

Krzysztof TROJNAR
Politechnika Rzeszowska

BADANIA WPLYWU MODYFIKOWANIA PODŁOŻA NA SZTYWNOŚĆ BOCZNĄ PAŁA HYBRYDOWEGO

Przedstawiono metodykę i wyniki badań polowych dwóch pali wierconych posadowionych w piasku, obciążonych siłą poziomą i momentem zginającym. Analizowano efektywność zwiększenia sztywności bocznej pała hybrydowego w zależności od sposobu wzmocnienia podłoża płyty. Efektem badań są wnioski dotyczące możliwości ograniczania poziomych przemieszczeń pała hybrydowego przez poprawę cech podłoża płyty w wyniku jego zagęszczenia lub spetryfikowania zaczynem cementowym.

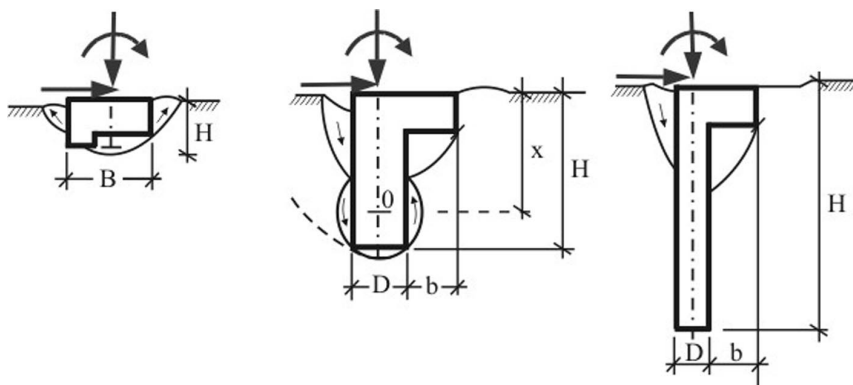
1. Wprowadzenie

Praca dotyczy mechanizmu współpracy fundamentu z ośrodkiem gruntowym, z uwzględnieniem interakcji tego ośrodka i konstrukcji hybrydowej obciążonej monotonicznie i poziomo. Przedstawiony w artykule zakres badań polowych stanowi część większego programu badawczego zrealizowanego przez autora w latach poprzednich w Katedrze Mostów Politechniki Rzeszowskiej, kierowanej przez prof. Andrzeja Jarominiaka (Trojnar 2009). W badaniach stosowano jednocześnie obciążenie boczne dwóch pali wyposażonych w płyty wspornikowe, wykonane na warstwie niespoistego gruntu o różnych cechach. Dzięki temu było możliwe bezpośrednie porównanie ugięć obu fundamentów obciążonych identycznie, w tych samych warunkach. Badania zrealizowano w kilku wariantach, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu cech podłoża płyt zwięźających na zginanie trzonów pali zagłębionych w niespoistym podłożu. Analizę zachowania się w gruncie obu fundamentów przeprowadzono na podstawie wykresów zależności ugięcia pała w poziomie terenu od wartości obciążenia. Dokładne rozpoznanie wpływu warunków oparcia płyt na gruncie pozwoliło ocenić efekty zmiany cech gruntu niespoistego, stanowiącego podłożę płyty wspornikowej, na przemieszczenia boczne zginanego pała hybrydowego. Rozpoznanie tej problematyki ma istotne znaczenie w projektowaniu przyczółków mostowych i ścian oporowych posadowionych na jednym rzędzie pali, obciążonych dużymi siłami poziomymi.

2. Koncepcja fundamentu hybrydowego

Według definicji autora *fundament hybrydowy* składa się z dwóch połączonych elementów: poziomego – opartego bezpośrednio na gruncie, i pionowego – zagłębionego w podłożu. Tak skonstruowany fundament charakteryzuje się sztywnością wynikającą głównie z jego zagłębienia w podłożu oraz pionowego nacisku wywieranego na grunt przed palem przez poziomy element wspornikowy. Element ten, odpowiednio ukształtowany i wysunięty poza obrys trzonu, może jednocześnie spełniać rolę zwieńczenia rzędu pali lub ściany szczelinowej.

Ustalenie pojęcia *fundament hybrydowy* umożliwia komplementarne klasyfikowanie fundamentów palowych z płytami zwieńczającymi, mających różne rozwiązania konstrukcyjne, a także ułatwia zdefiniowanie współpracy takich fundamentów z podłożem gruntowym. Przykłady ukształtowania fundamentów hybrydowych pokazano na rys. 1. Dzięki uwzględnieniu współpracy płyty wspornikowej z podłożem uzyskuje się zwiększenie nośności poziomej fundamentu palowego. Głównym efektem działania płyty jest ograniczenie poziomych przemieszczeń fundamentu hybrydowego i zmniejszenie wartości momentu zginającego trzon pala.



