

PROJEKTOWANIE FUNDAMENTÓW HYBRYDOWYCH OBCIĄŻONYCH POZIOMO

Krzysztof TROJNAR*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Streszczenie: W referacie podano zasady obliczania fundamentu hybrydowego wraz z przykładem liczbowym. Przedstawiono sposób budowy ściany oporowej posadowionej na fundamencie hybrydowym i przeanalizowano zachowanie się konstrukcji w gruncie. Podano algorytm obliczania pali hybrydowych, uwzględniający redukcję przemieszczeń bocznych palisady oraz zmniejszenie wartości momentu zginającego w trzonach pali. W przykładzie obliczeniowym porównano uzyskane wyniki z danymi pochodzącymi z badań terenowych uzyskując zadowalającą zgodność wartości obliczonych z pomierzonymi.

Słowa kluczowe: pal zginany, fundament hybrydowy, obciążenie poziome.

1. Wprowadzenie

Projektowanie palisadowych ścian oporowych wymaga uwzględnienia w obliczeniach współpracy pali z podłożem gruntowym. W tym przypadku prawidłowe oszacowanie sztywności układu fundament – podłoże gruntowe ma pierwszorzędne znaczenie przy ustalaniu racjonalnej długości pali w gruncie oraz ich ugięcie. Pozioma płyta wspornikowa, umieszczona na dnie wykopu, współpracująca z rzędem pali może być ważnym elementem zwiększającym sztywność boczną palisady. Efekt działania płyty polega na zredukowaniu przemieszczeń bocznych palisady oraz na zmniejszeniu wartości momentu zginającego w trzonach pali. Wynika to w szczególności z następstw obrotu płyty wywołanego ugięciem pali. Przemieszczenie kątowe płytowego wspornika pełniącego rolę zwieńczenia i umieszczonego na dnie wykopu wpływa na mobilizowanie dodatkowej reakcji podłoża przed pionowym rzędem pali. Przedstawioną ideę kształtowania i obliczania fundamentu hybrydowego zastosowano w praktyce przy zabezpieczeniu stateczności uskoku terenu w Krynicy.

2. Charakterystyka projektowanych pali hybrydowych

Rozwiązanie projektowe ściany oporowej posadowionej na palach hybrydowych okazało się przydatne w Krynicy, w sytuacji, gdy nie było możliwe stosowanie trwałych

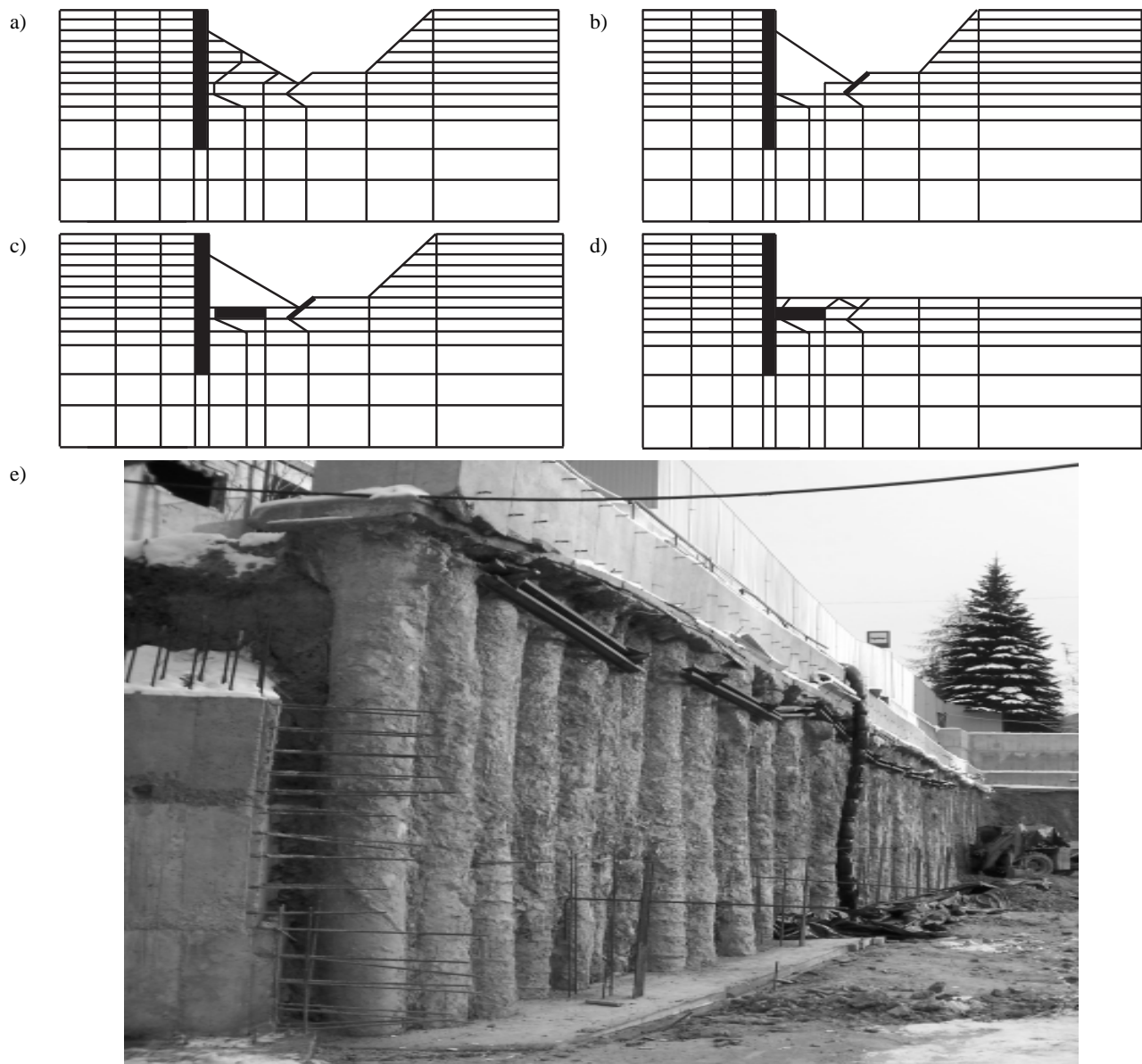
rozpór lub zakotwień w gruncie. Konstrukcję ściany oporowej stanowiły pale wiercone o średnicy 0,8 m. Budowa ściany oporowej polegała na wykonaniu z górnego poziomu terenu rzędu pali o długości 8 m, w rozstawie 1,2 m, które następnie odkopano z jednej strony, formując uskok terenu o wysokości 5 m. Na dnie wykopu, w bezpośrednim sąsiedztwie pali wykonano odcinkowo żelbetową płytę wspornikową o szerokości 1 m, zamocowaną jednym końcem do palisady. Trzony pali powyżej dna wykopu stanowiły ścianę, której powierzchnię w końcowym etapie robót pokryto betonową okładziną. Etapy budowy ściany oporowej na fundamencie hybrydowym pokazano na rysunku 1.

