

Krzysztof TROJNAR  
Politechnika Rzeszowska

## MODELOWANIE PRZESTRZENNEJ INTERAKCJI PAŁA Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM

W pracy przedstawiono problematykę stateczności pali obciążonych poziomo, z uwzględnieniem ich współpracy z ośrodkiem gruntowym w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia. Uzyskane wyniki oparto na pracach analitycznych różnych autorów, obejmujących ocenę współpracy z podłożem pojedynczego pała, na własnych badaniach polowych oraz na analizach numerycznych w układzie przestrzennym współpracy pała z podłożem.

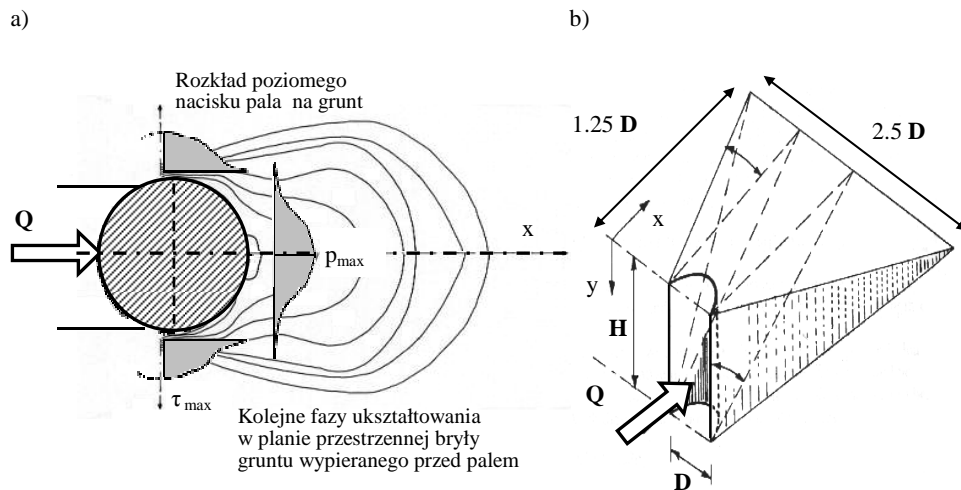
### 1. Wprowadzenie

Racjonalne projektowanie konstrukcji oporowych, posadowionych na pałach wymaga dokładniejszego rozpoznania ich stateczności, z określeniem rzeczywistych wartości przemieszczeń, gdyż to one zwykle decydują o warunkach użytkowania budowli. Ustalanie przebiegu zmian przemieszczeń pała obciążonego poziomo jest dość skomplikowane ze względu na konieczność uwzględnienia jego współdziałania z gruntem. Ograniczony zakres rozpoznania stateczności pali w układzie przestrzennym powoduje, że najczęściej stosuje się uproszczone metody obliczeń, oparte na założeniach układu płaskiego z zastosowaniem współczynników poprawkowych. Takie podejście umożliwia jedynie w ograniczonym zakresie uwzględnienie przestrzennego stanu naprężenia w gruncie w sąsiedztwie pała obciążonego poziomo.

### 2. Metody uwzględniania przestrzennego oddziaływania pała na grunt

Zagadnienie przestrzennego oddziaływania parcia i oporu gruntu na fundament można z powodzeniem rozwiązywać, korzystając z nowszych programów komputerowych opartych na Metodzie Elementów Skończonych (MES), które nadają się do analizowania zachowania się konstrukcji zagłębionej w gruncie – np. *Plaxis*, *Ansys*, *ZSoil*, *CRISP*. Wykorzystanie potencjalnych możliwości nowoczesnych programów jest jednak utrudnione ze względu na ich

ograniczoną dostępność i stosunkowo wysoki koszt. Stosowanie obliczeń uproszczonych, realizowanych w układzie płaskim, z zapewnieniem uzyskiwania właściwych wartości przemieszczeń – takich samych jak konstrukcji współpracującej z gruntem w układzie przestrzennym, jest nadal bardzo przydatne w praktyce projektowej. Istnieje zatem aktualna potrzeba adaptowania wyników uzyskanych ze skomplikowanych analiz w układzie przestrzennym (3D) oraz wyników badań doświadczalnych w skali naturalnej i modelowej do rozwiązań w układzie płaskim (2D). Podstawowym warunkiem możliwości zastosowania tego sposobu postępowania jest ocena i rozpoznanie mechanizmów współpracy z podłożem konstrukcji zagłębionej w gruncie – rys. 1. Uzasadnieniem przyjętych schematów obliczeniowych są zwykle wyniki badań doświadczalnych, które uwzględniają przestrzenny stan deformacji ośrodka gruntowego. Geometrię bryły wypieranego gruntu można łatwo oszacować jedynie w poziomie powierzchni terenu. W znanych rozwiązaniach analitycznych określania parcia i oporu gruntu ich autorzy przyjmują różny kształt bryły gruntu wypieranej przed trzonem pała, co pokazano na rys. 2.

