

Analiza sprężystej płyty na palach z uwzględnieniem krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, mgr inż. Piotr Cichocki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Wykorzystanie fundamentów płytowo-palowych nabiera coraz większego znaczenia. Jest to związane z dążeniem do minimalizacji kosztów inwestycji, a w związku z tym również czasu ich trwania. Badane fundamenty, ze względu na stawiane przed nim zadania, korzystnie wpisują się w obecną tendencję procesu inwestycyjnego. Pali służą ograniczeniu osiadania i jego wyrównaniu, przenosząc jedynie częściowo obciążenie przekazane przez płytę fundamentową. Odpowiednie usytuowanie pali wpływa także na redukcję sił wewnętrznych w płycie fundamentowej, co bezpośrednio przekłada się na jej wymiarowanie.

Przeprowadzona analiza pali służących ograniczeniu osiadania jest zagadnieniem złożonym. Jest to związane z trudno-

ścią wiarygodnego jednoczesnego określenia relacji obciążenie - osiadanie pala, a także obciążenie - osiadanie płyty. Analizę komplikuje dodatkowo wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża (rys. 1).

W Eurokodzie 7 próbne obciążenie statyczne pala wymieniono jako jedną z metod projektowania. Niewątpliwie uzyskane na tej podstawie wyniki pełnią ważną rolę poznawczą zachowania się pojedynczego pala w zadanych warunkach gruntowych. Na potrzeby prowadzonych badań wykorzystano krzywą zaproponowaną przez Meyera i Kowalowa (MK), aproksymującą wyniki próbnego obciążenia statycznego pala [6]. Wykorzystana krzywa umożliwia, po statystycznym wy-

- N_{gr} – nośność graniczna pala, odpowiadająca obciążeniu pala w głowicy wywołującemu osiadanie bez zmiany oporu [kN],
 C – parametr krzywej MK [mm/kN],
 κ – parametr krzywej MK [–],
 E – moduł ścisłości gruntu [MPa],
 γ – ciężar objętościowy gruntu [kN/m³],
 ϕ – kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°],
 $B_1 \times B_2$ – wymiar płyty fundamentowej [m],
 hp – długość pala [m],
 D – średnica pala [m],
 λ – obwód pala [m],
 s – ugięcie / osiadanie płyty fundamentowej [mm],
 L – odległość pomiędzy badanym profilem a punktem przyłożenia obciążenia [m],
 x, y, z – osie prostokątnego układu współrzędnych.

Do opisu matematycznego zjawiska przyjęto następujące założenia:

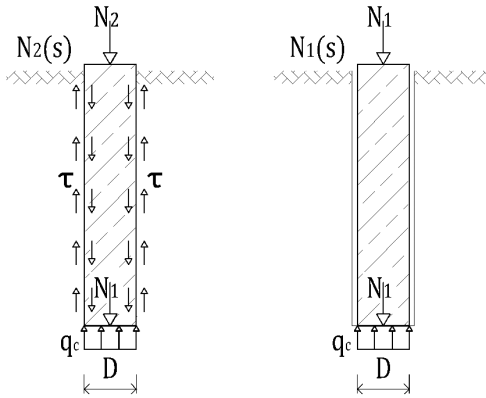
- pionowe obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni płyty,
- uwzględniono jedynie pionową składową naprężenia w gruncie,
- podłoże pod płytą składa się maksymalnie z trzech warstw geotechnicznych o znanych parametrach,
- sprężysta płyta spoczywa na odkształcalnych palach i półprzestrzeni sprężystej gruntu,
- nieliniowy model obciążenie – osiadanie pala pojedynczego według krzywej (MK),
- mobilizacja naprężenia wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala według krzywej (MK),
- opór gruntu wzdłuż pobocznic uśredniony, stały na całej długości pala,
- osiadania cząstkowe pól elementarnych płyty i pali wyznaczono uwzględniając zasięgi stref aktywnych naprężenia według Meyera [8],
- obowiązuje zasada superpozycji naprężeń.