Stateczność konstrukcji oporowych posadowionych na krótkich palach można obliczać z warunku równowagi oporu gruntu pod płytą oraz wartości zmobilizowanego tarcia na pobocznicach pali, przy uwzględnieniu ich wciskania w podłoże. Obliczanie pali hybrydowych o większym zagłębieniu w gruncie wymaga dokładniejszej analizy współpracy fundamentu z podłożem gruntowym (Trojnar, 2013). Podstawowe schematy zachowania się w gruncie konstrukcji oporowych posadowionych na fundamencie hybrydowym pokazano na rysunku 2.

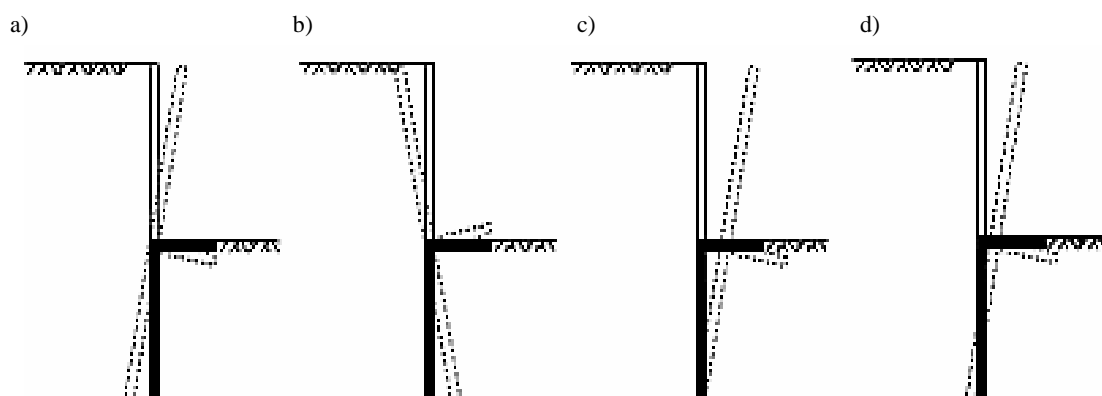
3. Założenia do obliczeń pali hybrydowych

W autorskiej propozycji obliczania pali hybrydowych ze sztywnym trzonem wykorzystano ogólne założenia modeli teoretycznych opisujących współdziałanie

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: ktrojnar@prz.edu.pl



Rys. 1. Etapy budowy ściany oporowej posadowionej na fundamencie hybrydowym: a) wykonanie palisady, b) tymczasowe podparcie ściany z pogłębieniem wykopu, c) wykonanie poziomej płyty wspornikowej na dnie wykopu, d) połączenie części składowych fundamentu i demontaż tymczasowego podparcia, e) widok ściany oporowej przed wykonaniem okładziny betonowej



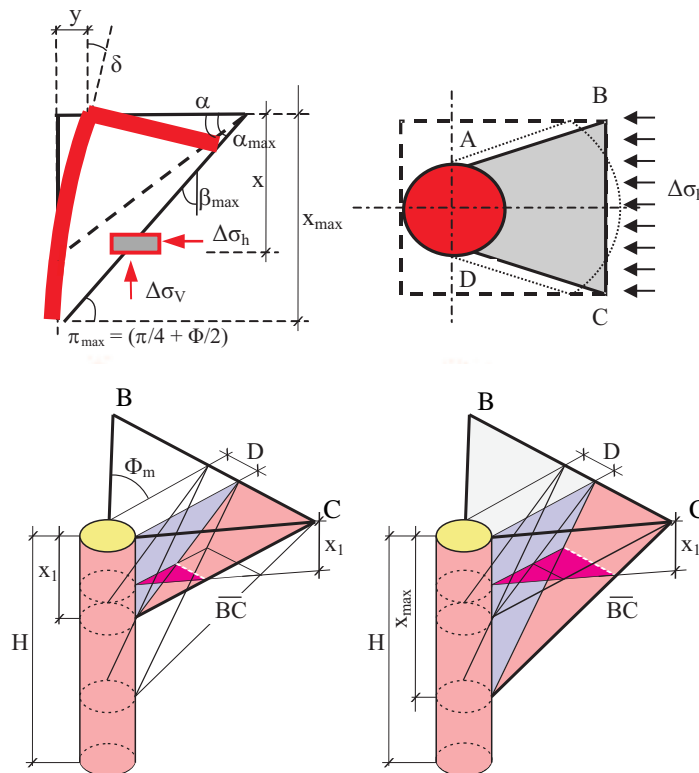
Rys. 2. Schematy zachowania się w gruncie wspornikowej konstrukcji oporowej: a) i b) schematy charakterystyczne dla ścian oporowych z poziomą rozporą umieszczoną na dnie wykopu, c) i d) schematy odpowiadające pracy fundamentów hybrydowych

