rys. 2. Metodyka oszacowania zakresu zmienności odkształceń sprężystych [6]

Wstęp do metody obliczeniowej

Fundament płytowo-palowy to rodzaj fundamentu, który przekazuje w odpowiednich proporcjach obciążenia bezpośrednio na podłoże poprzez płytę oraz za pomocą pali. Metoda analitycznego projektowania takiego układu, proponowana w niniejszym artykule, opiera się na koncepcji minimalizacji osiadań fundamentu dzięki zastosowaniu pali. Stosowanie fundamentu płytowo-palowego pozwala również na optymalizację grubości płyty fundamentowej, co dotyczy szczególnie obiektów o wysokości mniejszej niż 100 m, w przypadku których z reguły niewymagana jest redukcja osiadania. Dla przykładu, bazując na fundamentach płytowo-palowych budynków posadowionych na łąkach frankfurckich, w tabeli 1 zestawiono zmienność grubości płyty fundamentowej w stosunku do ilości zastosowanych pod nią pali.

Projektowanie dużej liczby pali pozwala na stosowanie płyty fundamentowej grubości rzędu 1,0-2,0 m. Należy jednak pamiętać, że ze wzrastającą ilością pali lub baret wzrasta przenoszona przez nie siła, która pociąga za sobą konieczność zbrojenia płyty ze względu na możliwość wystąpienia przebicia płyty fundamentowej. Optymalizacja grubości płyty w stosunku do ilości pali lub baret powinna uwzględniać korzyści wynikające ze zmniejszonego stopnia zbrojenia na zginanie płyty kosztem konieczności dozbrojenia ze względu na możliwość przebicia.

Nazwa obiektu	Grubość płyty [m]	Ilość pali [-]
Messe- Torhaus	2,50	2*42
Messeturm	3,0-6,0	64
DG- Bank	3,0-4,5	40
American Express	2,00	35
Taunustor Japan-Centre	1,0-3,5	25
Forum	1,0-3,0	26/22
Congress Centre Messe Frankfurt	0,8-2,7	141
Main Tower	3,0-3,8	112
Eurotheum	1,0-2,5	25
Frankfuter Welle	1,0-2,2	102

Tabela 1.

Zestawienie grubości płyty od ilości pali w FPP we Frankfurcie [7]

Osiadanie płyty fundamentowej

Pierwszym krokiem przy projektowaniu FPP jest zebranie wszystkich oddziaływań budynku uwzględniając ciężar własny, obciążenia stałe, zmienne oraz wiatr w wartościach charakterystycznych. Kolejnym krokiem przy wymiarowaniu FPP jest prawidłowe rozpoznanie podłoża, które zostało opisane we wcześniejszym akapicie, ze zwróceniem szczególnej uwagi na parametry odkształceniowe podłoża (dobór E od ϵ oraz M lub M w odniesieniu do naprężeń prekonsolidacji).

Prawidłowy dobór modułów odkształcenia M i M wymaga znajomości występujących w gruncie wielkości naprężeń przed wykonaniem konstrukcji, uwzględniających historię obciążeń i zjawiska geologiczne występujące na danym terenie, a także wielkość naprężeń wywołanych wykonaniem projektowanej konstrukcji.

Znając M i M można oszacować osiadania wg metody odkształceń jednowymiarowych podanej w normie [N1] oraz wg instrukcji ITB [N2] stanowiącej uzupełnienie polskiej normy. Wg instrukcji osiadanie warstwy si

zależy od relacji naprężeń od obciążeń budowlą σ_{zq} i odprężenia powstałego w wyniku wykonania wykopu σ_{zs} :

- jeżeli $\sigma_{zq} > \sigma_{zs}$ (w przypadku posadowień płytkich)

$$s_i = s_i'' + s_i' = \lambda_i \cdot \frac{\sigma_{zsi} \cdot h_i}{M_i} + \frac{\sigma_{zdi} \cdot h_i}{M_{0i}}$$

- jeżeli $\sigma_{zq} \leq \sigma_{zs}$ (w przypadku posadowień głębokich)

$$s_i = s_i'' + s_i' = \lambda_i \cdot \frac{\sigma_{zpi} \cdot h_i}{M_i} + \frac{(\sigma_{zqi} - \sigma_{zpi}) \cdot h_i}{M_i}$$

gdzie:

M_i - edometryczny moduł ścisłości wtórnej, ustalony dla gruntu warstwy i

M_{0i} - edometryczny moduł ścisłości pierwotnej, ustalony dla gruntu warstwy i

λ - współczynnik uwzględniający stopień odprężenia podłoża w momencie wykonania fundamentów ($\lambda = 0,7$ - dla gruntów niespoistych, $\lambda = 0,5$ - dla gruntów spoistych)

σ_{zp} - ujemny przyrost naprężeń pierwotnych spowodowany wykonaniem wykopu

σ_{zs} - przyrost naprężeń w zakresie wtórnym

σ_{zd} - przyrost naprężeń w zakresie pierwotnym od sił działających na podłoże

σ_{zq} - naprężenia od obciążenia zewnętrznego podłoża.

Znając poziom osiadań dla płyty fundamentowej bez pali można przystąpić do poszukiwania właściwego rozwiązania FPP polegającego na minimalizacji osiadań poprzez dobór odpowiedniej liczby pali, tak by

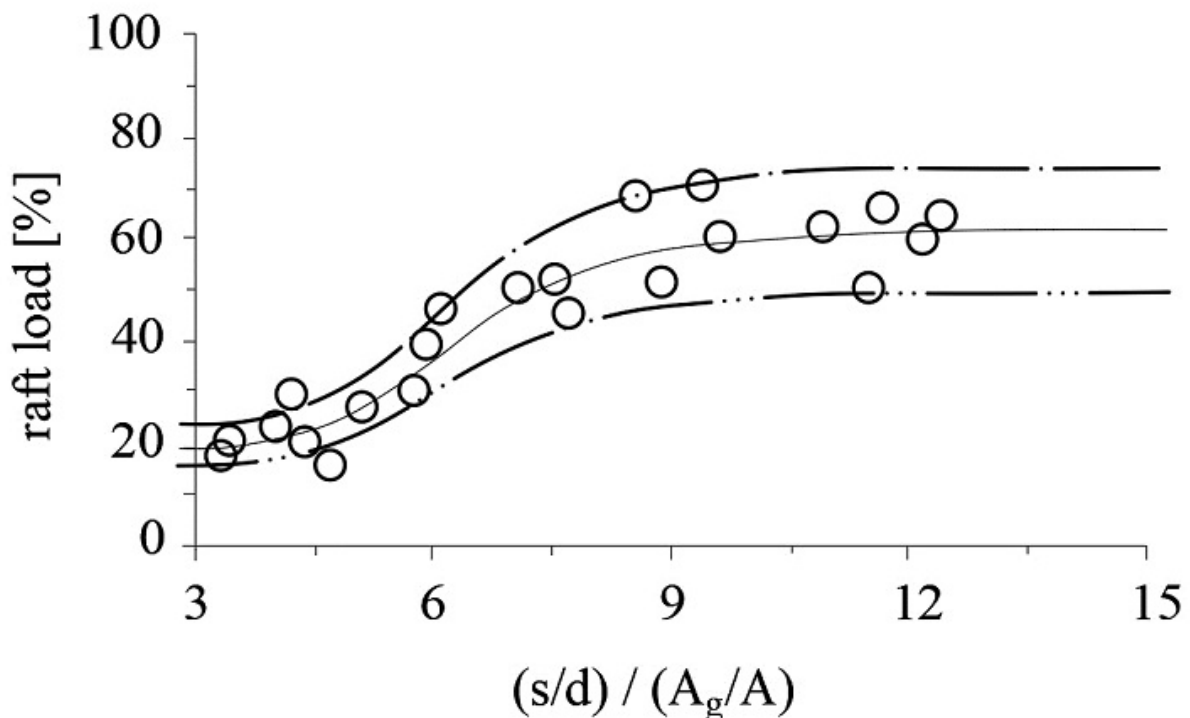
uzyskać dopuszczalną wartość osiadań wg norm PN-B/81 lub Eurokodu.