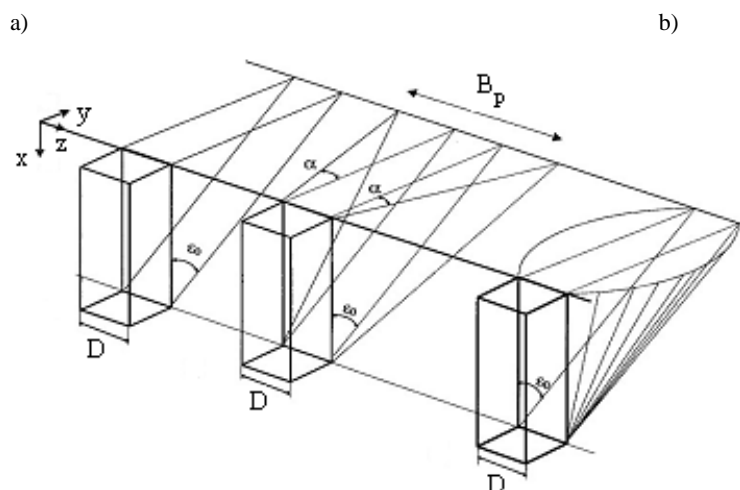


Rys. 1. Rozkład naprężeń w gruncie w sąsiedztwie pała obciążonego poziomo (a) oraz schemat ukształtowania stref bocznych pała w gruncie niespoistym (b)

Stan naprężenia w gruncie jest odnoszony zwykle w obliczeniach do układu płaskiego, z zastosowaniem odpowiednich współczynników poprawkowych. W najprostszym przypadku można opisać udział stref bocznych przy pału zagłębionym w idealnie sztywno-plastycznym ośrodku gruntowym za pomocą szerokości obliczeniowej pała  $B_p$ :

$$B_p = D' + D = D (k_p + 1) \quad (1)$$

gdzie:  $D$  – nominalna średnica pała, m  
 $D'$  – szerokość stref bocznych, wynikająca z przestrzennego działania oporu gruntu, m,  
 $k_p$  – współczynnik wpływu stref bocznych.



Rys. 2. Propozycje ukształtowania stref bocznych według różnych autorów

Różnice w rozwiązaniach podawanych przez poszczególnych autorów zajmujących się tą problematyką polegają zazwyczaj na założeniu innego kształtu bryły wypieranego gruntu i wartości kąta rozwarcia  $\alpha'$  obu krawędzi stref bocznych. Obszerny przegląd różnych propozycji uwzględniania wpływu stref bocznych zawierają m. in. prace Odrobińskiego [8] i Bolta [4]. Przykładowe zestawienie wartości współczynników wpływu  $k_p$  dla stref bocznych według propozycji różnych autorów podano w tabeli 1.

W rozwiązaniach praktycznych najczęściej określa się wartość całkowitego oporu gruntu w układzie przestrzennym dla szerokości zastępczej  $B_p'$  ustalonej za pomocą wzoru (2):

$$B_p' = D + 2x \cdot \operatorname{tg}(\alpha') \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha'$  – kąt rozwarcia strefy bocznej równy wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntu,  $^\circ$ ,  
 $x$  – głębokość, m,  
 $D$  – średnica pała, m.

Tabela 1. Zestawienie współczynników wpływu stref bocznych według propozycji różnych autorów, na podstawie [9]

Autor / metoda oznaczania $k_p$	Wzór obliczeniowy $k_{pi}$	Wartość $k_p$ dla $\Phi = 30^\circ$
Krey	$k_{p1} = \text{tg}\epsilon_0 \cdot \text{tg}^2\epsilon_a \cdot \text{tg}\Phi$	0.33
Krey	$k_{p1} = \text{tg}\epsilon_0 \cdot K_O \cdot \text{tg}\Phi$	0.36
Jaropolski	$k_{p2} = \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \xi \cdot \text{tg}\Phi$	1.20
Klin $\alpha = \Phi$	$k_{p3} = 2\text{tg}^2\epsilon_0 \cdot \text{tg}\Phi$	3.46
Klin $\alpha = 30^\circ$	$k_{p4} = 2\text{tg}^2\epsilon_0 \cdot \text{tg}30$	3.46
Odrobiński	$k_{p5} = \frac{2}{3} \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \eta$	3.46
Boucraut	$k_{p6} = \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \text{tg}\Phi$	3.00
Klin $\alpha = 0.2 \Phi$	$k_{p7} = \frac{2}{3} \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \text{tg} \frac{\Phi}{5}$	0.36
Zaborowski $\alpha = 14^\circ$	$k_{p8} = \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \text{tg}14^\circ$	1.29
Brenneke i Lohmeyer $\alpha = \epsilon_a = \pi/4 - \Phi/2$	$k_{p9} = \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \text{tg}\epsilon_a = \text{tg}^2\epsilon_0$	3.00
Richter $\alpha = 0.2 \Phi$	$k_{p10} = \text{tg}^3\epsilon_0 \cdot \text{tg}(0.2\Phi)$	0.55
Richter $\alpha = 90^\circ - \Phi$	$k_{p11} = \frac{\text{tg}^3\epsilon_0}{\text{tg}\Phi}$	9.00
Bowman	$k_{p12} = K_O \frac{\text{tg}\Phi \cdot \sin\epsilon_0}{\text{tg}\epsilon_0 \cdot \cos\alpha} + \text{tg}^2\epsilon_0 \cdot \text{tg}\alpha +$ $+ K_O \cdot \text{tg}\epsilon_0 (\text{tg}\Phi \cdot \sin\epsilon_0 - \text{tg}\alpha)$	2.04

Kryteria ustalania szerokości stref bocznych, podawane przez różnych autorów są oparte na następujących założeniach:

- równoważności ciężarów wydzielonych stref gruntu,
- zastępczej szerokości  $B_p$  wyznaczonej dla kąta rozwarcia strefy bocznej  $\alpha' = 1/5 \Phi$ ,
- szerokości klina gruntu ustalonej dla minimalnej siły oporu,
- zgodności kształtu bryły wypieranego gruntu i przestrzennego rozkładu naprężeń w gruncie.

