Wpływ zasięgu strefy aktywnej naprężeń na sztywny fundament płytowo-palowy

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, mgr inż. Piotr Cichocki Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Zadaniem pali w fundamentach płytowo-palowych (oznaczonych jako FPP) jest przede wszystkim ograniczenie ich osiadania. Pale służą do wyrównania naprężenia na powierzchni kontaktowej płyta – grunt oraz przekazaniu obciążenia na głębsze warstwy gruntu. Zmniejszając obciążenie przekazywane bezpośrednio przez płytę fundamentową, zmniejszamy zasięg jej strefy aktywnej naprężenia tzn. warstwy gruntu, w której generowane naprężenie wywołuje jego przemieszczanie, a zatem i osiadanie fundamentu. Dlatego wiedza na temat zasięgu strefy aktywnej płyty fundamentowej i jej wpływu na osiadanie jest istotna podczas obliczania FPP.

Fundamenty płytowo-palowe charakteryzują się wzajemnym oddziaływaniem płyty fundamentowej, pali i gruntu, generując złożony stan naprężenia w ośrodku gruntowym. Zagadnienie współpracy poszczególnych elementów FPP od lat jest przedmiotem badań naukowych. Wpływają one na rozwój licznych metod analitycznych i numerycznych, pośród których można wymienić:

a) Uproszczone metody obliczeń

Metoda PDR [17] jest wynikiem scalenia *metody Poulosa i Davisa* [16], na podstawie której uzyskano zależność obciążenie – osiadanie fundamentu, z *metodą Randolpha* służącą do oszacowania rozdziału obciążenia pomiędzy płytę i pale. Metodę opracowano przy założeniu sztywnej płyty oraz liniowego modelu gruntu.

b) Przybliżone metody numeryczne

Brown i Wiesner [1] wykonali obliczenia pasma fundamentu na palach poddanego obciążeniu równomiernie rozłożonemu. Stan naprężenia w gruncie, a zatem i wzajemny wpływ płyty i pali oparli na rozwiązaniu Mindlina.

Clancy i Randolph [5] przedstawili podejście łączące metodę elementów skończonych z metodą fundamentu na podporach sprężystych. Wykorzystując rozwiązania półprzestrzeni sprężystej, uwzględnili wzajemne oddziaływanie płyty i pali.

c) Szczegółowe metody numeryczne

Butterfield i Banerjee [2, 3] wykorzystali metodę elementów brzegowych z zastosowaniem rozwiązania Mindlina do opisu rozkładu naprężenia pod fundamentem. Obliczenia przeprowadzili do sztywnej płyty fundamentowej i odkształcalnych pali w jednorodnym ośrodku gruntowym. *Meyer i Chruściewicz* [11, 12] badania nad sztywnym fundamentem płytowo-palowym oparli na metodzie współczynników wpływu. Poszczególne współczynniki wpływu wyprowadzono w oparciu o teorię Boussinesqa i zależność określającą rozkład naprężenia od siły skupionej.

Hain i Lee [7] badali wpływ pali na redukcję osiadania odkształcalnego fundamentu płytowo-palowego. W opracowanej metodzie płyta składa się z elementów skończonych, pale natomiast opisano na podstawie elementów brzegowych. Zarówno fundament, jak i podłoże gruntowe opisują liniowe modele materiałowe.

Knabe [10] opracował program oparty na metodzie elementów skończonych (MES 2D). Wyniki obliczeń uzyskiwał dla fundamentów sprowadzanych do układu płaskiego bądź osiowo-symetrycznego, przy zastosowaniu liniowego prawa sprężystości.

Katzenbach [8, 9] prowadził badania nad FPP, wykorzystując komercyjny pakiet obliczeniowy służący do liniowej i nieliniowej analizy przestrzennej metodą elementów skończonych (MES 3D). Wyniki obliczeń uzyskał dla fundamentu sprężystego i modelu gruntu sprężystoplastycznego.