zginanego pala z gruntem (Odrobiński, 1990; Ashour i Norris, 2000) i uwzględniono w szerszym zakresie efekt przestrzennego stanu naprężenia w ośrodku gruntowym przed zginanym palem, wywołany działaniem płyty. Kształt aktywnej strefy gruntu pod płytą można traktować jako klin ABCD pokazany na rysunku 3. Na podstawie własnych badań i analiz ustalono, że przestrzenne oddziaływanie *quasi*-sztywnego klina na ośrodek gruntowy przed palem można opisać za pomocą miary długości odcinka BC, charakteryzującego szerokość klina na głębokości x poniżej spodu płyty. W ustalonym zakresie przemieszczeń pala hybrydowego wysokość klina zmienia się z głębokością, zależnie od ugięcia głowicy fundamentu. Nacisk boczny pala hybrydowego na grunt zależy od stanu naprężenia w aktywnej strefie podłoża pod płytą. Wartość naprężenia $\Delta\sigma_h$ w tej strefie zależy głównie od pionowego nacisku płyty, który zwiększa się wraz z ugięciem pala. Na podstawie wyników badań modelowych (Trojnar, 2004) ustalono, że maksymalny zasięg *quasi*-sztywnego klina gruntu pod płytą wyznacza kąt α_{max} zawarty pomiędzy tworzącą klina i spodem płyty. Jego największa wartość wynosi: $\alpha_{max} = (\pi/4 + \Phi/2)$. W zakresie większych obciążeń bocznych przemieszczenie pala hybrydowego y nie zależy bezpośrednio od stanu naprężenia w gruncie w obrębie klina pod płytą, lecz wyłącznie od jego kształtu i wymiarów.

Wpływ zmiany rozmiarów klina gruntu pod płytą na wartość graniczną przemieszczenia pala hybrydowego analizowano na modelach numerycznych MES 3D

(Trojnar, 2007). Korzystając z wyników tych analiz ustalono zależność opisującą wpływ formowania się klina gruntu na zmianę ugięcia sztywnego pala hybrydowego, przy zadanym obciążeniu siłą poziomą Q i momentem zginającym M . Przyjęto, że kąt α wyznaczający zasięg *quasi*-nieodkształcalnego klina gruntu pod płytą w płaszczyźnie zginania pala może przyjmować wartości w zakresie od 0 do α_{max} . Przyjęto, że efekt działania płyty wspornikowej można zastąpić ekwiwalentnym odpowiednim zredukowaniem wartości momentu zginającego M_o i siły poziomej Q_o , stanowiących obciążenie głowicy pala bez płyty. W obliczeniach pala hybrydowego przyjęto następujące założenia dodatkowe:

- efekt działania płyty można zastąpić w uproszczeniu reakcją oporu podłoża, przyłożoną od spodu płyty w postaci siły skupionej;
- kierunek działania wypadkowej reakcji oporu gruntu pod płytą jest odchylony od pionu o kąt α , którego wartość zmienia się wraz z ugięciem pala; wynika to z formowania się pod płytą klina gruntu; to założenie jest istotnym uproszczeniem, ale nie wpływa na wynik obliczeń, ponieważ uwzględniono w nim ekwiwalentną redukcję wartości obciążenia głowicy pala hybrydowego;
- pomija się na korzyść bezpieczeństwa wartość poziomego oporu gruntu przed czołową powierzchnią płyty, ze względu na ewentualną możliwość wykonania przypadkowego wykopu przed płytą;



Rys. 3. Założenia do obliczeń pala hybrydowego metodą *quasi*-nieodkształcalnego klina gruntu

- zakłada się, że płyta jest zginana wyłącznie wskutek działania pionowej składowej reakcji podłoża wywołanej obrotem trzonu pala; obciążenie pionowe działające na pal jest przekazywane na grunt przez pobocznicy i stopę; w przypadku niewystarczającej długości pala hybrydowego może wystąpić wyciąganie go z gruntu, spowodowane pokonaniem oporu tarcia na pobocznicy;
- grunt pod płytą charakteryzuje się parametrami o stałych wartościach.

4. Propozycja obliczania pala hybrydowego ze sztywnym trzonem

Przyjęto, że przy obciążeniu pala hybrydowego momentem zginającym M_o i siłą poziomą Q_o , jego głowica obraca się w poziomie terenu o kąt δ . Wskutek obrotu pala w gruncie następuje też obrót płyty. Kąt obrotu płyty i pala jest taki sam, ze względu na sztywne połączenie obu tych elementów. Założono, że opór podłoża pod płytą ma rozkład trójkątny, a maksymalny nacisk płyty na grunt występuje przy końcu wspornika. Pionowe przemieszczenie końca wspornika można obliczyć uwzględniając naprężenie występujące w gruncie pod cząstkowymi powierzchniami płyty według wzoru:

$$s = \sum \frac{\sigma_{vi} \cdot x_i}{E} \quad (1)$$

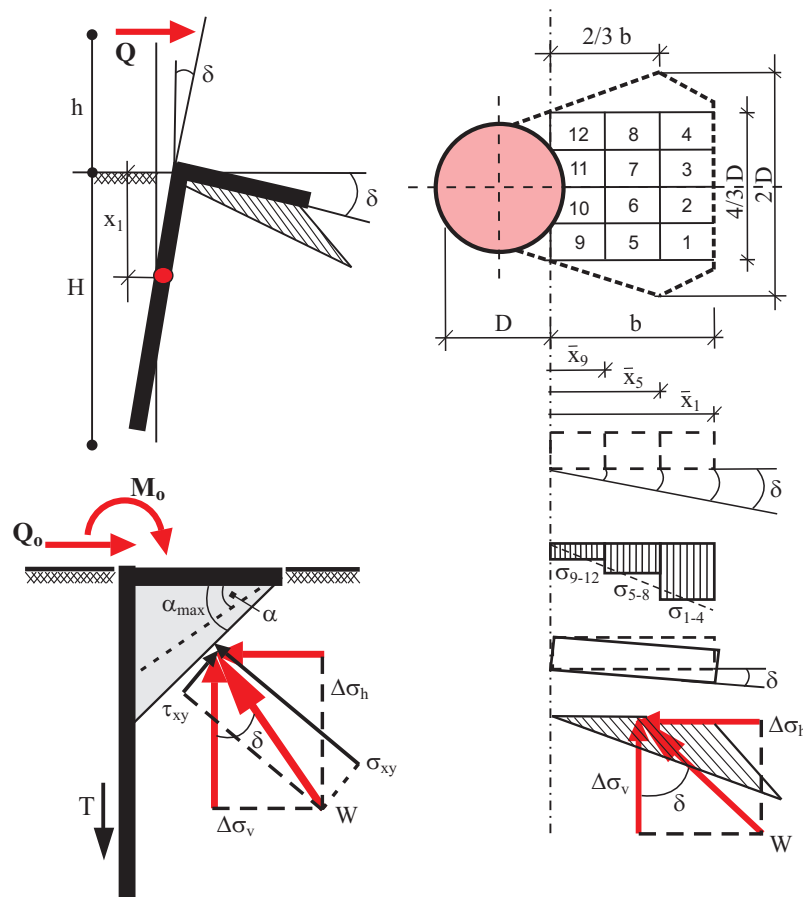
gdzie: s jest osiadaniem końca wspornika płyty w m, σ_{vi} jest naprężeniem w podłożu pod powierzchnią cząstkową w warstwie i w kPa, E jest modułem odkształcenia podłoża w kPa, a x_i jest miąższością warstwy i w m.

Przy obrocie płyty jej koniec przemieszcza się w dół o wartość s i wywiera nacisk na podłoże $\Delta\sigma_v$. Ze względu na małą wartość kąta obrotu płyty można przyjąć, że pionowe przemieszczenie końca wspornika płyty wynosi:

$$s = b \cdot \delta \quad (2)$$

gdzie: s jest pionowym przemieszczeniem końca wspornika płyty w m, b jest wysięgiem wspornika płyty w m, a δ jest kątem obrotu głowicy pala w poziomie terenu w radianach.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, wypadkową oporu podłoża płyty W można zastąpić siłą skupioną skierowaną ukośnie do podstawy i zaczepioną do spodu płyty w odległości $2/3$ wysięgu wspornika. Pochylenie wypadkowej reakcji podłoża pod płytą zmienia się wraz z ugięciem trzonu pala. Na podstawie badań modelowych i analiz teoretycznych ustalono, że największe nachylenie wypadkowej występuje przy maksymalnym zasięgu klina (Trojnar, 2009). W tym przypadku kąt odchylenia od pionu linii tworzącej czołową powierzchnię klina gruntu pod płytą wynosi $\beta_{max} = (\pi/4 - \Phi/2)$. Schemat obliczeniowy układu sił pokazano na rysunku 4. Wyniki badań i analiz obliczeniowych wykonanych przez autora



Rys. 4. Schemat obliczeniowy układu sił w podłożu pala hybrydowego ze sztywnym trzonem

umożliwiły porównanie nacisku bocznego na grunt pala z płytą i bez płyty. Stosunek wartości składowych poziomego naprężenia w gruncie przed palem z płytą i bez płyty można opisać współczynnikiem f_p . Parametr ten charakteryzuje zmianę nachylenia wypadkowej reakcji oporu gruntu pod płytą wskutek przyrostu ugięcia pala. Na podstawie analiz obliczeniowych i badań pali hybrydowych ustalono, że w zakresie przemieszczeń głowicy pala 0,01-0,06 m efekt zwiększania sztywności pala płytą można aproksymować za pomocą wielomianu drugiego stopnia $f_p = f(y)$. Przebieg tej funkcji pokazano na rysunku 5. Opór podłoża wywołany naciskiem płyty powoduje redukcję obciążenia pala hybrydowego o wartość dM_o i dQ_o . Znając parametry płyty wspornikowej i jej podłoża można obliczyć wypadkową wartość reakcji podłoża W , w zależności od znanego przemieszczenia y i kąta obrotu głowicy pala δ . Stosując dowolną metodę obliczeń pala zginanego i zaproponowaną procedurę iteracyjną opartą na stopniowym redukowaniu obciążenia pala, można wyznaczyć przemieszczenie głowicy pala hybrydowego i jej kąt obrotu. W tym celu należy w każdym kolejnym kroku obliczeń iteracyjnych obciążać pal innymi siłami o zredukowanych wartościach:

$$M_i = M_o - dM_i \quad [\text{kNm}] \quad (3)$$

$$Q_i = Q_o - dQ_i \quad [\text{kN}] \quad (4)$$

Porównanie wzorów (1) i (2) z uwzględnieniem podziału płyty na 12 powierzchni cząstkowych, przy założeniu, że wysięg płyty odpowiada średnicy pala D , umożliwia wyznaczenie pionowej składowej oporu podłoża płyty według wzoru:

$$\Delta\sigma_v = \frac{D^2 \cdot E \cdot \delta'}{0,429} = 2,331D^2 \cdot E \cdot \delta' \quad (5)$$

gdzie: $\Delta\sigma_v$ jest pionową składową oporu podłoża pod płytą w kPa, D jest średnicą pala w m, E jest modułem odkształcenia gruntu pod płytą, δ' jest kątem obrotu płyty wyznaczonym w kolejnym kroku iteracji w radianach.