Z badań wielu autorów wynika, że wpływ oddziaływania stref bocznych maleje ze zwiększeniem szerokości czołowej powierzchni fundamentu obciążonego poziomo. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń uznaje się, że najbliższe wartościom uzyskiwanym w badaniach wykonywanych w drobnych i średnich piaskach kwarcowych są kąty rozwarcia strefy bocznej, które podają: Odrobiński, Boucraut, Brenneke i Lohmeyer oraz Bowman [4]. Ocenia się, że

dla ścian fundamentowych o szerokości powierzchni czołowej większej od  $1/3$  ich zagłębienia w gruncie wpływ stref bocznych nie przekracza 10% wartości całkowitego oporu gruntu. Wielu badaczy określa własne współczynniki wynikające z porównania stref oporu i parcia gruntu [7]. Wprowadzono też tzw. „wymiar krytyczny” czołowej powierzchni ściany fundamentowej  $B_{kr}$ , określony jako minimalna szerokość konstrukcji, przy której zachodzi zniszczenie struktury ośrodka gruntowego w obrębie wypieranego klina [6]. W przypadku ścian o wymiarach mniejszych od  $B_{kr}$ , jej konstrukcja wcina się w grunt, rozpierając go na boki. Szerokość krytyczną czołowej powierzchni bocznej można obliczyć ze wzoru (3), w zależności od zagłębienia fundamentu w gruncie  $H$ :

$$B_{kr} = 0.3 H \quad (3)$$

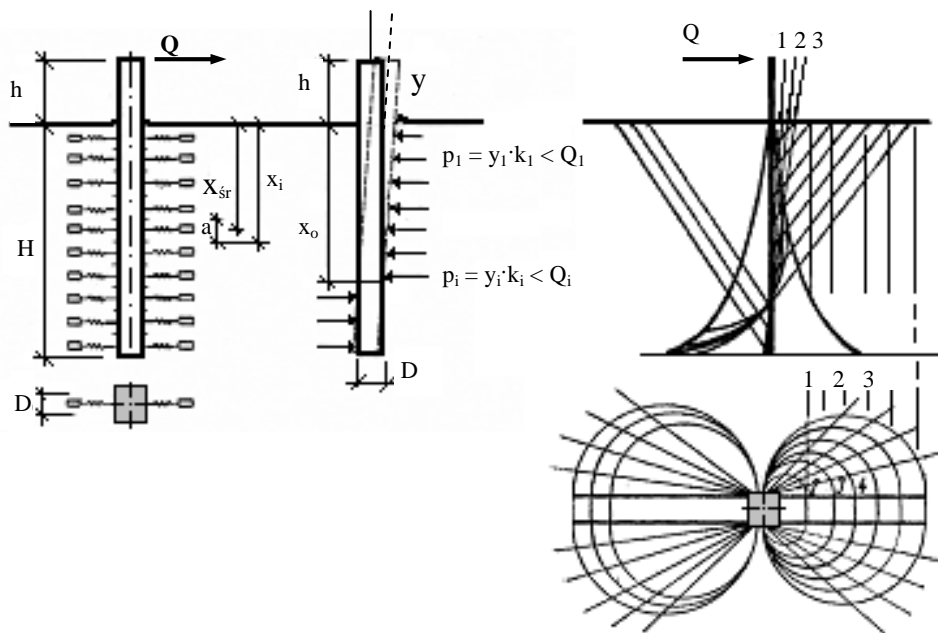
Obszerną analizę zastosowania modelu sprężysto-plastycznego do obliczania fundamentów słupowych przeprowadził Odrobiński [9]. W swojej propozycji wykorzystał rozwiązania parcia i oporu gruntu z uwzględnieniem płaskiego stanu naprężenia, określając jednocześnie wpływ stref bocznych na wartość zmobilizowanych składowych oporu gruntu przed palem obciążonym poziomo. W efekcie tych prac opracowano model podłoża Dembickiego-Odrobińskiego [5], wykorzystywany do analizy zachowania się fundamentów słupowych w gruncie spójnym lub niespójnym, obciążonych siłą poziomą i momentem zginającym. To rozwiązanie stało się podstawą do opracowania wzorów, tablic i nomogramów zawartych w normie dotyczącej wymiarowania konstrukcji wsporczych sieci elektroenergetycznych [10]. W modelu Dembickiego-Odrobińskiego obliczenia są wykonywane wieloetapowo. Schematem podstawowym jest pręt oparty na podporach sprężystych o ustalonej nośności granicznej. Wartości charakterystyk sprężystych podpór (podłoża) ustala się z parametrów gruntu określonych na podstawie badań laboratoryjnych. Kolejne etapy obliczeń różnią się liczbą przyjętych podpór sprężystych. Wartość współczynnika podłoża  $k$  dla każdej podpory sprężystej określa wzór (4).

$$k = \frac{p}{y} = \frac{\gamma D^2 \operatorname{tg}^2(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta [\frac{1}{2} + \frac{2}{3} \operatorname{tg}(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta] 2E}{\gamma D^2 \operatorname{tg}^2(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta^2 [\frac{1}{2} + \frac{2}{9} \operatorname{tg}(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta]} =$$

$$= \frac{2E [\frac{1}{2} + \frac{2}{3} \operatorname{tg}(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta]}{\operatorname{tg}(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta [\frac{1}{2} + \frac{2}{9} \operatorname{tg}(45 + \frac{\Phi}{2}) \zeta]} \quad (4)$$