Rys. 1. Typszereg fundamentów hybrydowych

3. Charakterystyka badań pali i podłoża płyt zwieńczających

3.1. Założenia badań polowych

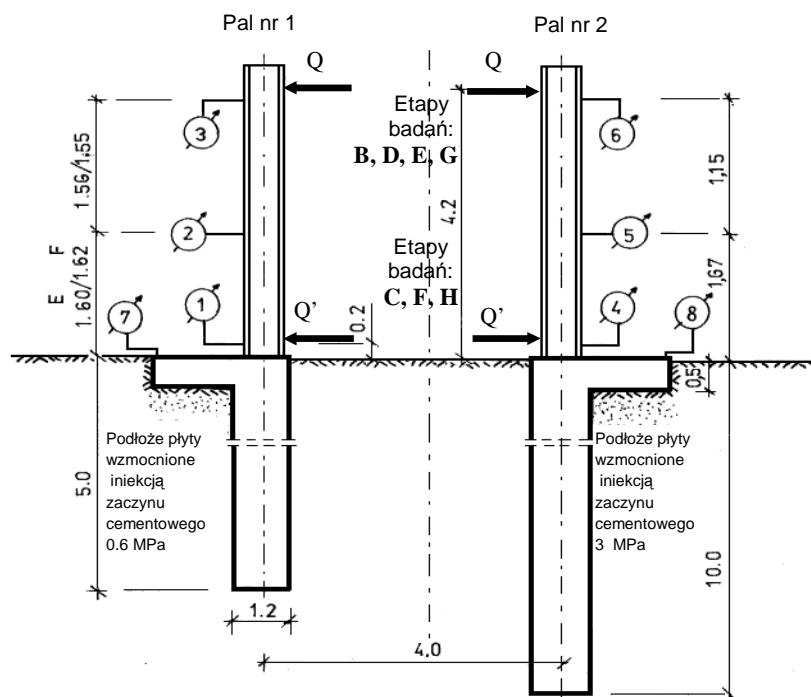
Z wyników badań współpracy z podłożem fundamentów palowych ze zwieńczeniem płytowym opisanych m. in. w pracach: Kima i in. (1979), Ashoura i Norrisa (1998, 2000), Mokwy i Duncana, (2001, 2003), Rollinsa i Sparksa (2002), wiadomo, że efektywność współdziałania płyty wspornikowej z palem

i podłożem gruntowym zależy od tego, jak zachowuje się grunt pod płytą przy obciążeniu pala. Jest pożądane, aby opór gruntu wywołany naciskiem płyty miał stałą wartość, niezależnie od czasu działania obciążenia (Prakash i Kumar 1996), (Sawicki i Świdziński 2002). Ważnym czynnikiem z punktu widzenia współpracy fundamentu hybrydowego z gruntem są właściwe cechy podłoża, na którym spoczywa płyta, oraz ustalenie, jak poszczególne jego parametry wpływają na nośność poziomą i przemieszczenia pala hybrydowego.

W celach badawczych wykonano dwa pale wiercone o średnicy 1.2 m, zagłębione 5 m (pal nr 1) i 10 m (pal nr 2) w jednorodnym piasku charakteryzującym się kątem tarcia wewnętrznego $\Phi = 37^\circ$ i ciężarem objętościowym $\gamma = 17.4$, kN/m³. Każdy pal był połączony z płytą wspornikową ułożoną na specjalnie zagęszczonej warstwie piasku. Miąższość tej warstwy pod płytą pala krótszego (nr 1) wynosiła 0.5 m, pod płytą pala dłuższego (nr 2) – 0.2 m. Badania polegały na porównaniu efektywności zwiększenia sztywności bocznej pali hybrydowych przed i po wzmocnieniu podłoża płyt. Podłoże płyt wzmocniono, petryfikując piasek zaczynem cementowym wtłoczonym pod obie płyty z różnym ciśnieniem. W czasie badań obciążano pale siłą poziomą i momentem zginającym (ramię działania siły wynosiło 4.2 m) lub wyłącznie siłą poziomą (ramię działania siły było mniejsze niż 0.2 m). Schemat badanych pali testowych, miejsca pomiarów i przykładania obciążeń pokazano na rys. 2.

3.2. Program badań

W pierwszej kolejności zbadano zachowanie się pali hybrydowych obciążonych poziomo przed wzmocnieniem podłoża płyt, tj. w etapach badań: **B**, **D** – oznaczających odpowiednio pierwsze i powtórne obciążenie pali siłą przyłożoną 4.2 m nad gruntem, oraz w etapie **C** – przy obciążeniu siłą poziomą przyłożoną 0.2 m przy powierzchni terenu. Następnie zbadano pale w kolejnych dwóch etapach: **E**, **F** – po wzmocnieniu podłoża płyt, pod odpowiednim obciążeniem: siłą poziomą i momentem zginającym lub wyłącznie siłą poziomą. Wzmocnienie podłoża polegało na iniekcji niskociśnieniowej w warstwę piasku pod płytą pala nr 1 (zagłębionego 5 m) i iniekcji o wyższym ciśnieniu w warstwę piasku zalegającą pod płytą pala nr 2 (zagłębionego 10 m). W czasie obciążenia mierzono ugięcia trzonów pali oraz osiadania końców płyt wspornikowych. Efektywność zwiększenia sztywności bocznej pali z płytami opartymi na spetryfikowanym podłożu oceniono, porównując ich ugięcia zmierzone pod obciążeniem poziomym z wynikami ugięć pali bez płyt, uzyskanymi z wcześniej wykonanych badań (Trojnar 1997) oraz z wynikami dwóch następnych etapów badań, wykonanych po zlikwidowaniu płyt wspornikowych: w etapie **G** – pod obciążeniem siłą przyłożoną na wysokości 4.2 m nad gruntem, oraz w etapie **H** – pod obciążeniem siłą poziomą przyłożoną 0.2 m przy powierzchni terenu.