Wartość poziomej składowej oporu gruntu pod płytą $\Delta\sigma_h$ zmienia się wraz z powiększaniem się quasi-szywnego klina gruntu. Przyjmując, że parametr f_p charakteryzuje nieliniowy przyrost poziomej składowej naprężenia w gruncie pod płytą, można obliczyć wartość $\Delta\sigma_h$ według wzoru:

$$\Delta\sigma_h = \Delta\sigma_v \cdot f_p \cdot \text{tg}(\delta') = 2,331D^2 \cdot E \cdot \delta' \cdot f_p \cdot \text{tg}(\delta') \quad (6)$$

Siły składowe oporu podłoża płyty wspornikowej $\Delta\sigma_h$ i $\Delta\sigma_v$ powodują redukcję odciążenia głowicy pala hybrydowego dM i dQ wywołane oddziaływaniem oporu podłoża płyty można wyliczyć w kolejnych krokach iteracji wzorów, w zależności od aktualnej wartości ugięcia pala δ' :

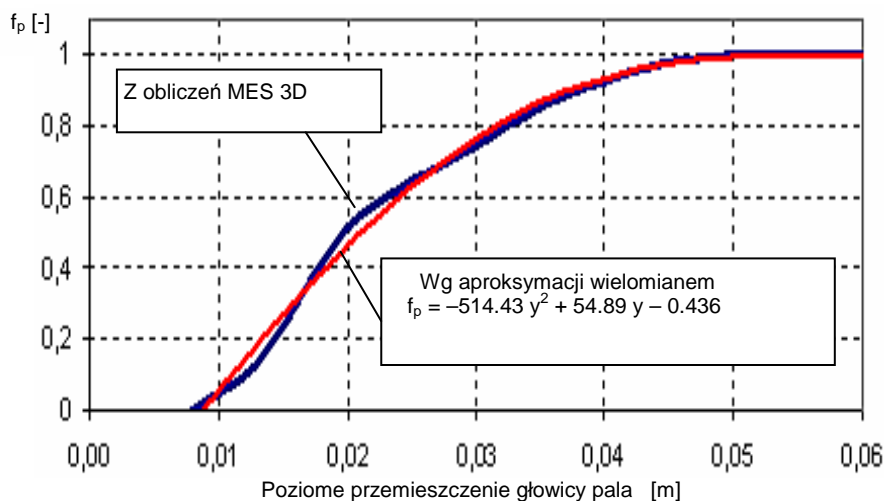
$$dM = 2/3b \cdot \Delta\sigma_v = 2/3D \cdot \Delta\sigma_v = 1,554D^3 \cdot E \cdot \delta' \quad (7)$$

$$dQ = \Delta\sigma_h \quad (8)$$

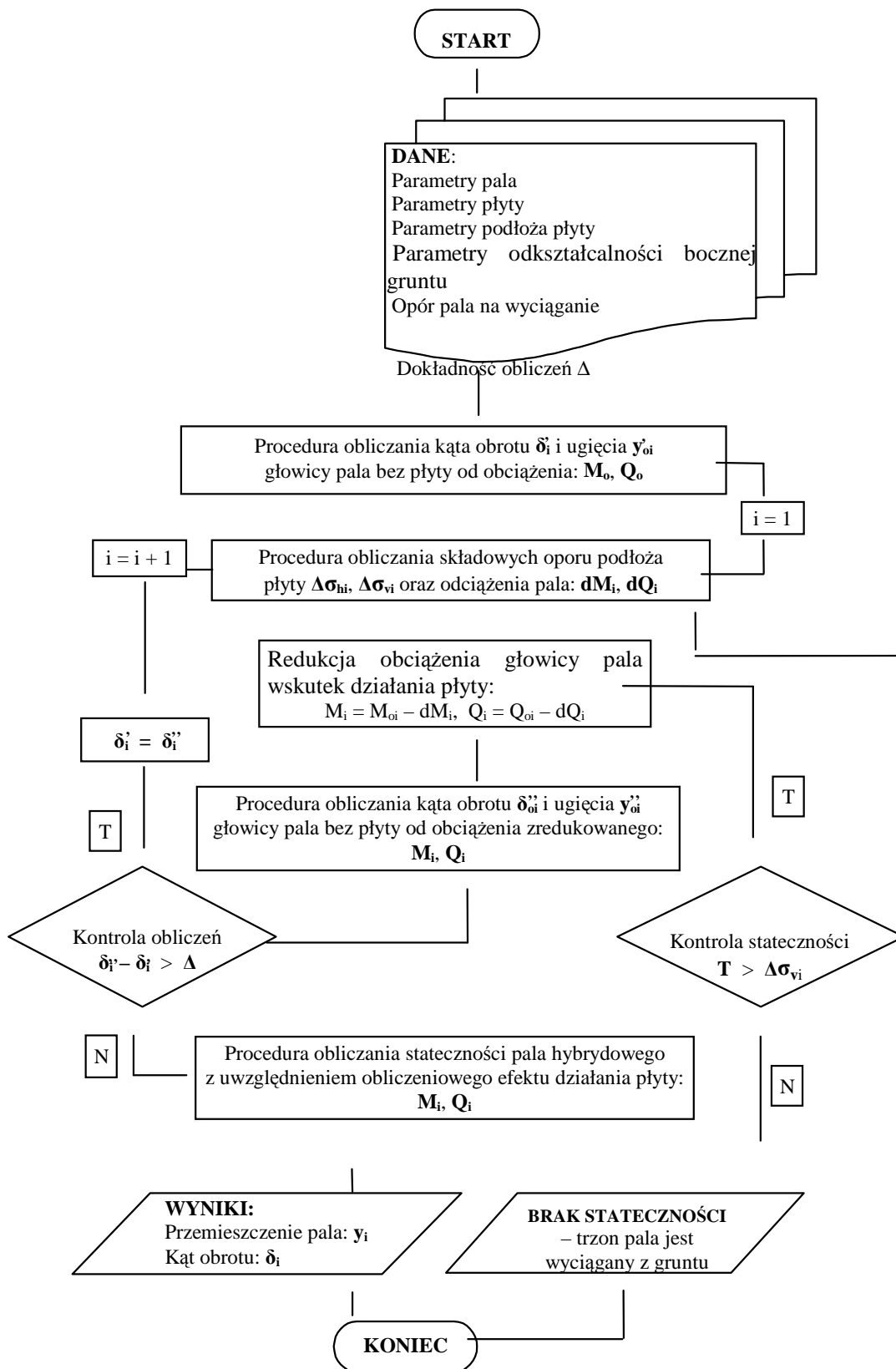
5. Procedura iteracyjnego obliczania pala hybrydowego