Z analizy literatury wynika, że brakuje prac na temat wpływu zasięgu strefy aktywnej naprężenia w gruncie na rozdział obciążenia i osiadanie fundamentu płytowo-palowego. Zasięg tej strefy, zgodnie z polską normą PN-81/B-03020, wyznaczano przy założeniu $0, 3 \cdot \sigma_{z\gamma}(z_0) = \sigma_{zd}(z_0)$. W pracach Meyera [13, 15] przyjmuje się, że granicę strefy aktywnej do obliczeń osiadań należy ustalić zwykle płycej.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę obliczania sztywnego FPP, z możliwością ingerowania w zasięg strefy aktywnej płyty i pali. Rozkład naprężenia w gruncie oparto na liniowej teorii Boussinesqa [6, 18]. Celem pracy jest analiza wpływu zasięgu strefy aktywnej pod płytą na rozdział obciążenia przekazywanego przez płytę i pale oraz osiadanie sztywnego ustroju płytowo-palowego.

OPIS MATEMATYCZNY ZJAWISKA

Do analizy przyjęto płaską płytę spoczywającą na palach na półprzestrzeni sprężystej. Pale są zagłębione w gruncie o znanych parametrach geotechnicznych. Do modelu matematycznego przyjęto następujące uproszczenia:

- grunt jest homogeniczny (jednorodny) o znanych parametrach,
- płyta i pale są sztywne,
- opis zaniku naprężenia w gruncie oparto na podstawie liniowej teorii Boussinesqa, uwzględniając jedynie pionową składową naprężenia,
- do obliczeń całkowitych osiadań wykorzystano zasadę superpozycji naprężenia, przy czym założono, że osiadanie powstaje w wyniku działania:
 - naprężenia pod dyskretyzowaną płytą fundamentową,
 - naprężenia pod podstawą pala,
 - naprężenia na pobocznicy pala,
- naprężenie na pobocznicy pala jest stałe na całej długości nieodkształcalnego pala, a jego wartość jest zadana przy wprowadzaniu danych do obliczeń.

Dalsze rozważania i analizy przeprowadzono, stosując na rysunkach i we wzorach następujące oznaczenia:

- z_{01} zasięg strefy aktywnej płyty fundamentowej [m],
- z_{02} zasięg strefy aktywnej pala [m],
- q_0 obciążenie powierzchniowe FPP [kPa],
- q naprężenie w poziomie posadowienia fundamentu [kPa],
- q_c naprężenie w podstawie pala [kPa],
- *Q* obciążenie gruntu płytą fundamentową (ze względu na dyskretyzację) w postaci sił skupionych [kN],
- N siła w podstawie pala [kN],
- τ naprężenie na pobocznicy pala [kPa],
- U nośność pala [kN],

- $\sigma_z(Q)$ -składowe pionowe naprężenia w gruncie od obciążenia polami elementarnymi płyty [kPa],
- $\sigma_z(N)$ składowe pionowe naprężenia w gruncie od siły w podstawie pala [kPa],
- $\sigma_z(\tau)$ składowe pionowe naprężenia w gruncie od naprężenia stycznego na pobocznicy pala [kPa],
- *E* moduł ściśliwości gruntu [MPa],
- *B* wymiar płyty fundamentowej [m],
- *hp* długość pala [m],
- *D* wymiar poprzeczny boku pala [m],
- λ obwód pala [m],

S

- osiadanie [mm, cm],
- *L* odległość pomiędzy badanym profilem a punktem przyłożenia obciążenia [m],
- x, y, z-osie prostokątnego układu współrzędnych.

W prezentowanej metodzie wzajemny wpływ elementów FPP przedstawiono w postaci osiadań cząstkowych. Uzyskano je przez odpowiednie całkowanie rozkładu naprężenia w gruncie od siły skupionej według Boussinesqa:

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot Q \cdot z^3}{2\pi \cdot R^5}, \quad L = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad R = \sqrt{L^2 + z^2}$$
 (1)

Osiadanie pola dyskretyzowanej płyty fundamentowej wywołane obciążeniem pól sąsiednich wyznaczono z wzoru:

$$s = \int_{0}^{z_{01}} \frac{\sigma_z}{E} dz \to s = \frac{Q}{2\pi \cdot E} \left[\frac{2}{L} - \frac{3 \cdot z_{01}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{01}^2 + L^2}^3} \right]$$
(2)