Wiarygodną charakterystykę pracy pojedynczego pala w gruncie pod wpływem obciążenia przyłożonego w głowicy uzyskujemy na podstawie próbnego obciążenia statycznego. Wyniki pomiarów są aproksymowane krzywą (MK) [6], w postaci:

$$s(N_2) = \frac{C \cdot N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_2}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (3)$$

a jej parametry C oraz K wyznaczano na podstawie metod statycznych [14]. Przedstawiona metoda umożliwia ekstrapolację krzywej obciążenie – osiadanie, poza zakres testu statycznego pala, do jego nośności granicznej.

Mobilizację oporów wokół pala określono przez dwukrotne wykorzystanie krzywej (MK) [7, 9] charakteryzującej relację obciążenie – osiadanie pala dla podstawy i pobocznic (rys. 3). Pierwszy stan jest typowy dla próbnego obciążenia statycznego pala, natomiast drugi stan uwzględnia jedynie opór pod jego



Rys. 3. Schemat analizowanych stanów oporu wokół pojedynczego pala

podstawą. Parametry charakteryzujące krzywą (MK) w stanie drugim przyjęto, przy założeniu $E_q = 4 q_{c,s}$, za [8]:

$$s(N_1) = \frac{C_1 \cdot N_{gr1}}{\kappa_1} \left[\left(1 - \frac{N_1}{N_{gr1}} \right)^{-\kappa_1} - 1 \right] \quad (4)$$

$$N_{gr1} = \frac{1}{8\pi} \cdot E_q \cdot D^2 \cdot \left(\frac{hp}{D} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{4}{3\pi \cdot E_q \cdot D} \quad (6)$$

$$\kappa_1 = \frac{2}{3} \cdot \kappa \quad (7)$$

Mobilizację oporu wzdłuż pobocznicy pala wraz z osiadaniem określa ostatecznie zależność:

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (8)$$

Wzajemne oddziaływanie pali w grupie określono na podstawie osiadań cząstkowych. Uzyskano je przez odpowiednie całkowanie rozkładów naprężeń w gruncie, w zakresie stref aktywnych, generowanego przez pobocznice i podstawę pali sąsiednich.

Osiadanie pala wywołane naprężeniami wzdłuż pobocznicy pala sąsiedniego określa wzór:

$$s = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi \cdot E_q} \cdot \left[\ln \left| \frac{z_{02} + \sqrt{z_{02}^2 + L^2}}{z_{02} + hp + \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + L^2}} \right| + \frac{z_{02} + hp}{3 \cdot \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + L^2}} - \frac{z_{02}}{3 \cdot \sqrt{z_{02}^2 + L^2}} + \ln \left| \frac{L}{\sqrt{hp^2 + L^2} - hp} \right| - \frac{hp}{3 \cdot \sqrt{hp^2 + L^2}} \right] \quad (9)$$

natomiast osiadanie pala wywołane naprężeniem w podstawie pala sąsiedniego:

$$s = \frac{N_1}{2\pi \cdot E_q} \cdot \left[\frac{2}{L} - \frac{3 \cdot z_{02}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{02}^2 + L^2}^3} \right] \quad (10)$$

Osiadania cząstkowe, charakteryzujące wzajemne oddziaływanie płyty fundamentowej z podłożem i palami, przedstawiono w pracy [5].

ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Proponowana metoda polega na wyznaczeniu takiego rozkładu naprężeń kontaktowego płyty, pali i podłoża, aby odkształcenia płyty i osiadania podłoża w węzłach obliczeniowych były jednakowe. W tym celu płytę podzielono na pola elementarne. Osiadanie każdego z pól płyty i pali stanowi sumę osiadań cząstkowych wywołanych każdorazowo obciążeniem własnym oraz pozostałymi elementami fundamentu. Opracowano program obliczeniowy rozwiązujący metodą różnic skończonych równanie (1). Współczynniki podatności podpór określono, bazując na zasadzie superpozycji naprężeń, z zależności:

$$\begin{bmatrix} s_R \\ s_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [WRR] & [0] & [WN_1R] & [WTR] \\ [WRP] & [WN_2P] & [WN_1P] & [WTP] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [R_R] \\ [N_2] \\ [N_1] \\ [T] \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} k_R \\ k_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_R/s_R \\ R_P/s_P \end{bmatrix} \quad (11)$$

gdzie:

- $[k_R]$ – wektor współczynnika podatności podpór płyta - podłoże,
- $[k_P]$ – wektor współczynnika podatności podpór płyta - pale,
- $[R_R]$ – wektor naprężeń w powierzchni kontaktowej płyta fundamentowa - podłoże,
- $[R_P]$ – wektor naprężeń w powierzchni kontaktowej płyta fundamentowa - pale,
- $[s_R]$ – wektor osiadania pól elementarnych płyty fundamentowej,
- $[s_P]$ – wektor osiadania pali,
- $[N_2]$ – wektor sił w głowicach pali,
- $[N_1]$ – wektor sił w podstawie pali,
- $[T]$ – wektor naprężeń na pobocznicy pali,
- $[WRR]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia pod płytą na osiadanie pól płyty,
- $[0]$ – macierz zerowa,
- $[WN_1R]$ – macierz współczynników wpływu sił w podstawach pali na osiadanie pól płyty,
- $[WTR]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia na pobocznicych pali na osiadanie pól płyty,
- $[WRP]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia pod płytą na osiadanie pali,
- $[WN_2P]$ – macierz współczynników wpływu sił w głowicach pali na osiadanie pali,
- $[WN_1P]$ – macierz współczynników wpływu sił w podstawie pali na osiadanie pali,
- $[WTP]$ – macierz współczynników wpływu naprężenia na pobocznicy pali na osiadanie pali.

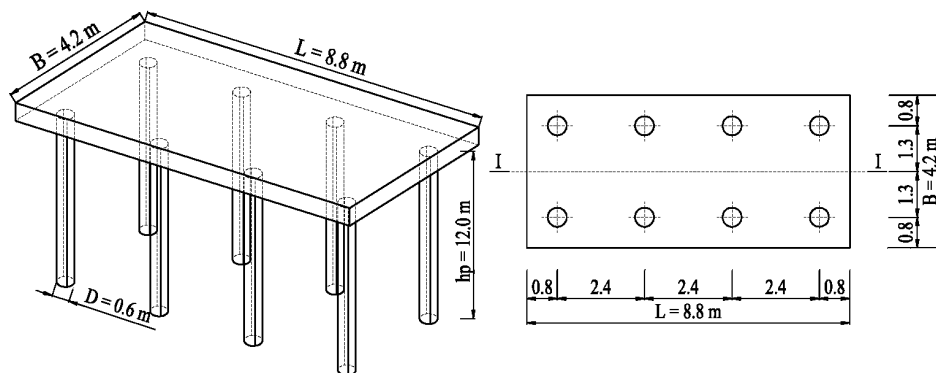
Opracowano program obliczeniowy rozwiązujący powyższe zagadnienie metodą iteracyjną.

PRZEGLĄD SYSTEMATYCZNY ROZWIĄZANIA

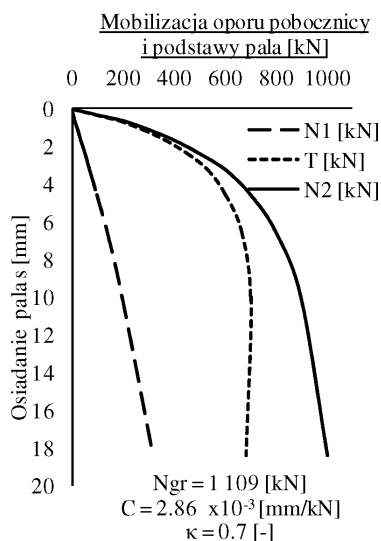
Badanie wpływu sztywności płyty fundamentowej na jej ugięcie, stopień mobilizacji oporu gruntu wokół pala oraz udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże opracowano proponowanym modelem i przedstawiono na przykładzie z rys. 4.