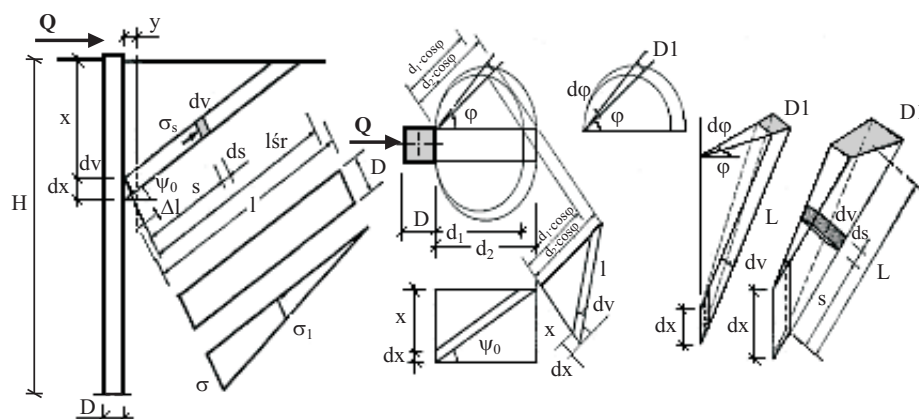
gdzie:  $p$  – nacisk pala na grunt, kPa,  
 $y$  – poziome przemieszczenie pala, m,  
 $\Phi$  – kąt tarcia wewnętrzznego gruntu, °,  
 $D$  – średnica pala, m,  
 $E$  – moduł odkształcenia gruntu, Kpa,  
 $\gamma$  – ciężar objętościowy gruntu, kN/m<sup>3</sup>,  
 $\zeta$  – zagłębienie względne rozpatrywanego przekroju trzonu pala, równe  $x/D$ .

W analizie współpracy pala z gruntem uwzględniono także: działanie obciążeń powtarzalnych, różny sposób połączenia fundamentu z konstrukcją nadziemną i dowolny układ warstw w podłożu. Ogólne założenia koncepcji ukształtowania stref bocznych w modelu obliczeniowym Dembickiego-Odrobińskiego pokazano na rys. 3. i 4.

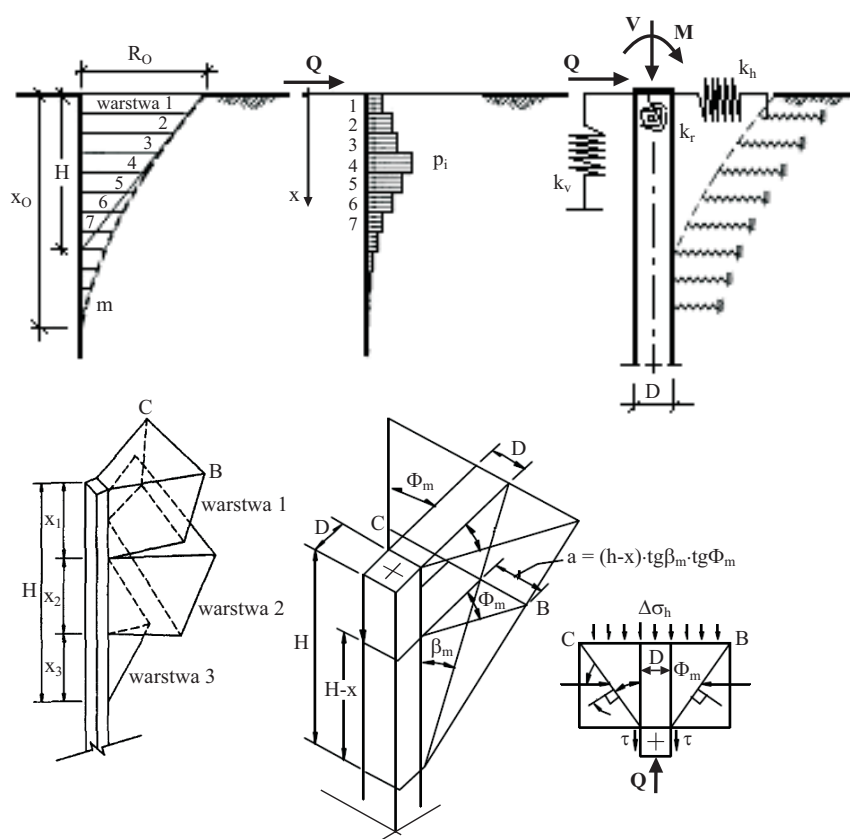


Rys. 3. Schemat obliczeniowy pala w modelu Dembickiego-Odrobińskiego, na podstawie [9]

Nową propozycję uwzględnienia warunków przestrzennej współpracy zginanego pala z ośrodkiem gruntowym stanowi rozwiązanie podane przez Ashoura i Norrisa [1-3]. Autorzy zaproponowali utworzenie modelu obliczeniowego pala SWM (*Strain Wedge Model*) – w oparciu o założenie tworzenia się przed obciążonym poziomo palem sztywnego klina gruntu. Model wiąże kształt sztywnej bryły gruntu wypieranej przez pal ze stanem naprężenia w dwuwymiarowym ośrodku gruntowym, z uwzględnieniem kąta obrotu i przemieszczenia głowicy pala. Geometrię sztywnego klina gruntu pokazano na rys. 5.