Osiadanie pola płyty od obciążenia polem własnym, za [12] przyjęto w przybliżeniu:

$$s \approx \text{const.} \cdot \frac{Q}{E} \cdot B, \quad \text{const.} = 1,25$$
 (3)

STREFA AKTYWNA PALA

STREFA AKTYWNA PALA Z02

Zo2 = hp (DLA Zo2 > hp)



Rys. 1. Schemat rozkładu naprężenia w gruncie pod płytą fundamentową



Rys. 2. Schemat fundamentu płytowo-palowego

Osiadanie płyty fundamentowej zależy także od naprężenia generowanego w gruncie przez podstawę pala. Sytuacja taka ma miejsce, gdy zasięg strefy aktywnej pala jest większy od jego długości $z_{02} > hp$:

$$s = \frac{N}{2\pi \cdot E} \left[\frac{3 \cdot hp^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{hp^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot z_{02}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{02}^2 + L^2}^3} \right]$$
(4)

Na stan naprężenia pod płytą fundamentową wpływa także pobocznica pala, dla której wyznaczono rozkład naprężenia na podstawie wzoru (1):

$$Q = \int_{0}^{np} \chi \cdot \tau d\xi, \quad z \to z - \xi \tag{5}$$

$$\sigma_{z} = \int_{0}^{hp} \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi} \cdot \frac{(z-\xi)^{3}}{\sqrt{(z-\xi)^{2} + L^{2}}} d\xi$$
(6)

po wykonaniu działań otrzymano:

Г

$$\sigma_{z} = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{(z - hp)^{2} + L^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{z^{2} + L^{2}}} - \frac{1}{\sqrt{z^{2} + L^{2}}} - \frac{L^{2}}{3 \cdot \sqrt{(z - hp)^{2} + L^{2}}} + \frac{L^{2}}{3 \cdot \sqrt{z^{2} + L^{2}}} \right]$$
(7)

Osiadanie elementarnego pola płyty wywołane obciążeniem przekazywanym przez pobocznicę pala obliczono, całkując powyższy rozkład naprężenia (7) w granicach stanowiących strefę aktywną pobocznicy pala, w wyniku czego uzyskano:

$$s = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi \cdot E} \cdot \left[\ln \left| \frac{z_{02} + \sqrt{z_{02}^2 + L^2}}{z_{02} + hp + \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + L^2}} \right| + \frac{z_{02} + hp}{3 \cdot \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + L^2}} - \frac{z_{02}}{3 \cdot \sqrt{z_{02}^2 + L^2}} + \frac{1}{3 \cdot \sqrt{(z_{02}^2 + hp)^2 + L^2}} - \frac{hp}{3 \cdot \sqrt{hp^2 + L^2}} \right]$$
(8)

Obliczając natomiast osiadanie pala uwzględniono stan naprężenia w gruncie poniżej jego podstawy. Płyta fundamentowa wpływa bezpośrednio na osiadanie pala w przypadku, gdy granica jej strefy aktywnej jest zlokalizowana poniżej podstawy pala. W innej sytuacji obciążenie przekazywane przez płytę nie wpływa na osiadanie pala. Osiadanie pala wywołane obciążeniem pól dyskretyzowanej płyty fundamentowej wyraża zależność:

dla
$$hp \ge z_{01} \to z \in \langle 0, z_{01} \rangle$$
 $s = 0$ (9)

dla
$$hp < z_{01} \rightarrow z \in \langle hp, z_{01} \rangle$$

$$s = \frac{Q}{2\pi \cdot E} \left[\frac{3 \cdot hp^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{hp^2 + L^2}^3} - \frac{3 \cdot z_{01}^2 + 2 \cdot L^2}{\sqrt{z_{01}^2 + L^2}^3} \right] \quad (10)$$