Algorytm obliczeń iteracyjnych pala hybrydowego podano w formie schematu blokowego na rysunku 6:

1. obliczyć wartość początkową kąta obrotu δ'_{oi} pala bez płyty, obciążonego w głowicy momentem zginającym M_o i siłą poziomą Q_o ;
2. obliczyć wartości składowych oporu podłoża płyty $\Delta\sigma_{hi}$, $\Delta\sigma_{vi}$ oraz efekt redukcji obciążenia głowicy pala dM_i , dQ_i – przy założeniu pionowego oddziaływania płyty na grunt przed palem;



Rys. 5. Przebieg zmiany nachylenia wypadkowej oporu podłoża płyty, opisany parametrem f_p , w zależności od przemieszczenia głowicy pala hybrydowego w gruncie niespoistym



Rys. 6. Algorytm obliczania stateczności pala hybrydowego ze sztywnym trzonem

3. obliczyć tacie T na poboczniczy pała i sprawdzić warunek wyciągania pała z gruntu: $T < \Delta\sigma_{vi}$;
4. obliczyć zredukowane wartości obciążenia pała: $M_i = M_o - dM_i$ oraz $Q_i = Q_o - dQ_i$;
5. ponownie obliczyć kąt obrotu głowicy pała δ_i'' od obciążenia zredukowanego M_i oraz Q_i ;
6. porównać wartości kątów obrotu pała: δ_i' i δ_i'' uzyskane w ostatnich dwóch krokach iteracji:
 - a) w przypadku gdy różnica wartości kątów jest większa niż zadana dokładność obliczeń Δ , należy powtórzyć postępowanie według punktów 2-6 w nowym etapie iteracji ($i + 1$), biorąc do wyznaczenia efektów redukcji obciążenia (dM_{i+1} i dQ_{i+1}) ostatnio wyznaczoną wartość kąta δ_i'' ;
 - b) uzyskanie zgodności kątów δ_i' i δ_i'' w dwóch kolejnych krokach iteracji z założoną dokładnością Δ oznacza, że stopień zredukowania obciążenia głowicy pała określony wartościami dM_i , dQ_i odpowiada rzeczywistemu efektowi działania płyty E_p .

6. Przykładowe obliczenia pała hybrydowego ze sztywnym trzonem

W celu wykazania poprawności przedstawionego sposobu obliczania stateczności pojedynczego pała hybrydowego zestawiono ważniejsze wyniki dla pała o średnicy $D = 1,2$ m i długości 5 m oraz porównano je z badaniami terenowymi pali o takich samych wymiarach. W obliczeniach zginania trzonu pała korzystano ze standardowego programu komputerowego LPILE.

Parametry geometryczne płyty

- moment bezwładności trapezowej płyty względem jej krawędzi połączonej z trzonem pała $I_1 = 0,583 \text{ m}^4$,
- obliczeniowy wysięg zastępczej płyty prostokątnej $b = 0,9$ m,

- obliczeniowa szerokość zastępczej płyty na końcu wspornika $L = 2,4$ m,
- stosunek wymiarów boków zastępczej płyty $L/b = 2,7$,
- moduł odkształcenia podłoża pod płytą $E = 60\,000$ kPa.

Naprężenia w podłożu płyty wspornikowej

W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń składowej pionowej naprężenia w aktywnej strefie podłoża płyty. W obliczeniach uwzględniono współczynniki rozkładu naprężeń η podane przez Motaka (1988) dla fundamentu prostokątnego $L/b = 2,7$ z trójkątnym obciążeniem powierzchniowym.