Płyta fundamentowa spoczywa na podłożu i palach, w zadanych warunkach gruntowych, o parametrach geotechnicznych zestawionych w tabl. 1.

Wyniki próbnego obciążenia pala przedstawiono w tabl. 2, parametry charakteryzujące krzywą (MK) przedstawiono natomiast na rys. 5.



Rys. 4. Schemat analizowanego fundamentu



Rys. 5. Mobilizacja oporu gruntu wzdłuż pobocznic i pod podstawą pala podczas próbnego obciążenia pala

Tabl. 1. Profil geotechniczny

Warstwa	Rodzaj gruntu	Mięższkość [m]	γ [kN/m ³]	ϕ [°]	E [MPa]
I	il pylasty	4,0	17	10	7,0
II	gliny pylaste / pyl	—	20	20	19,0

Tabl. 2. Wyniki próbnego obciążenia statycznego pala

N_p [kN]	140	280	420	560	700	840	940	1040
s [mm]	0,4	0,8	1,7	3,4	6,3	10,4	15,3	25,8

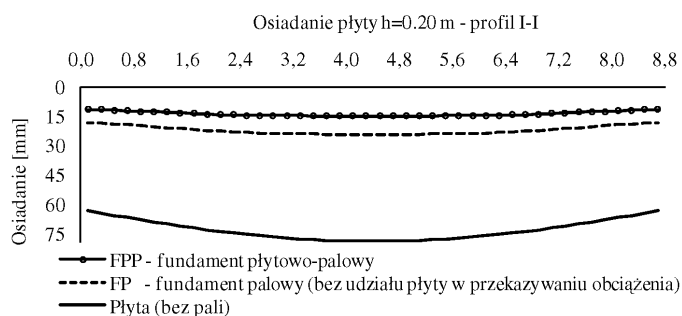
Wpływ sposobu posadowienia na osiadanie fundamentu

Przygotowany przykład obliczeniowy przedstawia wpływ sposobu posadowienia na jego osiadanie. Badanie fundamentu wykonano dla obciążenia równomiernie rozłożonego na powierzchni płyty o wartości $q_0 = 180$ kPa. Obliczenia przeprowadzono dla płyt o grubości 20 cm i 60 cm, wyróżniając trzy następujące sposoby posadowienia:

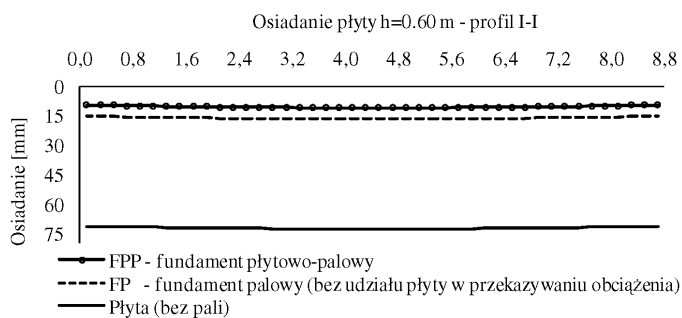
- fundament płytowo-palowy FPP – obciążenie przekazywane na podłoże przez grupę pali i płytę,
- fundament palowy FP – obciążenie przekazywane na podłoże w całości przez grupę pali,
- płyta – obciążenie przekazywane na podłoże w całości przez płytę.

Zgodnie z oczekiwaniami uzyskano symetryczną linię ugięcia płyt. Największe osiadania, przekraczające dopuszczalne, wyznaczono dla płyty spoczywającej na podłożu. Dla tego sposobu posadowienia stwierdzono także największą nierównomierność osiadania pomiędzy środkiem i krawędzią płyty (rys. 6). Fundament palowy, w zadanych warunkach gruntych, cechuje się znacznym ograniczeniem osiadania. Natomiast uwzględnienie płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże dodatkowo redukuje osiadanie i ugięcie płyty.