Osiadanie pala wywołane naprężeniem generowanym w gruncie przez pobocznicę własną pala określa wzór:

$$s = \frac{3 \cdot \chi \cdot \tau}{2\pi \cdot E} \cdot \left[\ln \left| \frac{z_{02} + \sqrt{z_{02}^2 + r_0^2}}{z_{02} + hp + \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + r_0^2}} \right| + \frac{z_{02} + hp}{3 \cdot \sqrt{(z_{02} + hp)^2 + r_0^2}} - \frac{z_{02}}{3 \cdot \sqrt{z_{02}^2 + r_0^2}} + \frac{1}{3 \cdot \sqrt{hp^2 + r_0^2}} + \ln \left| \frac{\sqrt{hp^2 + r_0^2} + hp}{r_0} \right| - \frac{hp}{3 \cdot \sqrt{hp^2 + r_0^2}} \right]$$
(11)

dla $r_0 = D/\sqrt{\pi}$

Możliwość wykorzystania wzoru na osiadanie płyty statycznej (12) [15], uwzględniającej zasięg strefy aktywnej, do analizy fundamentów palowych potwierdzono w pracy [14]. Przy znanej sile generowanej w podstawie pala jego osiadanie wyznaczono z wzoru (13):

$$s = \frac{\sigma}{E} \cdot \frac{D \cdot z_0}{D + z_0} \tag{12}$$

$$s = \frac{N}{E \cdot D} \cdot \frac{z_{02}}{(D + z_{02})}$$
(13)

ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Proponowana metoda polega na znalezieniu takiego rozkładu naprężenia w gruncie, aby przemieszczenia poszczególnych elementów tworzących FPP były jednakowe. W tym celu płytę fundamentową podzielono na pola elementarne. Osiadanie każdego z pól i pali stanowi sumę przemieszczeń wywołanych przez naprężenie od poszczególnych elementów ustroju.

Model matematyczny sprowadza się do układu równań:

$$\begin{cases} \{s_R\} \\ \{s_P\} \\ \{q_0 \cdot A_R\} \end{cases} = \begin{bmatrix} [WRR] & [WNR] & [WTR] \\ [WRP] & [WNP] & [WTP] \\ [WR] & [WN] & [WT] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{R_R\} \\ \{N_P\} \\ \{T_P\} \end{cases}$$
(14)

gdzie:

- $\{s_{p}\}$ wektor osiadania pól elementarnych płyty fundamentowej,
- $\{s_p\}$ wektor osiadania pali,
- $\{\dot{q}_0 \cdot A_{\rm R}\}$ –iloczyn obciążenia równomiernie rozłożonego na fundamencie i powierzchni płyty,
- $\{R_{R}\}$ wektor naprężenia w powierzchni kontaktowej płyta fundamentowa grunt,

- $\{N_p\}$ wektor sił w podstawie pali,
- $\{T_p\}$ wektor naprężenia na pobocznicy pali,
- [WRR] macierz współczynników wpływu naprężenia pod płytą na osiadanie pól płyty,
- [WNR] macierz współczynników wpływu sił w podstawie pali na osiadanie pól płyty,
- [WTR] macierz współczynników wpływu naprężenia na pobocznicy pali na osiadanie pól płyty,
- [WRP] macierz współczynników wpływu naprężenia pod płytą na osiadanie pali,
- [WNP] macierz współczynników wpływu sił w podstawie pali na osiadanie pali,
- [WTP] macierz współczynników wpływu naprężenia na pobocznicy pali na osiadanie pali,
- [WR] wektor powierzchni pól elementarnych płyty,
- [WN] wektor jedynkowy,
- [*WT*] wektor powierzchni pól pobocznic pali,
- [I] wektor jedynkowy,[0] wektor zerowy.