Przemieszczenie pionowe i kąt obrotu wspornika płyty

Przemieszczenie i kąt obrotu wspornika płyty ustalono z wzorów (1) i (2) z uwzględnieniem naprężenia z tabeli 1:

$$s = b \cdot \delta' = \sum \frac{\sigma_{vi} \cdot x_i}{E} = \frac{0,80775 \cdot b^2 \cdot \Delta\sigma_v}{E} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

$$\delta' = \frac{0,80775 \cdot b \cdot \Delta\sigma_v}{E} = \frac{0,80775 \cdot 0,9 \cdot \Delta\sigma_v}{E} \quad [\text{rd}] \quad (10)$$

Wartości sił redukujących obciążenie pała wskutek oddziaływania płyty

Wartość pionowej składowej oporu gruntu pod płytą oraz sił redukujących obciążenie głowicy pała hybrydowego otrzymano po przekształceniu równania (10) i podstawieniu do wzorów (6), (7), (8):

$$\Delta\sigma_v = 1,3756E \cdot \delta' \quad [\text{kN}] \quad (11)$$

$$dQ = \Delta\sigma_h = 1,3756E \cdot \delta' \cdot f_p \cdot \text{tg}(\delta') \quad [\text{kN}] \quad (12)$$

$$dM = \Delta\sigma_v \cdot 2/3b = 0,8254E \cdot \delta' \quad [\text{kNm}] \quad (13)$$

Tab. 1. Obliczenia składowych pionowych naprężenia w podłożu płyty wspornikowej

Względne zagłębienie x/b	Zagłębienie warstwy pod płytą	Współczynniki rozkładu naprężenia η	Mięgkość warstwy gruntu x_i	Naprężenie w warstwie $\sigma_{vi}(b^2 \cdot \Delta\sigma_v)$	$[\sigma_{vi}(b^2 \cdot \Delta\sigma_v)] \cdot x_i$
-	m	-	m	kN/m ²	kN/m ²
0,25	0,23	0,591	0,45	0,676	0,3042
0,75	0,68	0,409	0,45	0,346	0,1638
1,25	1,13	0,200	0,45	0,229	0,1035
1,75	1,58	0,136	0,45	0,156	0,0702
2,25	2,03	0,100	0,45	0,114	0,0513
2,75	2,48	0,073	0,45	0,083	0,0374
3,25	2,93	0,055	0,45	0,063	0,0284
3,75	3,38	0,041	0,45	0,047	0,0212
4,25	3,83	0,032	0,45	0,037	0,0167
4,75	4,28	0,023	0,45	0,026	0,0117
$\sum \sigma_{vi} \cdot x_i = 0,80775 b^2 \cdot \Delta\sigma_v$					

Obliczenia ugięcia głowicy pala hybrydowego z uwzględnieniem efektu współdziałania płyty

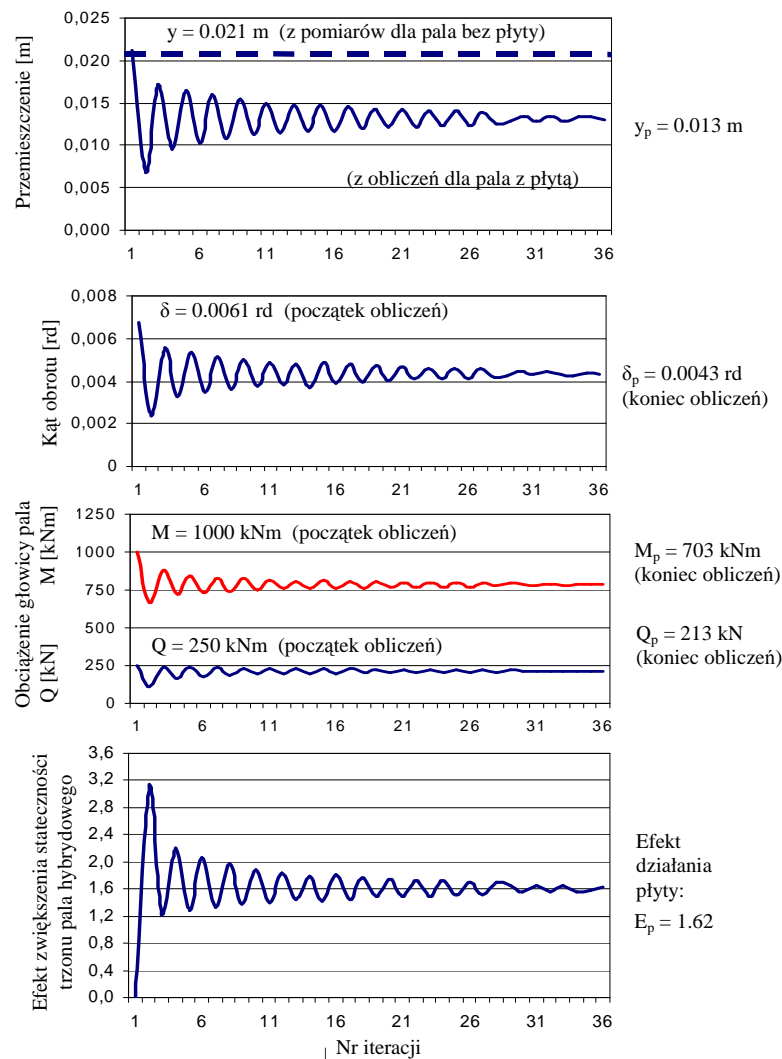
Korzystając z programu LPile, obliczono ugięcie głowicy pala y i kąt obrotu δ od obciążenia: $Q_o = 250$ kN i $M_o = 1000$ kNm. Założono poziom dokładności obliczeń $\Delta = 0,01$ %. Wykorzystując w kolejnych 35-ciu iteracjach wzory (11)-(13) obliczono ugięcie głowicy pala hybrydowego y' oraz odpowiadający kąt

obrotu δ' od obciążeń zredukowanych: $Q_p = Q_o - dQ_i$ i $M_p = M_o - dM_i$.