Rys. 4. Ogólne założenia dotyczące stref bocznych wg propozycji Odrobińskiego, na podstawie [9]



Rys. 5. Schemat obliczeniowy współpracy pała z ośrodkiem gruntowym w modelu Ashoura i Norrisa, na podstawie [2]

Wartości kątów rozwarcia płaszczyzn tworzących sztywny klin gruntu wypieranego przed palem w przestrzennym stanie naprężenia zależą od dwóch parametrów: zagłębienia pala w gruncie  $H$  i efektywnej wartości zmobilizowanego kąta tarcia wewnętrznego gruntu  $\Phi_m$ , określanej w zależności od stanu naprężenia w ośrodku gruntowym. Użycie iteracyjnej procedury do ustalania obu parametrów ( $\Phi_m$  i  $H$ ), przy zadanym obciążeniu poziomym pala i znanej charakterystyce naprężenie-odkształcenie gruntu umożliwia ustalenie krzywych  $p$ - $y$ , w kolejnych krokach obliczeniowych, dla przyrostów poziomej składowej naprężenia w gruncie i znanej wartości ugięcia pala.

### **3. Modelowanie numeryczne przestrzennego oddziaływania gruntu na pal obciążony poziomo**

#### **3.1. Założenia i cel analizy obliczeniowej**

W celach badawczych przeprowadzono obliczenia zachowania się w gruncie pala fundamentowego z nieodkształcalnym trzonem [12]. Analizę teoretyczną wykonano za pomocą metody elementów skończonych (MES), przy użyciu programu komputerowego Plaxis3D\*. Model numeryczny pala poddano walidacji ze względu na dopasowanie do warunków badań pala o średnicy 1.2 m zagłębionego 5 m w piasku. Wyniki obliczeń porównano z pomiarami ugięć pala zbadanego w terenie, w skali 1:1 [11]. Symulowano różne stadia obciążeń pala z uwzględnieniem płaskiego i przestrzennego stanu naprężenia w gruncie, kontrolując przemieszczenia oraz naprężenia i odkształcenia w gruncie. Zestawienie wyników ugięcia pala w poziomie terenu z badań polowych i z obliczeń pokazano na rys. 6. Przeprowadzenie analizy obliczeniowej z zastosowaniem MES w układzie płaskim oraz przestrzennym pozwoliło uzyskać wiele informacji na temat mechanizmów zachodzących w ośrodku gruntowym wokół pala, umożliwiających zweryfikowanie stosowanych dotychczas uproszczonych metod obliczania pali zginanych.

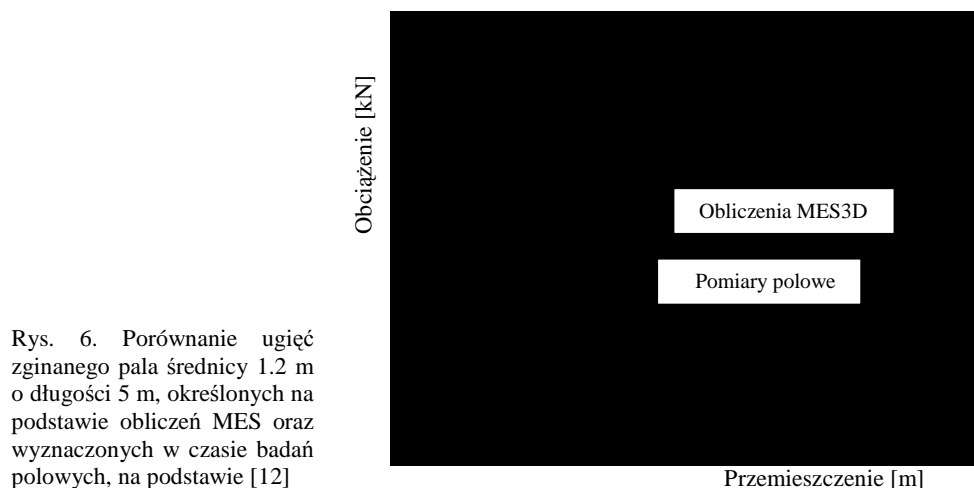
#### **3.2. Model numeryczny pala**

Przyjęty przestrzenny model numeryczny pala zagłębionego w gruncie składa się z ponad 33 tysięcy elementów i zawiera ponad 89 tysięcy węzłów. Został zbudowany przy użyciu 15-węzłowych elementów bryłowych, zawierających po 6 punktów Gaussa. Analizę prowadzono w dwóch rodzajach siatek ele-

---

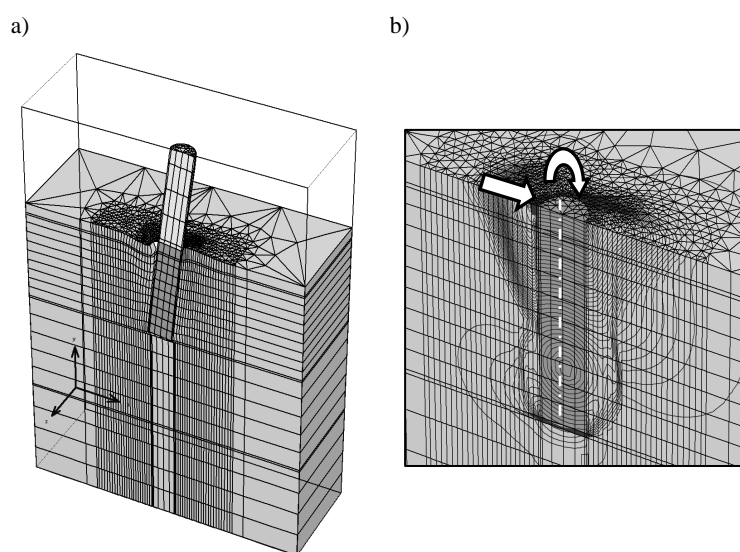
\* Wykonanie analiz numerycznych było możliwe dzięki przychylności Biura Projektowego firmy Keller Polska w Gdyni, które umożliwiło przeprowadzenie zaawansowanych obliczeń przy użyciu programu komputerowego PLaxis3D oraz Plaxis2D – za co autor składa serdeczne podziękowanie.