W modelu matematycznym zakłada się, że wartość naprężenia stycznego na pobocznicy pala jest zadana przy wprowadzaniu danych, dlatego układ równań ostatecznie przybiera postać:

$$\begin{bmatrix} [WRR] & [WNR] & -[I] \\ [WRP] & [WNP] & -[I] \\ [WR] & [WN] & [0] \end{bmatrix} \cdot \begin{cases} \{R_R\} \\ \{N_P\} \\ \{s\} \end{cases} = \begin{cases} \{0\} \\ \{0\} \\ \{q_0 \cdot A_R\} \end{cases} - \begin{bmatrix} [WTR] \\ [WTP] \\ [WT] \end{bmatrix} \cdot \{T_P\} \quad (15)$$

Opracowano program umożliwiający rozwiązanie powyższego zagadnienia, wyznaczając wartości: naprężenia kontaktowego dyskretyzowanej powierzchni płyty, sił w podstawie pali oraz osiadanie całego fundamentu $s_R = s_P = s$.

Przygotowany model obliczeniowy daje możliwość narzucenia wartości naprężenia krawędziowego. Zmiana tych wartości nie wpływa istotnie na uzyskiwane wyniki [4], dlatego do badań przyjęto, że są równe 0.

PRZEGLĄD SYSTEMATYCZNY ROZWIĄZANIA

Analizie poddano wpływ głębokości zasięgu strefy aktywnej na rozdział obciążenia przekazywanego przez płytę i pal oraz osiadanie FPP. Granica strefy aktywnej z_0 wyznacza miąższość gruntu, która pod wpływem obciążenia ulega odkształceniu, powodując przemieszczenie pionowe fundamentu. Zależy ona od parametrów gruntu oraz wartości przyłożonego obciążenia. Ze względu na kilkakrotnie wyższe naprężenie generowane w podstawie pala, w porównaniu do naprężenia pod płytą, przyjęto uproszczenie, zakładając, że dolna granica całkowania dla pala sięga do nieskończoności $z_{02} \rightarrow \infty$.

Autorzy przeprowadzili badania własne płyty fundamentowej z pojedynczym palem zlokalizowanym centralnie na planie płyty. Charakterystyka badanego posadowienia (rys. 3): płyta fundamentowa o wymiarach 2,0 × 2,0 m, pal o długości hp = 10 m i wymiarach boków D = 0,35 m, obciążenie fundamentu $q_0 = 400$ kPa, moduł ściśliwości gruntu E = 40 MPa.

Wpływ zasięgu strefy aktywnej na rozkład naprężenia na powierzchni kontaktowej

Rozkład uwzględniający zasięg strefy aktywnej i naprężenia na pobocznicy pala przedstawiono na rys. 4 i 5. Uzyskany

Tabl. 1. Zestawienie wyników rozdziału obciążenia oraz osiadania FPP przy zadanym zasięgu strefy aktywnej płyty (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)

z ₀₁ [m]	q ₀ [kPa]	q [kPa]	<i>N</i> [kN]	τ [kPa]	U [kN]	α [%]	s [mm]
	400	374,3	102,6	0	102,6	6,4	7,33
1,0		310,3	78,8	20	358,8	22,4	7,06
		246,2	55,1	40	615,1	38,4	6,80
	400	363,5	145,8	0	145,8	9,1	10,42
2,0		301,4	114,5	20	394,5	24,7	9,61
		239,2	83,1	40	643,1	40,2	8,80
		354,4	182,3	0	182,3	11,4	13,02
4,0	400	293,8	144,6	20	424,6	26,5	11,76
		233,3	106,9	40	666,9	41,7	10,50
6,0	400	350,7	197,4	0	197,4	12,3	14,10
		290,7	157,1	20	437,1	27,3	12,65
		230,8	116,8	40	676,8	42,3	11,21
		348,7	205,4	0	205,4	12,8	14,67
8,0	400	289,1	163,7	20	443,7	27,7	13,13
		229,5	122,1	40	682,1	42,6	11,58
10,0	400	347,4	210,3	0	210,3	13,1	15,02
		288,1	167,8	20	447,8	28,0	13,42
		228,7	125,3	40	685,3	42,8	11,81
	400	347,5	210,1	0	210,1	13,1	16,65
x		288,1	167,6	20	447,6	28,0	14,77
		228,7	125,2	40	685,2	42,8	12,89



Rys. 3. Schemat i wymiary badanego fundamentu płytowo-palowego



Rys. 4. Rozkład naprężenia kontaktowego pod fundamentem płytowo-palowym dla $\tau = 0$ kPa (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)



Rys. 5. Rozkład naprężenia kontaktowego pod fundamentem płytowo-palowym dla $\tau = 40$ kPa (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)

rozkład nie jest równomierny, a w wyniku zadania naprężenia krawędziowego równego zero, zgodny z rozkładem rzeczywistym [8]. W prezentowanej metodzie zakłada się, że grunt jest w stanie przenieść obliczone naprężenie w poziomie posadowienia.