Wzrost sztywności płyty redukuje nierównomierne osiadanie fundamentu (rys. 7). Ponadto można zaobserwować niewiel-



Rys. 6. Wpływ sposobu posadowienia na osiadanie płyty fundamentowej grubości 20 cm



Rys. 7. Wpływ sposobu posadowienia na osiadanie płyty fundamentowej grubości 60 cm

ki wpływ sztywności płyty na średnią wartość osiadania fundamentu, która nieznacznie maleje wraz ze wzrostem sztywności. Przyczyn powyższego zjawiska należy szukać w większym udziale pali narożnych w przekazywaniu obciążenia na podłoże dla płyty o grubości 60 cm.

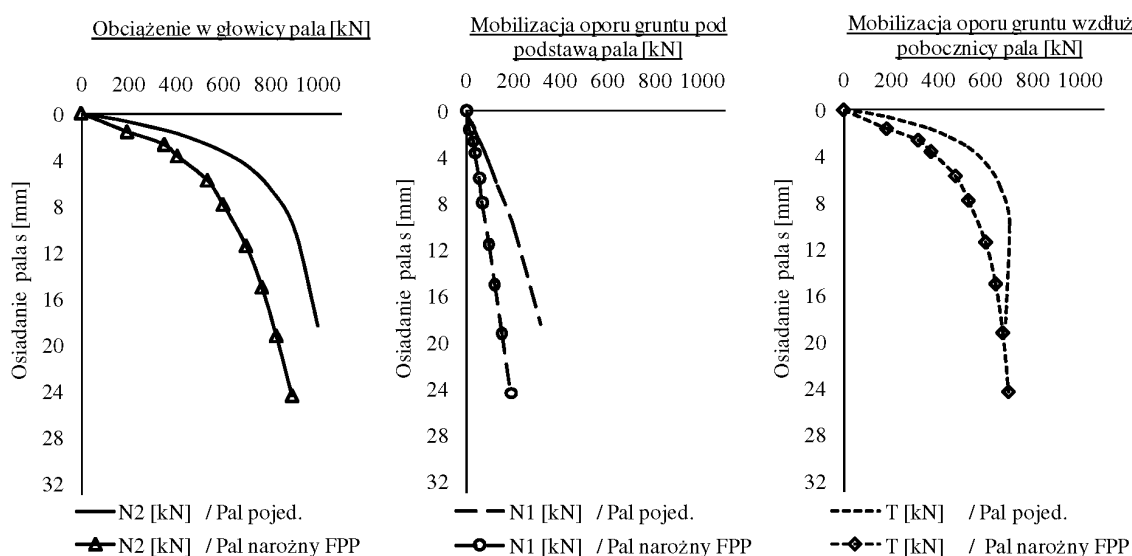
Wpływ sztywności płyty i usytuowania pali na mobilizację naprężenia wzdłuż pobocznicy i pod podstawą

Badanie mobilizacji naprężenia wokół pali pracujących w grupie z uwzględnieniem udziału płyty przeprowadzono w zakresie obciążenia q_0 od 0 do 260 kPa. Analizie poddano sztywność płyty scharakteryzowaną grubością 20 i 60 cm oraz usytuowanie pali pod płytą.