Rys. 6. Porównanie ugięć zginanego pała średnicy 1.2 m o długości 5 m, określonych na podstawie obliczeń MES oraz wyznaczonych w czasie badań polowych, na podstawie [12]

mentów skończonych. Obliczenia wstępne wykonano w siatce opisanej na planie koła i zagęszczonej wokół pała. Obliczenia docelowe przeprowadzono na modelu podłoża w układzie osiowo-symetrycznym. Dzięki temu można było zoptymalizować rozmiar zagadnienia obliczeniowego. Model bryły gruntu przyjęto na planie prostokąta z dłuższymi bokami umieszczonymi równoległe do płaszczyzny zginania pała. Na rysunku 7. pokazano model obliczeniowy pała. Przy dys-



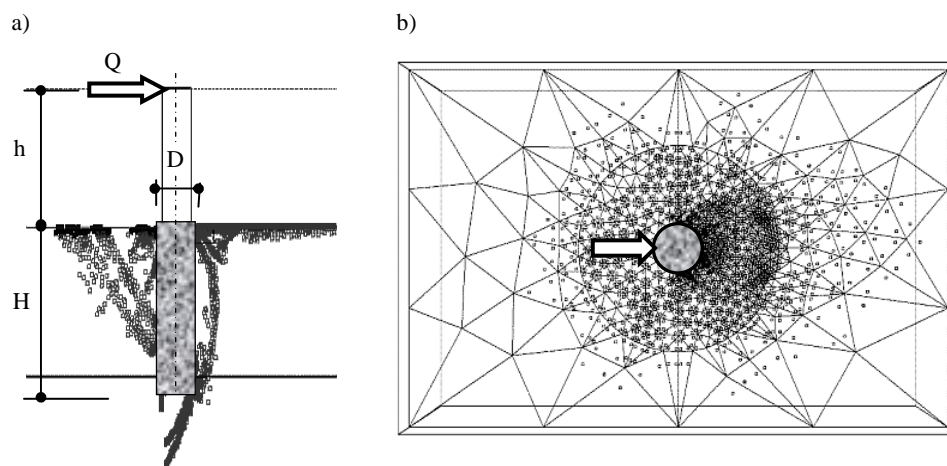
Rys. 7. Model obliczeniowy zginanego pała o średnicy 1.2 m zagłębionego 5 m w gruncie, obciążonego siłą poziomą przyłożoną na wysokości 4 m nad terenem: a) warunki brzegowe modelu, b) deformacje gruntu wokół modelu pała

kretyzacji obszaru obliczeń brano pod uwagę zasięg stref wypierania gruntu przed palem i szerokość stref bocznych gruntu współpracującego z trzonem pala. Obszar ten odniesiono do średnicy pala ( $D$ ). Przyjęto wymiary: w płaszczyźnie działania obciążenia  $12D$ , natomiast w kierunku prostopadłym –  $8D$ . Spód obliczeniowej bryły gruntu odpowiadał zagłębieniu  $15\text{ m}$  w skali modelu. Wymiary geometryczne modelu numerycznego pala przyjęto takie jak w przypadku pala zbadanego doświadczalnie. Analizę obliczeniową przeprowadzono dla pala o średnicy  $1.2\text{ m}$  zagłębionego  $5\text{ m}$  w jednorodnym pisaku. W obliczeniach zastosowano sprężysto idealnie plastyczny model gruntu z warunkiem plastyczności Coulomba-Mohra. Parametry obliczeniowe piasku przyjęto na podstawie badań geotechnicznych wykonanych w terenie, w miejscu przeprowadzenia próbnego obciążenia takiego samego pala jak w analizie obliczeniowej: kąt tarcia wewnętrznego  $\varphi = 35^\circ$ , moduł odkształcenia  $E = 120\text{ MPa}$ , spójność  $c = 0\text{ MPa}$ , współczynnik Poissona  $\nu = 0.3$ .