Rys. 2. Schemat badania pali hybrydowych

3.3. Cechy podłoża płyt

Przygotowane wcześniej podłoża obu płyt miały inne cechy. Przed rozpoczęciem obciążeń pali sprawdzono zagęszczenie gruntu pod płytami, pobierając próbki NNS i NW, oraz sprawdzono jego podatność aparatem VSS. Odkształcalność podłoża płyt skontrolowano również po ich zabetonowaniu. Ustalone na podstawie badań parametry podłoża obu płyt podano w tab. 1.

Tabela 1. Wyniki oznaczeń parametrów gruntu pod płytami pali

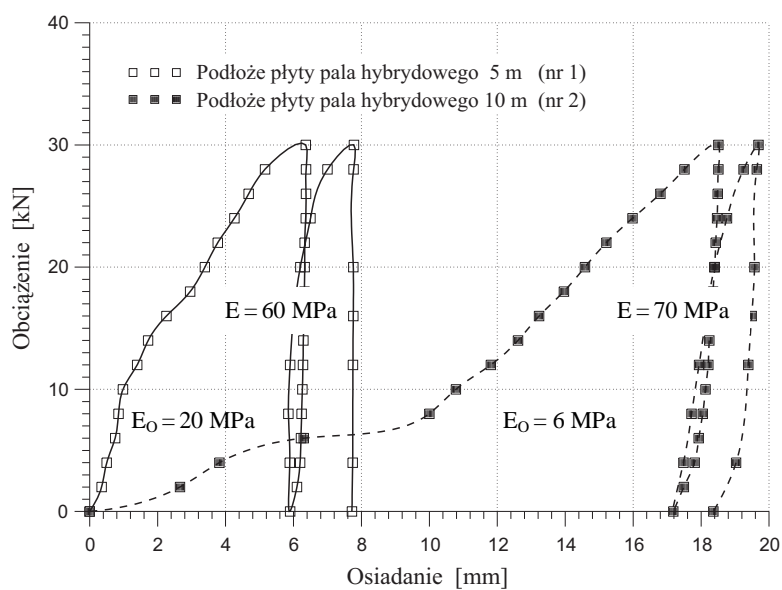
Długość pala [m]	Wilgotność gruntu [%]		Ciężar objętościowy [kN/m ³]		Wskaźnik zagęszczenia I_s	Moduł odkształcenia [MPa]	
	naturalna W_n	optimalna W_o	próbki NNS	aparat Proctora		pierwotny E_o	wtórny E
5	2.8	3.5	1.725	1.742	0.98	20	70
10					0.95	6	60

Bezpośrednio przed rozpoczęciem obciążenia pali określono moduł odkształcenia gruntu pod każdą płytą, wciskając w jej podłoże stalową płytkę o średnicy 200 mm, umieszczoną na gruncie bezpośrednio przed betonowaniem.

Pomiary były możliwe dzięki uformowaniu w płytach otworów przelotowych. Widok badań podłoża płyt pokazano na rys. 3. Wyniki pomiarów odkształcalności podłoża przedstawiono na rys. 4. Wartość pierwotna modułu odkształcenia gruntu pod płytą pala krótszego (nr 1) wynosiła $E_o = 20$ MPa, natomiast pod płytą pala dłuższego (nr 2) była ponadtrzykrotnie mniejsza: $E_o = 6$ MPa.



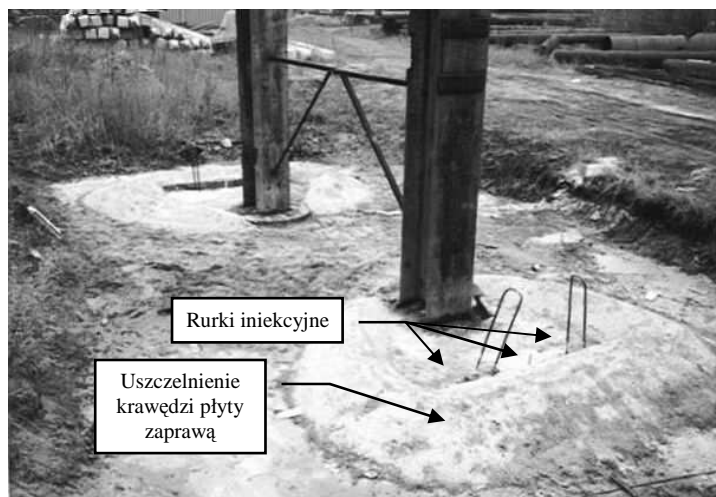
Rys. 3. Badanie odkształcalności podłoża pod płytą wspornikową



Rys. 4. Wyniki pomiarów odkształcalności podłoża pod płytami wspornikowymi na stanowisku badawczym

3.4. Wzmocnienie iniekcją podłoża płyt

W celu wzmocnienia podłoża płyt wtłoczono w grunt zaczyn cementowy przez 3 rurki o średnicy 50 mm, zabetonowane pionowo w płytach, przy ich wysuniętych krawędziach. Aby zaczyn nie wypływał spod płyt, ich obrzeża uszczelniono zaprawą. W podłoże każdej płyty wtłoczono ok. 100 litrów zaczynu cementowego.