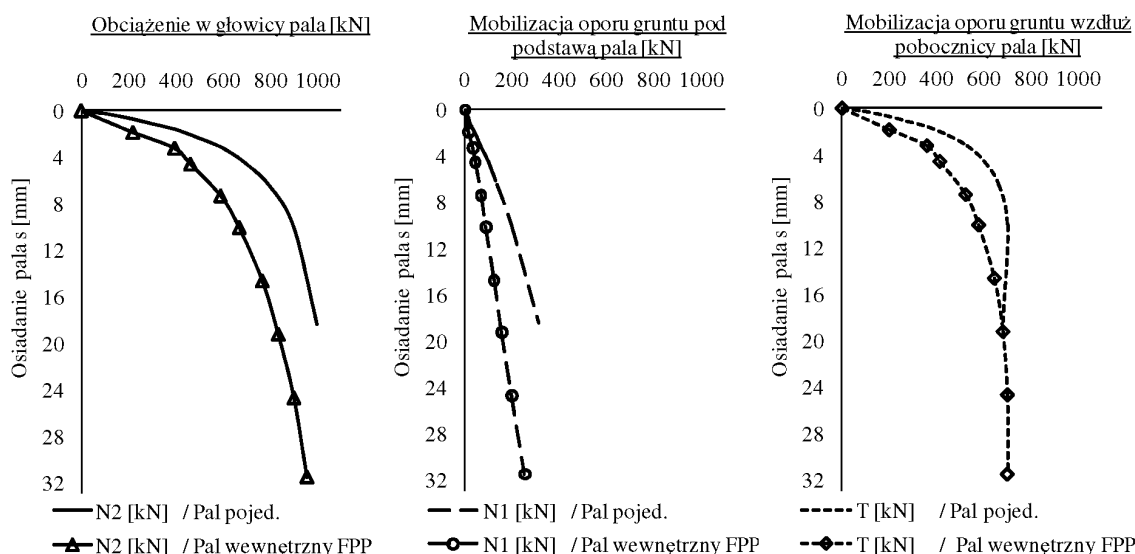
Dla pali pracujących w grupie, z dodatkowym uwzględnieniem płyty w przekazywaniu obciążenia na podłoże, mo-

bilizacja naprężenia wokół pali przebiega w sposób odmienny niż podczas analizy pala pojedynczego. Wynika to z faktu, że mobilizacja naprężenia wzdłuż pobocznicy i pod podstawą pali rośnie wraz ze wzrostem osiadania wywołanego obciążeniem pala w głowicy. Osiadanie pali fundamentów płytowo-palowych dodatkowo uwzględnia wzajemne oddziaływanie płyty, pali i podłoża, co wywołuje większe osiadania przy danym stopniu obciążenia pala w głowicy (rys. 8 i 9).