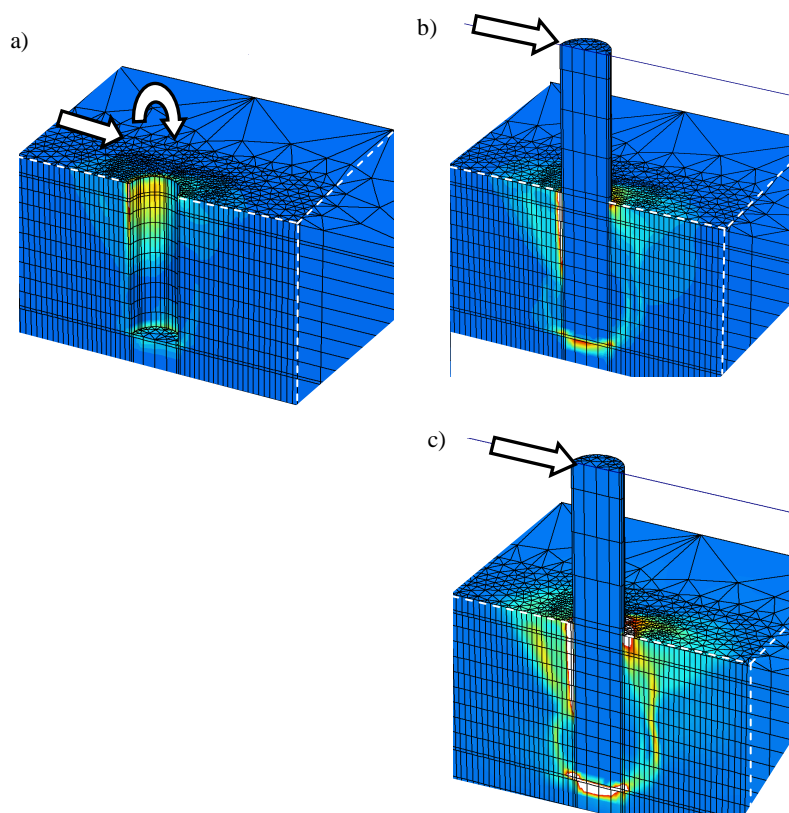
### 3.3. Charakterystyka obliczeń MES

Przeprowadzono kilka serii obliczeń pojedynczego pala o średnicy  $1.2\text{ m}$ , zagłębionego  $5\text{ m}$  w gruncie. Wykonano odrębne analizy obliczeniowe dla pala obciążonego siłą poziomą i momentem zginającym w układzie płaskim (2D) oraz w układzie przestrzennym (3D). Obciążenie poziome pala stanowiła siła skupiona o wartości zwiększanej przyrostowo, w zakresie  $0\div 500\text{ kN}$ . Obciążenie było przyłożone do pala na wysokości  $4\text{ m}$  nad gruntem lub w poziomie gruntu, podobnie jak w czasie badań polowych. W obliczeniach wykonanych w układzie płaskim (2D) nie uzyskano zadowalającej zgodności wyników przemieszczeń pali z danymi pochodzącymi z badań polowych. Było to spowodowane nieuwzględnieniem wpływu stref bocznych oddziaływania parcia, oporu i tarcia gruntu na pobocznicę pala. Zasięg i rozmieszczenie obszarów uplastycznienia gruntu w sąsiedztwie pala uzyskane z obliczeń MES wykonanych w układzie płaskim pokazano na rys. 8. Wyniki tych obliczeń okazały się jednak zasadniczo zgodne z ogólnymi założeniami stosowanymi powszechnie przy projektowaniu pali ze sztywnym trzonem, dotyczącymi jego zachowania się w gruncie. Obliczenia MES w układzie przestrzennym (3D) pozwoliły rozpoznać w znacznie szerszym zakresie współpracę pala z podłożem gruntowym. W zakresie porównywanych wartości obciążeń stosowanych w badaniach polowych i analizie MES obliczone przemieszczenia głowicy pala były w znacznym stopniu zgodne z pomierzonymi.

Odkształcenia gruntu w sąsiedztwie pala obciążonego siłą poziomą i momentem zginającym pokazano na rys. 9. W kolejnych fazach obciążenia pala wywołującego ugięcie głowicy:  $10\text{ mm}$ ,  $20\text{ mm}$  i  $40\text{ mm}$ , jego trzon współpracuje z większą bryłą gruntu. Na rysunku 10. pokazano rozkład składowych poziomych naprężeń w gruncie wokół pala, ustalony w poziomie terenu. Wyniki

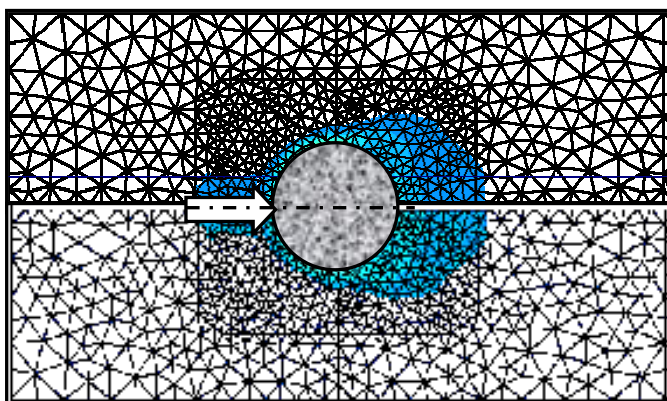


Rys. 8. Obszary uplastycznienia gruntu w sąsiedztwie pała uzyskane na podstawie obliczeń MES w układzie płaskim (2D): a) widok w płaszczyźnie zginania, b) widok z góry w poziomie terenu

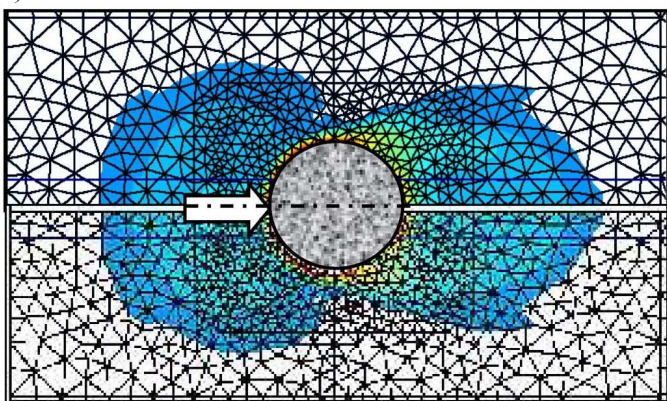


Rys. 9. Porównanie odkształceń gruntu w sąsiedztwie zginanego pała  $\varnothing 1.2$  m, długości 5 m, przy ugięciu jego głowy wynoszącym: a) 10 mm, b) 20 mm, c) 40 mm