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2 w wybranych krokach iteracji, a cały przebieg obliczeń pokazano graficznie na rysunku 7. Efektem obliczeń jest ustalenie adekwatnego obciążenia bocznego pala hybrydowego: $Q_{35} = 213$ kN, $M_{35} = 783$ kNm oraz rzeczywistego przemieszczenia głowicy $y = 13$ mm i kąta obrotu

Tab. 2. Wyniki obliczeń pala hybrydowego w wybranych krokach iteracji

Krok iteracji i	Q_i kN	M_i kNm	y_i m	δ_i rd	$\Delta\sigma_{vi}$ kN	dM_i kNm	f_p -	dQ_i kN	Δ -	E_p -
1	250	1000	0,0211	0,00676	558	335	0,493	137	0	0
5	178	736	0,0102	0,00347	286	172	0,070	10	0,00186	2,07
10	232	814	0,0150	0,00489	404	242	0,272	55	0,00114	1,41
15	197	760	0,0116	0,00389	321	193	0,132	21	0,00095	1,82
20	225	800	0,0142	0,00465	384	230	0,240	46	0,00061	1,49
25	206	773	0,0124	0,00412	340	204	0,166	28	0,00047	1,70
30	212	781	0,0129	0,00428	353	212	0,187	33	0,00015	1,64
35	213	783	0,0130	0,00431	356	213	0,191	34	0,00007	1,62



Rys. 7. Przebieg obliczeń iteracyjnych pala hybrydowego: — — pal konwencjonalny (bez płyty), — pal hybrydowy

$\delta = 0,00431$ rd. Obliczona efektywność działania płyty wyniosła $E_p = 1,62$, co oznacza, że ugięcie pala hybridowego jest mniejsze o 62 % w porównaniu z zachowaniem się w gruncie pala konwencjonalnego (bez płyty).

7. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów z badań połowych pali

Ugięcie i kąt obrotu głowicy pala konwencjonalnego (bez płyty), obciążonego siłą poziomą $Q_o = 250$ kN i momentem zginającym $M_o = 1000$ kNm wyznaczone na podstawie obliczeń wynosi odpowiednio: $y = 21,1$ mm i $\delta = 0,00676$ rd. Obliczone wartości są bliskie wartościom uzyskanym z badań połowych pala średnicy 1,2 m i długości 5 m, gdzie przy takim samym obciążeniu pala zmierzone ugięcie głowicy wyniosło $y = 18$ mm.

W 35 krokach obliczeń iteracyjnych pala hybridowego wyznaczono zredukowaną wartość obciążenia głowicy pala: $Q_p = 213$ kN, $M_p = 703$ kNm, która jest równoważna efektowi działania płyty wspornikowej. Obliczone przemieszczenie pala wywołane tym obciążeniem wyniosło $y_p = 13$ mm i wartość tę można przyjąć jako ostateczny wynik ugięcia głowicy pala hybridowego.

Efektywność działania płyty pala hybridowego opisana wartością współczynnika efektywności działania płyty $E_p = 1,62$ jest porównywalna z wynikiem 1,70 uzyskanym z porównania ugięć pala z płytą i bez płyty w badaniach terenowych. Nieco większa wartość współczynnika może wskazywać na większy odpór gruntu na czołowej powierzchni płyty badanego pala hybridowego.

8. Podsumowanie

Na przykładzie budowy ściany oporowej w Krynicy pokazano, że oddziaływanie ośrodka gruntowego na pal hybridowy, to znaczy połączony z poziomą płytą wspornikową, zmniejsza przemieszczenia poziome palisadowej konstrukcji oporowej oraz redukuje moment zginający w trzonach pali. Uwzględnienie współpracy płytowego zwieńczenia z palisadą i podłożem gruntowym umożliwia przekazanie na fundament większego obciążenia poziomego niż w przypadku pomijania tej współpracy.

Racjonalne projektowanie fundamentów hybridowych wymaga dokładniejszego rozpoznania ich stateczności, z określeniem rzeczywistych wartości przemieszczeń, gdyż to one zwykle decydują o warunkach użytkowania budowli oporowych. Ustalanie przebiegu zmian przemieszczeń fundamentu hybridowego z uwzględnieniem jego współdziałania z gruntem zalegającym w strefie wpływu płytowego wspornika jest możliwe z zastosowaniem procedury iteracyjnej zaproponowanej w referacie.

Literatura

- Ashour M., Norris G. (2000). Modeling lateral soil-pile response on soil-pile interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, No. 5, 420-427.
- Motak E. (1988). Fundamenty Bezpośrednie – Wzory, Tablice, Przykłady. *Arkady*, Warszawa.
- Odrobiński W. (1990). Poziome Obciążenie Pali. Analiza Nośności i Przemieszczeń. *Prace IBW PAN*, Gdańsk.
- Trojnar K. (2004). Badania modelowe współpracy z podłożem fundamentów hybridowych obciążonych poziomo. W: *Materiały Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2004*, 265-272.
- Trojnar K. (2007). Współpraca fundamentów hybridowych z podłożem pod obciążeniem bocznym. Modelowanie numeryczne. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 6/2007, 374-379.
- Trojnar K. (2009). Stateczność Fundamentów Hybridowych Obciążonych Poziomo. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*, Rzeszów.
- Trojnar K. (2013). Lateral stiffness of hybrid foundations – field investigations and 3D FEM analysis. *Géotechnique*, Vol. 63, No. 5, 341-353.

DESIGN OF HYBRID FOUNDATIONS ON LATERAL LOAD

Abstract: Efficient design of retaining structures needs defining the stability of the piles and their actual displacement values as they decide the use of the building. Consideration of the soil – pile – cap interaction makes it possible to put more horizontal load on the pile foundation, than when such interaction is ignored. Since it is not possible to completely define such problems, the effect of the pile cap on load capacity is omitted while analysing soil embedded constructions subjected to high lateral load. The paper presents problems of design of horizontally loaded foundations with regard to their interaction with soil in the three dimensional state of strain.