Rys. 5. Widok płyt wspornikowych z uszczelnionymi obrzeżami przed wykonaniem iniekcji



Rys. 6. Widok głowicy pała przygotowanego do badania po usunięciu płyty wspornikowej

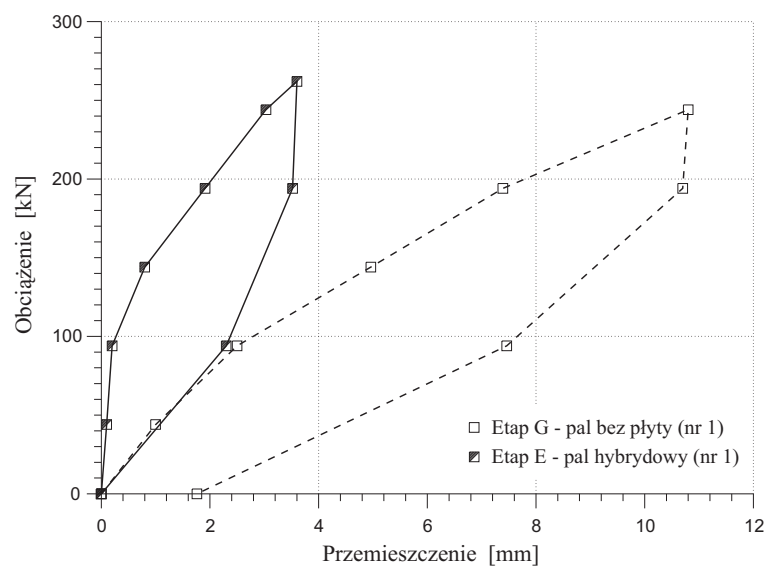
Stosowano różne wartości ciśnienia iniekcji w podłoża płyt obu pali: w krótszym palu (nr 1) – 0.6 MPa, w dłuższym palu (nr 2) – 3.0 MPa. Płyty przygotowane do wykonania iniekcji pokazano na rys. 5. Po spetryfikowaniu podłoża płyt obciążono pale w etapach badań **E** i **F**, po czym płyty rozkuto i usunięto. Głowica pala przygotowanego do badania po usunięciu płyty jest pokazana na rys. 6. Następnie przeprowadzono powtórnie takie samo obciążenie pali bez płyt w etapach badań **G** i **H**. Pomiary przemieszczeń pali wykonane w tych etapach pozwoliły stwierdzić, czy nastąpiły zmiany współpracy zginanych pali z gruntem w rezultacie spetryfikowania podłoża przed trzonami obu pali.

3.5. Przebieg badań

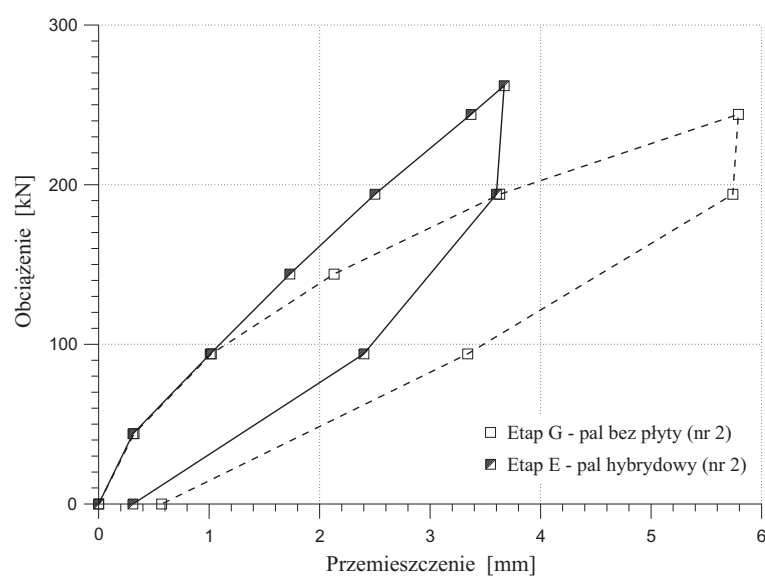
Badania polegały na rozpychaniu dwóch pali hybrydowych (wyposażonych w płyty) siłą poziomą o wartości do 500 kN, przyłożoną 4.2 m nad terenem (etapy **E** i **G**) i 0.2 m przy powierzchni terenu (etapy **F** i **H**). Siłę zwiększano co 50 kN i utrzymywano do czasu zaniku przyrostu przemieszczeń pala w danym cyklu obciążenia. W czasie badań kontrolowano ugięcia głowic pali i osiadanie końców płyt wspornikowych. Przemieszczenia mierzono czujnikami zegarowymi umieszczonymi na trzech poziomach (rys. 2.). Po rozkuciu i usunięciu płyt wspornikowych stwierdzono, że przed palem nr 1, gdzie stosowano niższe ciśnienie wtlaczania iniektu (0.6 MPa), grunt pod płytą był pokryty cienką warstwą stwardniałego zaczynu cementowego. Po rozebraniu płyty pala nr 2, gdzie była stosowana iniekcja o wyższym ciśnieniu (3 MPa), stwierdzono, że grunt pod płytą był spetryfikowany zaczynem cementowym do głębokości 0.4 m. Po usunięciu płyt w etapie badań **G** rozpychano pale siłą poziomą przyłożoną 4.2 m nad terenem. Obciążenie zwiększano co 50 kN, doprowadzając je do 240 kN. Następnie, po odciążeniu pali rozepchnięto je w poziomie terenu (etap badań **H**), stosując siłę 400 kN. W czasie obciążania pali i po ich odciążeniu mierzono ugięcia jak w poprzednich etapach badań.