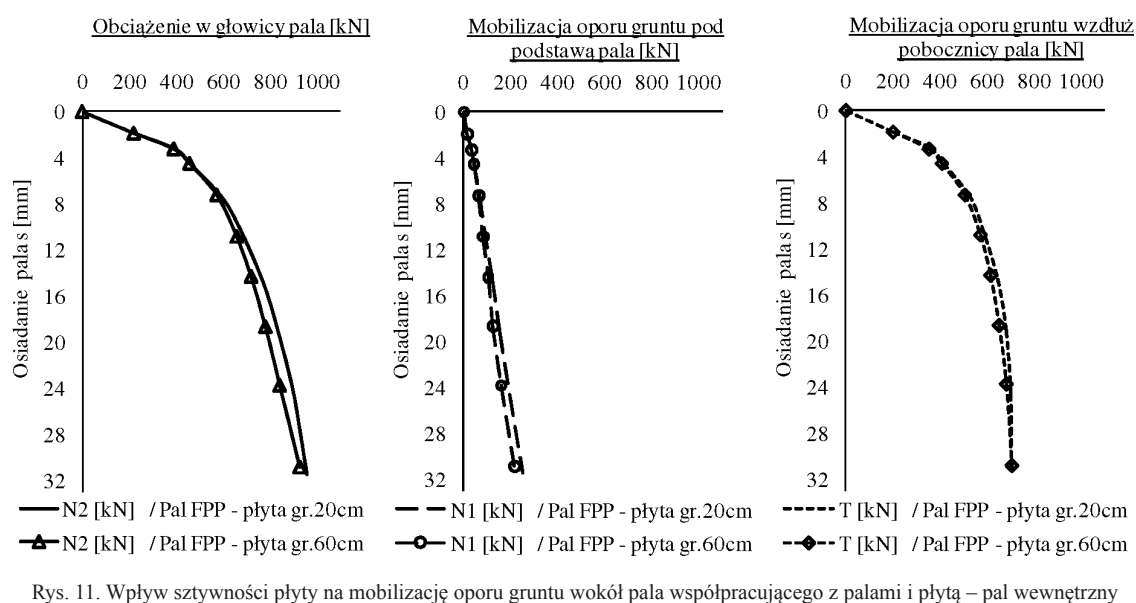
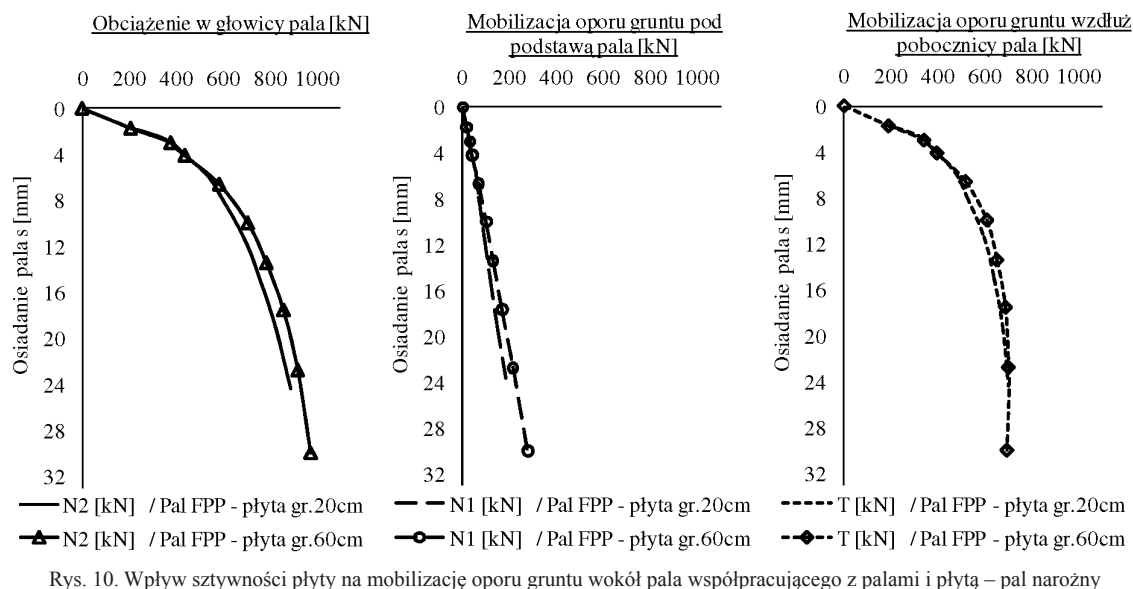
Model obliczeniowy umożliwia uwzględnienie wpływu sztywności płyty na wzajemną współpracę pali w przekazywaniu obciążenia, z uwzględnieniem jednocześnie stanu naprężenia wynikającego z wzajemnej interakcji między palami w gruncie. Dla płyty o grubości 20 cm pale wewnętrzne są bardziej obciążone, wykazując jednocześnie większe osiadania, w porównaniu z palami narożnymi (rys. 8 i 9). Natomiast dla płyty o grubości 60 cm to pale narożne przekazują większe obciążenie, a osiadanie płyty można przyjąć za równomierne (rys. 10 i 11).



Rys. 8. Porównanie mobilizacji oporu gruntu wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i pala współpracującego z palami i płytą grubości 20 cm – pal narożny



Rys. 9. Porównanie mobilizacji oporu gruntu wokół pala podczas próbnego obciążenia statycznego i pala współpracującego z palami i płytą grubości 20 cm – pal wewnętrzny

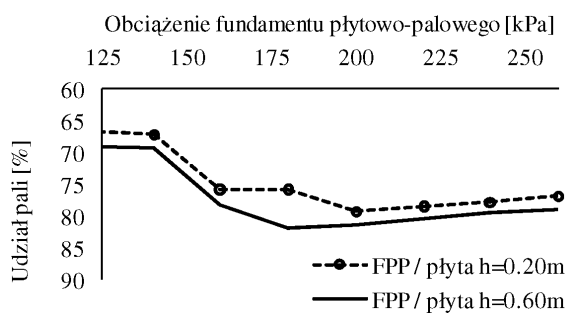


Wpływ sztywności płyty na udział pali w przekazywaniu obciążenia

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz numerycznych można stwierdzić, że sztywność płyty w analizowanym przykładzie wpływa na rozdział obciążenia pomiędzy płytą

a pale. Uzyskano wzrost udziału pali wraz ze wzrostem sztywności płyty do 6%.