Reguły doboru pali wg Mandoliniego

Mandolini i inni (1997) [5] oraz Mandolini i Viggiani (1997) [5] zebrali dane dotyczące 22 obiektów posadowionych na fundamentach palowych. W kolejnych latach Viggiani (1998) [5] zwiększył bazę danych do 42 przypadków. Ostatecznie na podstawie danych z 63 udokumentowanych przypadków Mandolini przedstawił algorytm empirycznego określenia wartości osiadania fundamentu palowego (wzory od 3 do 5). Rozkład obciążenia pomiędzy elementami składowymi fundamentu płytowo-palowego jest najważniejszym zagadnieniem w ocenie osiadania. Interakcja konstrukcji z podłożem jest zjawiskiem trudnym w monitorowaniu. Mandolini na podstawie 22 przypadków różniących się zasadniczo warunkami gruntowo-wodnymi, ale posiadających zbliżone sztywności fundamentu i konstrukcji budynku, wyprowadził zależności. Na podstawie danych o długości pali, ich rozstawie, a także wymiarach płyty fundamentowej zobrazowana została zależność pomiędzy obciążeniem przekazywanym na płytę fundamentową a stosunkiem rozstawu pali do średnicy pali.

Graficzna interpretacja powierzchni czynnej grupy pali w układzie płytowo-palowym została przedstawiona na rys. 3, na którym oznaczony został parametr A_g . Parametr ten określa pole powierzchni czynnej grupy pali. Prawidłowe określenie pola powierzchni czynnej grupy pali opiera się na określeniu maksymalnego pola powierzchni pracy pojedynczego pala. Sugerowana przez autora strefa pracy pojedynczego pala jest równa polu powierzchni koła o promieniu równym $3D$. Pale, które znajdują się w zakresie tego pola i charakteryzują się tą samą geometrią, rozstawem i długością analizowane są jako grupa. Metoda Mandoliniego opiera się na założeniu, że wszystkie pale w FPP mają tę samą długość, średnicę i rozstaw.

Na podstawie bezwymiarowego parametru, będącego stosunkiem wartości $(s/d)/(A_g/A)$ została przedstawiona zależność przekazywanego na płytę obciążenia od wartości tego parametru (rys. 3).



Rys. 3. Zależność pomiędzy obciążeniem przekazywanym na płytę fundamentową a rozmieszczeniem pali podzielonym przez stosunek powierzchni A_g/A [5]

Osiadanie grupy pali

Uzyskany rozdział obciążenia pozwala na obliczenie osiadania płyty fundamentowej dla nowej, odczytanej wartości przejmowanego przez płytę obciążenia (na podstawie wzorów 1 i 2).

Rozdzielenie obciążenia pomiędzy płytą a palami przenosi grupa pali, będąca elementem FPP.

Obliczenie osiadania grupy pali jest bardziej skomplikowane i opiera się na empirycznych zależnościach.

Upraszczając podejście obliczeniowe, osiadanie grupy pali można określić za pomocą wzoru:

$$w = R_s w_s = n R_G w_s$$

gdzie:

w_s – wartość osiadania pojedynczego pala przy działającym obciążeniu, po uwzględnieniu jego rozdziału, pomiędzy płytą fundamentową a grupą pali

R_s – parametr rozszerzający, wprowadzony przez Skempton'a i innych (1953) [5] reprezentujący interakcję pali w grupie

$R_G = R_s/n$ – współczynnik redukcji grupy.

Osiadanie pojedynczego pala w_s powinno być wyznaczone na podstawie próbnego obciążenia, którego przykładowy opis został przedstawiony w dalszej części artykułu. Na podstawie doświadczeń Skempton'a i innych (1953) [5], Meyerhofa (1959) [5], Vesica (1969) [5], określenie parametru R_s odniesiono do liczby pali n , rozstawu s i smukłości L/d .

Bazując na przedstawionych wyżej empirycznych zależnościach Mandolini (2005) [5] przedstawił wzory do obliczania górnej wartości $R_{s,max}$ oraz najlepszej estymacji parametru R_s , w funkcji proporcjonalności $R = (ns/L)^{0.5}$ wprowadzonej przez Randolpha i Clancy (1993) [5]:

$$R_{s,max} = \frac{w_{max}}{w_s} = \frac{0.50}{R} \left(1 + \frac{1}{3R} \right) n$$

$$R_s = \frac{w}{w_s} = 0,29nR^{-1.35}$$

Na podstawie danych z 63 obiektów Mandolini (2005) przedstawił powyższe założenia empiryczne w postaci nomogramów.

Badanie próbne pojedynczej baretę lub pojedynczego pala

Tak jak wspomniano powyżej, w celu obliczenia osiadania fundamentu palowego należy określić osiadanie pojedynczego pala w_s , wykorzystując wyniki badania próbnego.