3.6. Wyniki badań

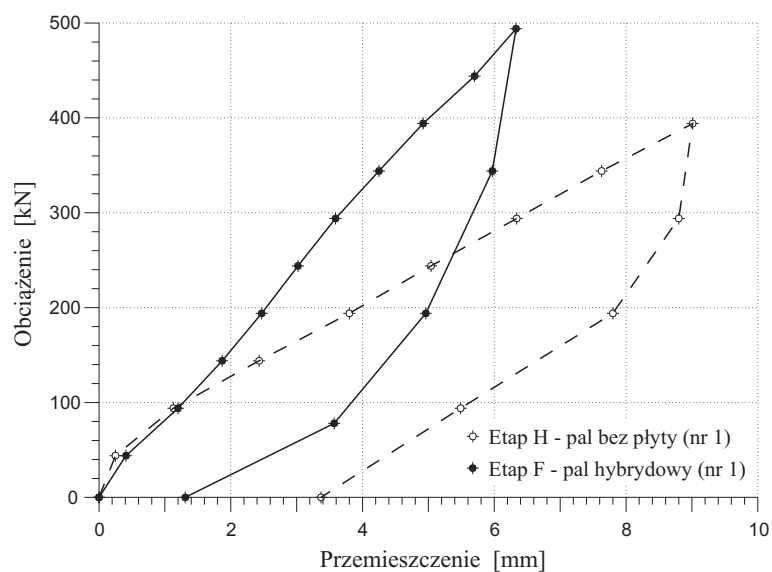
Wyniki pomiarów ugięć głowic pali pokazano na rys. 7-10. Wykresy zależności poziomego przemieszczenia głowic pali od wartości obciążenia w poszczególnych etapach badań potwierdzają, że efektywność zwiększenia bocznej sztywności pala płytą zależy w znacznym stopniu od jakości przygotowania jej podłoża. Pokazany na wykresach przebieg zginania pali jest nieliniowy, zarówno w przypadku pali z płytami, jak i bez płyt. Różne długości pali miały w badanym przypadku znaczący wpływ jedynie na przemieszczenia głowic pali bez płyt. Spetryfikowanie podłoża płyt z zastosowaniem różnych wartości ciśnienia iniekcji spowodowało, że efekt zmniejszenia ugięć obu pali hybrydowych wskutek działania płyt był podobny.



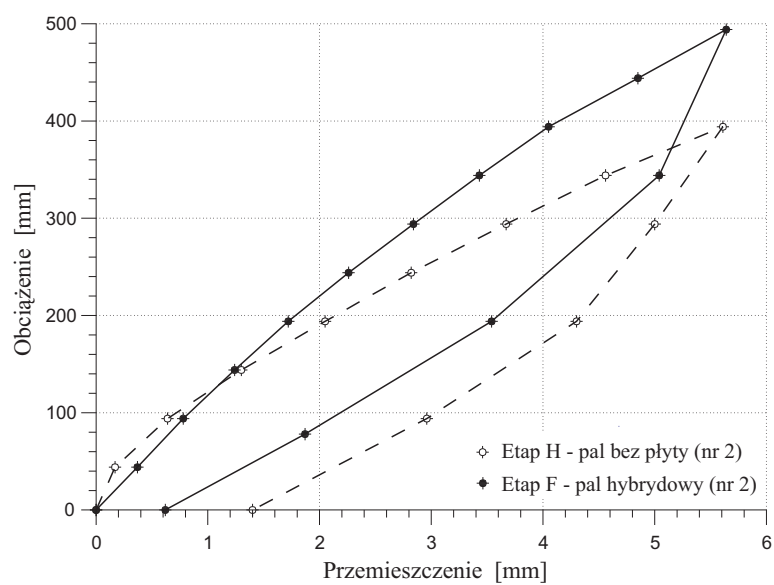
Rys. 7. Wyniki badania pala nr 1 z płytą i bez płyty po iniekcyjnym wzmocnieniu podłoża, przy obciążeniu siłą poziomą przyłożoną 4.2 m nad terenem (etapy badań: E, G)



Rys. 8. Wyniki badania pala nr 2 z płytą i bez płyty po iniekcyjnym wzmocnieniu podłoża, przy obciążeniu siłą poziomą przyłożoną 4.2 m nad terenem (etapy badań: E, G)



Rys. 9. Wyniki badania pala nr 1 z płytą i bez płyty po iniekcyjnym wzmocnieniu podłoża, przy obciążeniu siłą poziomą przyłożoną w poziomie terenu (etapy badań: F, H)



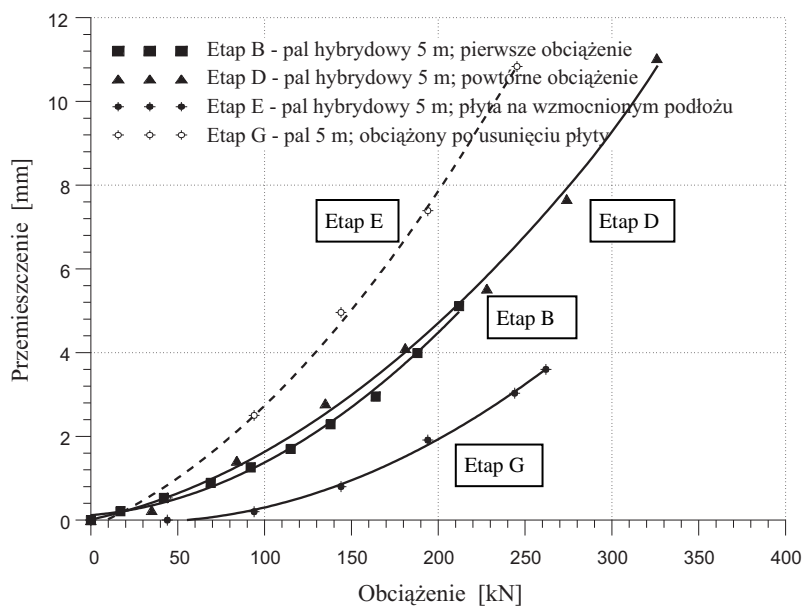
Rys. 10. Wyniki badania pala nr 2 z płytą i bez płyty po iniekcyjnym wzmocnieniu podłoża, przy obciążeniu siłą poziomą przyłożoną w poziomie terenu (etapy badań: F, H)