Wzrost zasięgu strefy aktywnej naprężenia zmniejsza średni odpór płyty fundamentowej, a w konsekwencji zwiększa nośność pala. Zależność ta występuje także wraz z wzrostem naprężenia na pobocznicy pala, który w znaczącym stopniu odciąża płytę fundamentową.

Wpływ zasięgu strefy aktywnej płyty na rozdział obciążenia przekazywanego przez płytę i pal

Powyższy rozdział obciążenia opisano współczynnikiem α , który przedstawia procentowy stopień wykorzystania pali w przenoszeniu obciążenia przyłożonego na fundament, tzn.:

$$\alpha = \frac{U}{q_0 \cdot A_R} \cdot 100 \left[\%\right] \tag{16}$$

Analizując wyniki (tabl. 1), stwierdzono, że wzrost nośności pala, a zatem współczynnika α , zależy przede wszystkim od wzrostu naprężenia na pobocznicy pala (rys. 6 i 7). Wpływ zasięgu strefy aktywnej płyty na nośność pala przy stałej i zadanej wartości naprężenia na pobocznicy jest nieznaczny (do 7%). W przeciwieństwie do wzrostu naprężenia τ , w zakresie od 0 do 50 kPa, zmieniający rozdział obciążenia badanego fundamentu o 40% (rys. 8 i 9).



Rys. 6. Wpływ zasięgu strefy aktywnej na rozdział obciążenia przenoszonego przez płytę i pal (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)



Rys. 7. Wpływ naprężenia na pobocznicy pala na rozdział obciążenia przenoszonego przez płytę i pal (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)

Strefa aktywna z01=1 [m]



Rys. 8. Rozdział obciążenia na elementy FPP dla strefy aktywnej płyty $z_{01} = 1,0$ m (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)



Rys. 9. Rozdział obciążenia na elementy FPP dla strefy aktywnej płyty $z_{01} \rightarrow \infty$ (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)

INŻYNIERIA MORSKA I GEOTECHNIKA, nr 4/2015



Rys. 10. Wpływ zasięgu strefy aktywnej na osiadanie FPP (obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)



(obciążenie $q_0 = 400$ kPa, E = 40 MPa)

Wpływ zasięgu strefy aktywnej płyty na osiadanie fundamentu płytowo-palowego

Wyznaczenie osiadania fundamentu opiera się na całkowaniu zaniku naprężenia w gruncie, w granicach stanowiących realną, odkształcalną miąższość gruntu. Zasięg strefy aktywnej jest głównym czynnikiem wpływającym na osiadanie fundamentu. Osiadanie rośnie wraz z głębokością granicy strefy aktywnej. Wzrost naprężenia na pobocznicy pala redukuje naprężenie bezpośrednio pod fundamentem, co wpływa korzystnie na osiadanie (rys. 10). Na podstawie analizowanego przypadku fundamentu posadowionego na gruncie jednorodnym zaobserwowano, że przy płytkim usytuowaniu granicy strefy aktywnej płyty wzrost naprężenia na pobocznicy nie wpływa istotnie na osiadanie FPP. Powyższe zjawisko zmienia się wraz z wzrostem miąższości odkształcalnego gruntu (rys. 11). Zatem przy płytko usytuowanej granicy strefy aktywnej płyty to jej osiadanie determinuje przemieszczenie pionowe całego fundamentu płytowo-palowego.