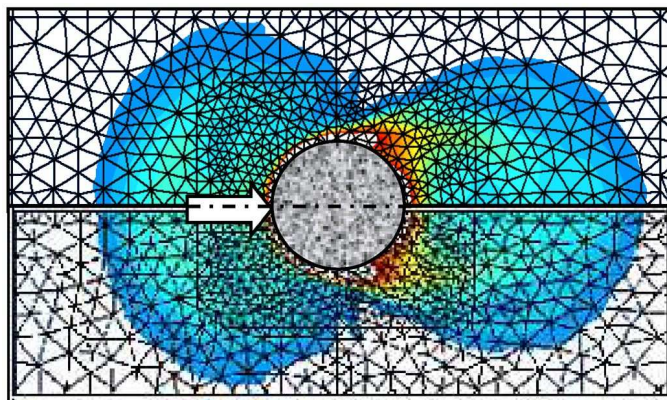
a)



b)



c)



Rys. 10. Porównanie składowych poziomych naprężenia w gruncie w poziomie terenu w sąsiedztwie zginanego pala  $\varnothing$  1.2 m, długości 5 m, przy ugięciu jego głowicy wynoszącym: a) 10 mm, b) 20 mm, c) 40 mm

obliczeń pokazują kształt bocznych stref gruntu współpracującego z palem przy przenoszeniu obciążenia poziomego w podłoże gruntowe. Wyniki obliczeń MES 3D potwierdzają poprawność założeń przyjmowanych przy modelowaniu pracy pala w gruncie za pomocą innych uproszczonych metod. W podłożu przed palem, w płaszczyźnie jego zginania jest widoczna bryła gruntu zwięzająca się do dołu, w której składowe naprężenia są znacznie większe niż poza nią. Na podstawie obliczeń wykonanych za pomocą MES 3D ustalono, że największy zasięg strefy gruntu wypieranego ku górze występuje w poziomie terenu, niezależnie od wartości poziomego przemieszczenia pala.

#### 4. Podsumowanie

Analiza obliczeniowa pala wykonana z zastosowaniem metody elementów skończonych dała możliwość szerszego rozpoznania jego współpracy z podłożem gruntowym w układzie płaskim i przestrzennym. Skonfrontowanie efektów obliczeń teoretycznych z wynikami badań doświadczalnych wykazało, że:

- w obliczeniach wykonanych w układzie płaskim (MES 2D) nie uzyskano zadowalającej zgodności wyników przemieszczeń pali z danymi pochodzącymi z badań polowych. Było to spowodowane nieuwzględnieniem wpływu stref bocznych oddziaływania parcia, oporu i tarcia gruntu na poboczniczy pala,
- obliczenia pala zginanego wykonane z użyciem odpowiednio skalibrowanego modelu gruntu w układzie przestrzennym (MES 3D) były w dużym stopniu zgodne z wynikami badań polowych i umożliwiły ocenę stateczności pala na podstawie przemieszczeń gruntu.

Dzięki szerszemu rozpoznaniu współpracy zginanego pala z podłożem gruntowym można ocenić przydatność wcześniej opracowanych metod obliczeń, opartych na rozwiązaniach w układzie płaskim. Wyniki numerycznego modelowania zginanego pala w gruncie w układzie przestrzennym MES 3D potwierdziły przydatność stosowania dotychczasowych modeli obliczeniowych [1, 2, 3, 5, 8, 9], opracowanych w układzie płaskim w oparciu o założenie tworzenia się sztywnego klina gruntu przed obciążonym poziomo palem.

#### Literatura

1. Ashour M., Norris G.: *Lateral Behavior of Pile Groups in Layered Soils*. J. of Geotech. and Geoenv. Eng. ASCE, vol. 130, no. 6, 2004.
2. Ashour M., Norris G.: *Lateral Loaded Response in Liquefiable Soil*. J. of Geotech. and Geoenv. Eng. ASCE, vol. 129, no. 6, 2003.
3. Ashour M., Norris G.: *Modeling Lateral Soil-Pile Response on Soil-Pile Interaction*. J. of Geotech. and Geoenv. Eng. , ASCE, vol. 126, no. 5, 2000.
4. Bolt A.: *Modelowanie posadowień konstrukcji wsporczych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Wodne, nr 567, Gdańsk 1998.

5. Dembicki E., Digioia A. M. Jr., Lapeyre J. L.: *A Comparisons of Various Methods for Predicting the Response of Drilled Shafts Subjected to High Overturning Moments*. Electra, no. 149, August 1993.
6. Horn A.: *Resistance and Movement of Laterally Loaded Abutment*. Proc. of 5 EC on SMFE, Madrid 1972.
7. Kurałowicz A.: *Boczne obciążenie pali warstwą gruntu o małej wytrzymałości*. Monografie, nr 45, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2004.
8. Odrobiński W.: *Poziome obciążenie pali. Analiza nośności i przemieszczeń*. Prace IBW PAN, Gdańsk 1990.
9. Odrobiński W.: *Zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego w analizie nośności podłoża fundamentowego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 251, Budownictwo Wodne XVIII, Gdańsk 1976.
10. PN-81/B-03322. *Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Fundamenty konstrukcji wsporczych*, 1981.
11. Trojnar K.: *Ocena zwiększenia sztywności bocznej pala płytą*. Mat. XI KKMGiF, t. 1, Gdańsk 1997.
12. Trojnar K.: *Współpraca fundamentów hybrydowych z podłożem pod obciążeniem bocznym. Modelowanie numeryczne*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6, 2007.

## MODELING OF SPATIAL SOIL-PILE INTERACTION

### S u m m a r y

The paper presents stability problems of horizontally loaded piles with regard to their interaction with soil in the three dimensional state of strain. The results obtained are based on analytical works different authors including assessment of interaction between the soil and single pile and own field investigation of single pile under lateral load as well as on numerical analyses in the spatial system of soil-pile interaction.

*Złożono w Oficynie Wydawniczej w czerwcu 2009 r.*