Porównując uzyskane wyniki z wcześniejszymi badaniami zginanych pali bez płyt (Trojnar 1997), ustalono, że zastosowanie płyty wspornikowej opartej na zagęszczonej warstwie piasku zmniejszyło poziome przemieszczenie głowicy pala hybrydowego o 30-50% przy ich pierwszym obciążeniu (etap badań **B**) i o 50-60% przy powtórnym obciążeniu (etap badań **D**). Różne wartości zmniejszenia przemieszczeń głowic pali hybrydowych, w porównaniu z głowicami pali bez płyt, są następstwem większej podatności podłoża pod płytą pala nr 2 niż pod płytą pala nr 1.

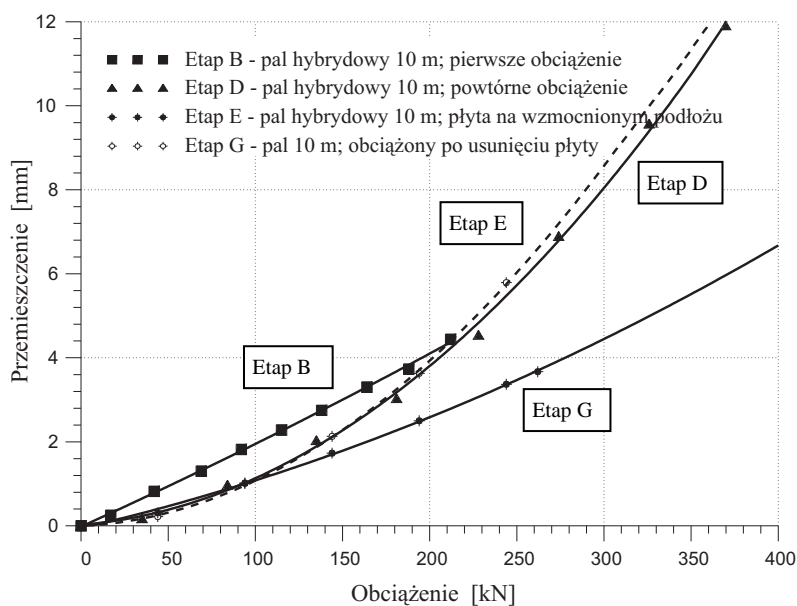
Na podstawie porównania wykresów ugięć pala nr 1 obciążonego siłą poziomą i momentem zginającym w kolejnych etapach badań: **D**, **E**, **G**, można stwierdzić, że zmniejszenie ugięć pala hybrydowego wynikające z zastosowania płyty wspornikowej opartej na dobrze zagęszczonej 50-centymetrowej warstwie piasku spetryfikowanej zaczynem cementowym wtłaczanym z niskim ciśnieniem wynosi co najmniej 50% wartości ugięcia pala bez płyty. W przypadku pala nr 2, którego płyta była oparta na słabo zagęszczonej 20-centymetrowej warstwie piasku zainiektowanej z wyższym ciśnieniem, efekt działania płyty uwidocznił się przy obciążeniu siłą, która spowodowała poziome przemieszczenie głowicy pala o 1 mm. Wtedy nastąpił obrót płyty i został zmobilizowany odpór gruntu pod płytą, w strefie zainiektowanego podłoża. Przebieg wykresu ugięć pala nr 2 na początku etapu **E** był liniowy. Po odciażeniu pali z płytami ułożonymi na wzmocnionym podłożu nie zaobserwowano znaczących wartości trwałych ugięć, inaczej niż w przypadku wcześniejszych badań pali z płytami wykonanymi na gruncie bez iniekcji (etapy **B**, **D**). Wtedy odkształcenia trwałe wyniosły około 25% wartości całkowitego ugięcia głowicy zginanego pala. Przy obciążeniu pali siłą przyłożoną w poziomie terenu, czyli gdy nie działał na pale moment zginający (etapy **C**, **F**, **H**), pomimo spetryfikowania podłoża efektywność działania płyt była mała.

3.7. Ocena wyników badań pali hybrydowych

Zbiorcze zestawienie wykresów analizowanych ugięć pali hybrydowych pokazano na rys. 11. i 12. Badanie pala nr 1 obciążonego siłą poziomą i momentem zginającym po spetryfikowaniu podłoża płyty zaczynem cementowym wtłaczonym z użyciem niskiego ciśnienia (etap badań **E**) wykazało dwukrotnie mniejsze ugięcie pala z płytą w całym zakresie obciążenia – w porównaniu z wynikami ugięcia tego pala w etapie **D**, gdy nie modyfikowano cech gruntu pod płytą. W przypadku badania tego samego pala obciążonego w etapie **F** wyłącznie siłą poziomą nie stwierdzono istotnej różnicy ugięć pala z płytą i bez płyty, pomimo wzmocnienia gruntu pod płytą. Spetryfikowanie podłoża płyty pala nr 2 z użyciem wyższego ciśnienia spowodowało scementowanie rodzimego gruntu poniżej specjalnie przygotowanej warstwy zagęszczonego piasku, ale nie wpłynęło znacząco na zwiększenie efektywności działania płyty przy obciążeniu.