Wpływ modułu ściśliwości gruntu na rozdział obciążenia i osiadanie FPP

Uzyskane wyniki obliczeń badanego przypadku FPP pozwalają stwierdzić, że wpływ ustalenia granicy strefy aktywnej na osiadanie jest istotny przy nieznacznej miąższości odkształcalnego gruntu ($z_{01} \le 4$ m). Z dokładnością dostateczną do celów praktycznych przy większej strefie aktywnej można przyjąć $z_{01} \rightarrow \infty$.

Tabl. 2. Zestawienie wyników procentowego udziału pala w przenoszeniu obciążenia przy zadanym obciążeniu i module ściśliwości gruntu $(\tau = 40 \text{ kPa})$

Obciążenie FPP	Moduł ściśliwości gruntu E [MPa]					
q_0 [kPa]	20,0	30,0	40,0	50,0		
300	52,7	52,7	52,7	52,7		
400	42,8	42,8	42,8	42,8		
500	36,9	36,9	36,9	36,9		
600	32,9	32,9	32,9	32,9		

Tabl. 3. Zestawienie wyników procentowego udziału pobocznicy pala w jego nośności przy zadanym obciążeniu i module ściśliwości gruntu $(\tau = 40 \text{ kPa})$

a [lcDa]	Moduł ściśliwości gruntu E [MPa]				
<i>q</i> ₀ [KF a]	20,0	30,0	40,0	50,0	
300	88,5	88,5	88,5	88,5	
400	81,7	81,7	81,7	81,7	
500	75,9	75,9	75,9	75,9	
600	70,9	70,9	70,9	70,9	

Tabl. 4. Zestawienie wyników osiadania fundamentu płytowo-palowego [cm] przy zadanym obciążeniu i module ściśliwości gruntu ($\tau = 40$ kPa)

a [l/Da]	Moduł ściśliwości gruntu E [MPa]				
	20,0	30,0	40,0	50,0	
300	1,75	1,16	0,87	0,70	
400	2,58	1,72	1,29	1,03	
500	3,41	2,27	1,71	1,36	
600	4,24	2,83	2,12	1,70	

Podczas badania wpływu modułu ściśliwości gruntu założono, że zasięg strefy aktywnej płyty fundamentowej i pala sięga do nieskończoności ($z_{01}, z_{02} \rightarrow \infty$). Obliczenia wykonano przy stałej i zadanej wartości naprężenia na pobocznicy pala $\tau = 40$ kPa.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabl. 2, 3 i 4) można stwierdzić, że rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pal nie zależy od parametrów gruntu, a jedynie od przyłożonego obciążenia zewnętrznego (rys.12 i 13). Moduł ściśliwości gruntu wpływa natomiast na osiadanie sztywnego fundamentu płytowo-palowego (rys. 14).

PODSUMOWANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

- 1. Zasięg strefy aktywnej naprężenia pod płytą fundamentową w nieznacznym stopniu wpływa na rozdział obciążenia pomiędzy płytę a pal.
- Naprężenie na pobocznicy pala determinuje jego nośność, a zatem i rozdział obciążenia pomiędzy elementy nośne FPP.



Rys. 12. Wpływ obciążenia i modułu ściśliwości gruntu na udział pala w przenoszeniu obciążenia (τ = 40 kPa)



Rys. 13. Wpływ obciążenia i modułu ściśliwości gruntu na udział pobocznicy w nośności pala (τ = 40 kPa)



Rys. 14. Wpływ obciążenia i modułu ściśliwości gruntu na osiadanie FPP $(\tau = 40 \text{ kPa})$

- 3. Płytko usytuowana granica strefy aktywnej płyty wpływa istotnie na osiadanie FPP.
- Naprężenie na pobocznicy pala wpływa na osiadanie fundamentu przy granicy strefy aktywnej naprężenia usytuowanej poniżej 2 m.
- 5. Moduł ściśliwości homogenicznego gruntu nie wpływa na rozdział obciążenia pomiędzy płytę i pal.