Czynnikiem wpływającym na wzrost udziału pali wraz ze wzrostem sztywności płyty jest zwiększenie równomierności osiadań. Wpływa to na większą mobilizację oporów wzdłuż pobocznic i pod podstawami pali narożnych.



PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiono metodę analizy sprężystej płyty na palach, z uwzględnieniem krzywej (MK) ekstrapolującej relację obciążenie – osiadanie pala pojedynczego do nośności granicznej.

Udział płyty w przekazywaniu obciążenia w porównaniu z fundamentem palowym wpływa na redukcję średniej wartości osiadania oraz jego wyrównanie.

Sztywność płyty fundamentowej w sposób istotny wpływa na pracę pali w grupie, obciążenie poszczególnych pali oraz stopień równomierności osiadania fundamentu.

Mobilizację naprężenia wokół pala fundamentu płytowo-palowego w porównaniu z palem pojedynczym obserwujemy dla większych osiadań. Jest to wynik wzajemnego oddziaływania płyty, pali i gruntu.

Mobilizacja naprężenia wzdłuż pobocznic i pod podstawą pali analizowanych fundamentów zależy od sztywności płyty oraz usytuowania pali pod płytą.

Udział pali w przekazywaniu obciążenia na podłoże fundamentów płytowo-palowych rośnie wraz ze wzrostem sztywności płyty.

LITERATURA

1. Lee I.K.: Analysis and performance of raft and raft-pile systems. Key-note Lect., 3rd Int. Conf. Case Hist. In Geot. En., St. Louis 1993
2. Liang F.-Y., Chen L.-Z., Shi X.-G.: Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load. *Computers and Geotechnics*. 30/2003
3. Meyer Z., Chruściel S.: Ocena zmian projektowych warunków posadowienia sztywnego ustroju płytowo-palowego wspierającego konstrukcję komina. Materiały Konferencji „Awaryjne budowlane”. Międzyzdroje 2003
4. Meyer Z., Cichocki P.: Numeryczny sposób wyznaczania naprężeń na pobocznicach pali fundamentów płytowo-palowych w gruncie niespoistym. Wybrane zagadnienia konstrukcji i materiałów budowlanych oraz geotechnika. Bydgoszcz, 2015
5. Meyer Z., Cichocki P.: Wpływ zasięgu strefy aktywnej naprężeń na sztywny fundament płytowo-palowy. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4/2015.
6. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2010.
7. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Analiza mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala na podstawie interpretacji badań modelowych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2015.
8. Meyer Z.: Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów, Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin 2012.
9. Meyer Z.: Wykorzystanie wyników testu statycznego pala do określenia mobilizacji oporu pobocznic. XXIII Seminarium Naukowe Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin 2016.
10. Nguyen D.D.C., Jo S.-B., Kim D.-S.: Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects. *Computers and Geotechnics*, 47/2013.
11. Pietrzak J., Rakowski G., Wrześniowski K.: Macierzowa analiza konstrukcji. PWN, Warszawa-Poznań 1979.
12. Poulos H.G.: Methods of analysis of piled raft foundations. A report prepared on behalf of technical committee TC18 on piled foundations, 2001.
13. Randolph M. F., Clancy P.: An approximate analysis procedure for piled raft foundations. *Int. Journal of Analytical and Numerical Methods in Geomechanics*, vol. 17, n. 12, 1993.
14. Szmecel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska, Szczecin, 2014.
15. Wiłun Z.: Zarys Geotechniki. WKiŁ., Warszawa, 2005.
16. Yamashita K., Yamada T., Hamada J.: Investigation of settlement and load sharing on piled rafts by monitoring full-scale structures. *Soils and Foundations*, vol. 51, n. 3, 2011.