Przykładowe badanie próbne baretę o wymiarach 80x280 cm i długości 34 m zostało przeprowadzone na jednej z budów w centrum Warszawy, dla potwierdzenia założeń posadowienia budynku wysokościowego.

Badanie baretę przeprowadzono metodą tradycyjną z kotwieniem, z krzyżowym ustawieniem baret kotwiących. Konstrukcja obciążająca składała się z belki głównej kotwionej do czterech sąsiednich baret. Długości baret kotwiących dobrane były, zakładając równomierny rozkład siły obciążającej, na każdą z nich.

Kształtowniki zostały oparte o podpory montażowe i połączone z baretami kotwiącymi.

Połączenie kształtowników z baretami kotwiącymi zostało wykonane przy pomocy blachownicy łączącej pręty koszy zbrojeniowych, stalową skrzynkę oraz pręty kotwiące spinające całą konstrukcję powyżej (fot.

1).



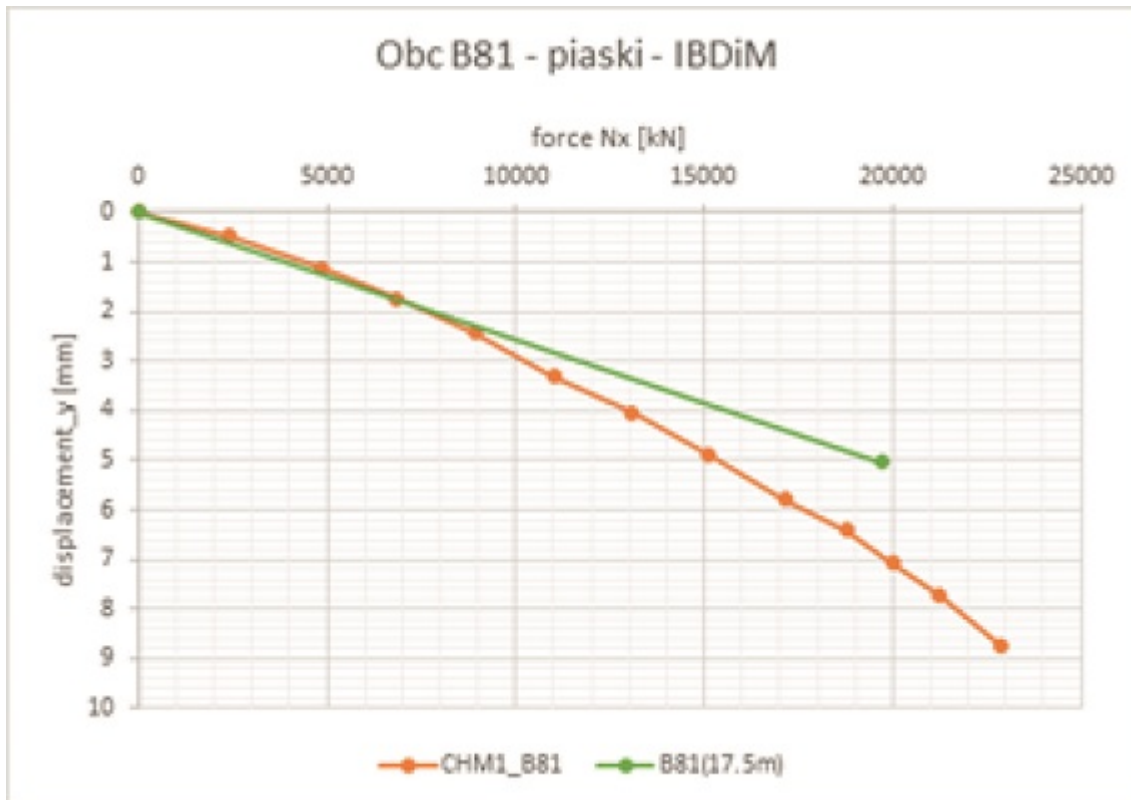
Fot. 1. Widok konstrukcji badanej baretę (fot. autora)

Pomiar obciążeń wywieranych na baretę przy pomocy siłowników hydraulicznych został przeprowadzony na podstawie wartości ciśnienia oleju w siłownikach. Obciążenie realizowane było za pomocą szesnastu siłowników hydraulicznych podłączonych do wspólnej pompy hydraulicznej. Za pomocą czujników zegarowych przymocowanych do głowicy baretę i opartych stopkami o sztywną belkę mierzono przemieszczenie obciążanej baretę. Niezależnie od pomiaru czujnikami przemieszczeń, osiadanie baretę mierzono metodą niwelacji geodezyjnej. Przemieszczenia baret kotwiących mierzono pojedynczymi czujnikami zegarowymi.