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wpływu zasięgu strefy aktywnej płyty fundamentowej na stan naprężenia w gruncie oraz osiadanie sztywnego fundamentu płytowo-palowego pozwala sformułować następujące wnioski:

- Wzrost zasięgu strefy aktywnej płyty fundamentowej zmniejsza średni odpór płyty, wpływając na zwiększenie obciążenia przenoszonego przez pal. Wpływ strefy aktywnej na rozdział obciążenia w przeprowadzonej analizie wynosił do kilku procent.
- Wpływ odporu pala (naprężenia na pobocznicy) na rozdział obciążenia przenoszonego przez płytę oraz pal jest istotny i znacznie większy niż wpływ zasięgu strefy aktywnej płyty. Naprężenie na pobocznicy pala wpływa natomiast w mniejszym stopniu na osiadanie FPP.
- Usytuowanie granicy zasięgu strefy aktywnej naprężenia pod płytą w sposób istotny wpływa na osiadanie FPP przy z₀₁ ≤ 4 m. W praktycznych obliczeniach inżynierskich można założyć, że poniżej tej granicy z₀₁ → ∞.
- Rozdział obciążenia przenoszonego przez poszczególne elementy nośne fundamentu płytowo-palowego posadowionego na gruncie jednorodnym nie zależy od modułu ściśliwości gruntu.

W PROGRAMIE DALSZYCH BADAŃ I ANALIZ PRZEWIDZIANO

- 1. Uwzględnienie rzeczywistych zasięgów stref aktywnych naprężenia, niezależnie dla płyty fundamentowej i pali, które zależą zarówno od wymiarów fundamentu, jak i parametrów gruntu.
- Uwzględnienie w matematycznym opisie zjawiska mobilizacji naprężenia na pobocznicy pala.

LITERATURA

1. Brown P. T., Wisner T. J.: The behaviour of uniformly loaded piled strip footings. Soils and Foundations, 15, 1975.

2. Butterfield R., Banerjee P. K.: The elastic analysis of compressible piles and pile groups. Geotechnique, 21, 1971.

3. Butterfield R., Banerjee P. K.: The problem of pile group-pile cap interaction. Geotechnique, 21, 1971.

 Chruściewicz S.: Wpływ stanu naprężeń w ośrodku gruntowym na nośność sztywnego ustroju płytowo-palowego. Rozprawa doktorska, Szczecin, 2003.

5. Clancy P., Randolph M.F.: An approximate analysis procedure for piled raft foundations. Int. Jnl. Num. Methods in Geomechs., 17, 1993.

6. Glazer Z.: Mechanika Gruntów, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1985.

7. Hain S.J., Lee I.K.: The analysis of flexible pile-raft systems. Geotechnique, 28(1), 1978.

8. Katzenbach R., Gutberlet Ch., Bachmann G.: Soil-Structure Interaction aspects for ultimate limit state design of complex foundations. ISGSR2007 First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, 2007.

9. Katzenbach R., Schmitt A., Turek J.: Assessing Settlement of High-Rise Structures by 3D Simulations. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005. Knabe W.: Wzajemne oddziaływanie ośrodka gruntowego i płyty fundamentowej na palach – Część III. Rozprawy Hydrotechniczne, zeszyt 38/1977.

11. Meyer Z., Chruściewicz S. : Wpływ niejednorodności ośrodka gruntowego pod płytą na nośność i osiadanie sztywnej konstrukcji płytowo-palowej. Inżynieria i Budownictwo, 5/2003.

12. Meyer Z., Chruściewicz S.: Osiadanie dużych fundamentów sztywnych. Inżynieria Morska i Geotechnika, 5/2001.

13. Meyer Z., Kowalów M.: Prognoza osiadania budynku w związku ze zmianą sposobu posadowienia. XXVI Konferencja Techniczno-Naukowa Awarie Budowlane 2013.

14. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/2014.

15. Meyer Z.: Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów. Wyd. ZA-POL, Szczecin 2012.

16. Poulos H. G., Davis E. D.: Pile foundations analysis and design. John Wiley and Sons. New York, 1980.

17. Poulos H. G.: Methods of analysis of piled raft foundations. A report prepared on behalf of technical committee TC18 on piled foundations, 2001.

18. Wiłun Z.: Zarys Geotechniki. WKiŁ, Warszawa 2005.