Rys. 11. Ugięcia w poziomie terenu pala hybrydowego o długości 5 m (nr 1), obciążonego siłą przyłożoną 4.2 m nad terenem (etapy badań: B, D i E), oraz ugięcia tego pala po usunięciu płyty (etap G)



Rys. 12. Ugięcia w poziomie terenu pala hybrydowego o długości 10 m (nr 2), obciążonego siłą przyłożoną 4.2 m nad terenem (etapy badań: B, D i E), oraz ugięcia tego pala po usunięciu płyty (etap G)

zeniu tego pala siłą poziomą i momentem zginającym, jak w przypadku pala nr 1. Zauważalnym efektem wzmocnienia podłoża przed trzonem pala nr 2 było zwiększenie w jednakowym stopniu zarówno sztywności bocznej pala z płytą (etap badań **E**), jak i pala bez płyty (etap badań **G**). Przyczyną tego było scementowanie za pomocą iniekcji znacznej bryły rodzimego gruntu bezpośrednio przed trzonem pala. Widać to na rys. 12., gdzie wykres przemieszczeń zginanego pala nr 2 bez płyty (badanego w etapie **G** w zainiektowanym podłożu) pokrywa się z wykresem dla pala hybrydowego z etapu **D** (gdy pal współdziałał z płytą opartą na niewzmocnionym gruncie). Porównanie przebiegu obu wykresów wskazuje na małą efektywność działania płyty opartej na warstwie gruntu zainiektowanego na większą głębokość – pomimo działania dużego momentu zginającego.

4. Ocena wpływu wzmocnienia cech podłoża płyty na sztywność boczną pala hybrydowego

Za miarę efektywności zginania pala hybrydowego przyjęto współczynnik E_p , będący stosunkiem ugięć w poziomie terenu pala z płytą do ugięć w tym samym poziomie i pod takim samym obciążeniem pala bez płyty. Tak zdefiniowany współczynnik E_p charakteryzuje wpływ płyt wspornikowych na wartość bocznych przemieszczeń pali. Wartości powyżej 1.0 oznaczają, że ugięcie pala z płytą jest mniejsze niż ugięcie pala bez płyty. Współczynniki efektywności działania płyt w poszczególnych etapach obciążenia, obliczone na podstawie wyników badań, zestawiono w tab. 2. W analizie pominięto zachowanie się pali w początkowym okresie obciążenia 0-60 kN ze względu na duży rozrzut zmierzonych wtedy wartości przemieszczeń pali.

Tabela 2. Współczynniki efektywności działania płyt wspornikowych w poszczególnych etapach obciążeń badawczych pali

Pal	Etap badań	Maksymalna wartość obciążenia		Efektywność działania płyty przy maksymalnym obciążeniu pala E_p
		Q [kN]	M [kNm]	
Nr 1, długość 5 m	B	220	924	1.7
	D	400	1680	1.7
	C	480	76	1.4
	E	260	1092	3.6
	F	240	48	1.0
Nr 2, długość 10 m	B	220	924	1.3
	D	320	1344	1.3
	C	460	92	1.3
	E	240	1008	2.1
	F	400	80	0.9

Przy pierwszym obciążeniu pali z płytami wspornikowymi i bez płyt (etap badań **B**) maksymalne wartości stosunku ugięć pala bez płyty i pala z płytą były równe 1.70 i 1.30, odpowiednio dla pala nr 1 i pala nr 2. Zwiększenie wartości obciążenia pali przy powtórzonym badaniu (w etapie **D**) nie spowodowało istotnej zmiany wartości współczynników E_p . Inne wartości współczynników efektywności działania płyt obu pali wynikają przede wszystkim z gorszych cech podłoża płyty pala nr 2 w porównaniu z podłożem płyty pala nr 1. W przypadku obciążania pali siłą przyłożoną w poziomie terenu (etap badań **C**) w początkowym okresie obciążenia współczynnik efektywności był mały. Po wystąpieniu ugięcia pala w poziomie terenu ok. 2-4 mm efektywność E_p była większa niż 1.0. Maksymalna efektywność działania płyt w etapie badań **C** wynosiła: w przypadku pala nr 1 $E_p = 1.4$, a w przypadku pala nr 2 $E_p = 1.3$. Spetryfikowanie podłoża płyt zaczynem cementowym generalnie zmniejszyło ugięcia pali. Przy obciążeniu siłą przyłożoną wysoko nad terenem (etap badań **E**) efektywność działania płyt w końcowym okresie obciążenia pali wyniosła w przypadku pala nr 1: $E_p = 3.6$, a w przypadku pala nr 2: $E_p = 2.1$. Wynika stąd, że ze względu na efektywne działanie płyt korzystniejsze było lepsze zagęszczenie warstwy piasku pod płytą pala nr 1 i zastosowanie niskiego ciśnienia iniekcji (do 0.6 MPa) w celu zespolenia płyty z gruntem, aniżeli wykonanie iniekcji z wyższym ciśnieniem (do 3 MPa) w słabiej zagęszczone, o niewielkiej miąższości, podłożu płyty pala nr 2. Przy obciążaniu pali siłą przyłożoną w poziomie terenu (etap badań **F**), gdy nie działał moment zginający, wpływ petryfikacji podłoża płyt na ograniczenie ugięć pali hybrydowych był niewielki.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników badań polowych można sformułować następujące wnioski, dotyczące wpływu przygotowania podłoża płyty na zachowanie się w gruncie pala hybrydowego obciążonego poziomo:

1. W zakresie niewielkich wartości obciążeń poziomych zarówno pale hybrydowe, jak i pale bez płyt zachowują się w gruncie sprężysto – przy zwiększaniu obciążenia przyrosty ugięć pali bez płyt są nieliniowe, aż do osiągnięcia granicznej wartości przemieszczenia wynikającej z wytrzymałości gruntu na ścinanie. W przypadku badanych pali o średnicy 1.2 m bez płyt, obciążonych siłą poziomą do 500 kN i momentem zginającym do 1700 kNm, zagłębionych 5 m i 10 m w piasku drobnym, graniczna wartość ugięcia pala bez płyty była rzędu 5-7 mm.
2. Przy obciążaniu pali hybrydowych siłą i momentem zginającym ich ugięcia były znacząco mniejsze niż pali bez płyt. Wraz ze zwiększeniem momentu zginającego efektywność działania płyt rosła, a następnie stabilizowała się na poziomie wartości $E_p = 1.3-1.7$, w zależności od podatności podłoża płyty ($E = 70$ MPa lub $E = 60$ MPa). Zmniejszenie ugięć pala hybrydowego spo-

- wodowane zastosowaniem płyty wspornikowej opartej na zagęszczonym piasku można zatem bezpiecznie przyjąć rzędu 30%.
3. Efektywność zmniejszenia ugięć pala wskutek zastosowania płyty wspornikowej zależy w dużym stopniu od odkształcalności podłoża płyty – gdy jest bardziej podatne, występują większe ugięcia pala. Po spetryfikowaniu podłoża płyty zaczynem cementowym uzyskano ponad 2-3-krotne zmniejszenie ugięcia pala hybrydowego w stosunku do ugięcia pala bez płyty, zależnie od ciśnienia wtlaczania zaczynu.
 4. Zastosowanie iniekcyjnego wzmocnienia słabo zagęszczonej 20-centymetrowej warstwy piasku pod płytą z dużym ciśnieniem, do 3 MPa nie powoduje znaczącego zwiększenia efektywności działania płyty zginanego pala hybrydowego, w porównaniu z zachowaniem się pala hybrydowego z płytą opartą na 50-centymetrowej warstwie dobrze zagęszczonego piasku ($E = 70$ MPa). Efektem takiej iniekcji jest scementowanie bryły gruntu zalegającej na większej głębokości, bezpośrednio przed trzonem pala. To wywołuje jednakowy poziomy odpór gruntu zarówno w przypadku zginania pala z płytą, jak i bez płyty.
 5. Przy obciążaniu pali siłą działającą w poziomie terenu wpływ petryfikacji podłoża płyty na ograniczenie ugięcia pala hybrydowego jest niewielki, wobec małej wartości pionowego oporu gruntu pod płytą wspornikową.

Literatura

- Ashour M., Norris G. (1998): Lateral Loading of Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model. *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, vol. 124, no. 4, p. 303-315.
- Ashour M., Norris G. (2000): Modeling Lateral Soil-Pile Response on Soil-Pile Interaction. *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, vol. 126, no. 5, p. 420-427.
- Kim J.B., Singh L.P., Brungraber R.J. (1979): Pile Cap Soil Interaction From Full-Scale Lateral Tests. *Jour. of Geotech. Eng., ASCE*, vol. 105, no. 5, p. 643-653.
- Mokwa R., Duncan J. (2001): Experimental Evaluation of Lateral-Load Resistance of Pile Caps. *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, vol. 127, no. 2, p. 185-192.
- Mokwa R., Duncan J. (2003): Rotational Restraint of Pile Caps During Lateral Loading. *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, vol. 129, no. 9, p. 830-837.
- Prakash S., Kumar S. (1996): Nonlinear Lateral Pile Deflection Prediction in Sand. *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, vol. 122, no. 2, p. 130-138.
- Rollins K.M., Sparks A. (2002): Lateral Resistance of Full-Scale Pile Cap with Gravel Backfill. *Jour. of Geotech. and Geoenv. Eng., ASCE*, vol. 128, no. 9, p. 711-723.
- Sawicki A., Świdziński W. (2002): Badania doświadczalne nad deformacją piasku w zakresie poprzedzającym stan graniczny. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 2, s. 149-156.
- Trojnar K. (1997): Ocena zwiększenia sztywności bocznej pala płytą. *Mat. XI Krajowej Konf. „Mechanika gruntów i fundamentowanie”*, t. 1, Gdańsk, s. 275-280.

Trojnar K. (2009): Stateczność fundamentów hybrydowych obciążonych poziomo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.

FIELD INVESTIGATION OF THE IMPACT OF GROUND MODIFIED TO THE LATERAL STIFFNESS OF HYBRID PILE

S u m m a r y

Field investigations of increasing the lateral stiffness of the hybrid pile is a topic of this paper. Specific features of the suggested design solution of hybrid foundation consist on applying of the reinforced concrete cantilevered plate rigidity joined to the pile shaft at the ground level. The objective of this study was a comprehensive analysis of behavior of large diameter pile equipped with plate resting on modified sandy subsoil.

Złożono w redakcji w lutym 2010 r.