Standardowo, w celu zwiększenia nośności i minimalizacji osiadania baretę zastosowano naprężanie podstawy poprzez iniekcję niskociśnieniową. Po wybetonowaniu wykonano iniekcję za pomocą przygotowanych rurek zastrzykowych pod podstawę baretę zakończoną elastyczną przeponą w dwóch etapach zgodnie z patentem Instytutu Badawczego Dróg i Mostów. Każdy z etapów zakładał naprężenie podstawy baretę do ciśnienia o wartości $2,5 \text{ N/mm}^2$.

Uzyskane wyniki badania próbnego obciążenia baretę przedstawiono na rys. 4. Krzywa CHM1_B81 przedstawia przyrost osiadania głowicy baretę o długości 34 m w zależności od wartości siły przykładowej do głowicy baretę. Linia prosta B81 stanowi interpretację wyników pomiaru siły za pomocą ciągu ekstensometrycznego na głębokości odpowiadającej lokalizacji docelowej głowicy baretę o długości 17,5 m, z uwzględnieniem skrócenia sprężystego części baretę powyżej docelowego poziomu posadowienia płyty fundamentowej.

Znając osiadanie pojedynczego pala/baretę dla zakładanej siły obciążającej pal/baretę w fundamencie płytowo-palowym, na podstawie wzoru 3 można obliczyć osiadanie grupy pali. Ostatnim etapem projektowania fundamentów płytowo-palowych, sprawdzającym poprawność przyjętych założeń (danego schematu FPP), jest spełnienie kryterium zgodności osiadania płyty fundamentowej i grupy pali.



Rys. 4.

Wyniki badania próbnego obciążenia baret

Podsumowanie

W związku z zauważalnym w ostatnim czasie trendem budowania budynków wysokich należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór rozwiązania fundamentu płytowo-palowego. Najważniejszym zagadnieniem jest prawidłowe rozpoznanie podłoża do odpowiedniej głębokości przy założeniu przewidywanych wielkości naprężeń i odkształceń. Proponowana przez Mandoliniego (2005) metodyka obliczania układów płytowo-palowych opiera się na doświadczeniu zdobytym przy pomiarze rozdziału obciążenia na płytę i pale z 22 obiektów, na podstawie których wyprowadzono empiryczne zależności rozkładu obciążenia w fundamencie FPP.

Dodatkowo należy pamiętać, że projektowanie tego typu konstrukcji wymaga kontroli warunków gruntowo-wodnych i monitorowania samej konstrukcji w trakcie budowy i po jej wykonaniu. Prawidłowy monitoring pozwala na sprawdzenie przyjętych założeń i przeprowadzenie analizy wstecznej, celem dokładniejszego rozpoznania interakcji konstrukcji z podłożem, szczególnie przy rozwiązaniu posadowienia z użyciem fundamentu płytowo-palowego.

dr inż. Grzegorz Kacprzak
Instytut Dróg i Mostów,
Politechnika Warszawska

Normy i rozporządzenia

N1. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.

N2. Geotechnika. Projektowanie posadowień bezpośrednich. Zmiana PN-81/B-03020, Konferencja Naukowo-Techniczna „Harmonizacja polskich norm geotechnicznych z systemem norm europejskich”, T.1., Mrągowo, listopad 2000.

Literatura

1. Poulos H.G., *Tall Building Foundation Design*, 2017.

2.

www.theguardian.com/business/2018/apr/18/londons-skyline-soars-with-record-510-tall-buildings-in-pipeline

3. www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1966962

4.

www.warszawa.naszemiasto.pl/arttykul/warszawa-przyszlosci-poznaj-wiezowce-ktore-powstana-za,3483818,-galop,t,id,tm.html

5. Mandolini A., Russo G., Viggiani C., *Pile Foundations: Experimental investigations, analysis and design*, Proc, ICSMGE, Osaka, 2005.

6. Lipiński M.J., *Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych*, Rozprawa habilitacyjna, Przewód przeprowadzony na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2013.

7. Hemsley J.A., *Design applications of raft foundations*, 2000.