

Nietypowe próbne obciążenia pali prefabrykowanych

Mgr inż. Krzysztof Sahajda – Aarsleff Sp. z o.o., Warszawa

Dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, prof. PG – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

W polskiej praktyce inżynierskiej nadal rozpowszechnione jest przekonanie, że przy obliczaniu nośności pali w grupie zasadą powinno być sprawdzanie nakładania się stref naprężeń, a następnie wprowadzenie odpowiedniej redukcji nośności według zasad określonych w PN [9]. Tymczasem powszechnym w wielu krajach podejściem jest przyjmowanie, że w gruntach niespoistych nośność grupy pali równa jest co najmniej sumie nośności pali pojedynczych. Nie oznacza to, że panuje zgoda poglądów w tej kwestii. W kilku polskich pracach wysuwane były zastrzeżenia dotyczące podejścia polskiej normy [9] do projektowania grup pali. Dla przypomnienia w p. 3 tegoż dokumentu podana jest metoda obliczania nośności grupy pali obciążonej siłą pionową. Wynika z niej, że w wielu przypadkach nośność grupy będzie mniejsza niż suma nośności pali wchodzących w jej skład. Przy zastosowaniu pali wbijanych wymieniono więcej przypadków projektowych, w których nośność grupy jest przynajmniej równa sumie nośności pali pojedynczych.

W artykule przedstawiono wyniki próbnego obciążenia statycznego układu dwóch pali. Badania prowadzono na palach prefabrykowanych wbijanych. Wyniki badania omówione będą między innymi w odniesieniu do wytycznych normy [9] w zakresie wpływu obciążenia grupy pali na ich nośność w stosunku do nośności pala pojedynczego.

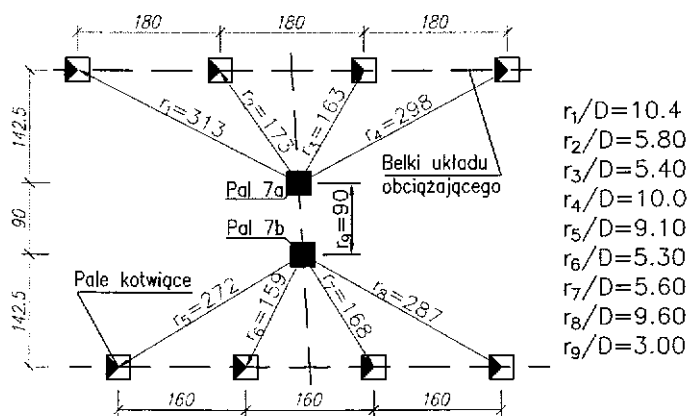
WYZNACZANIE NOŚNOŚCI OSIOWEJ GRUP PALI

W pracach [13] i [14] autor krytykuje podejście normowe, powołując się na własne doświadczenia. W tekście zawarto między innymi opinię: „(...) Proponowany w normie sposób redukcji oporu pobocznic pali przy małych rozstawach należy usunąć. Dotyczy on w zasadzie bardzo rzadko spotykanych w praktyce przypadków. Propozycja ta wywodzi się jeszcze z poprzedniej normy z roku 1969 i oparta jest na znanej w literaturze rosyjskiej metodzie Gołubkowa, odnoszącej się wyłącznie do gruntów silnie spoistych. W warunkach rzeczywistych nie obserwuje się zmniejszonej nośności grup palowych.(...)”. Ze swojej strony autorzy niniejszego artykułu mogą dodać, że dodatkowo w od-

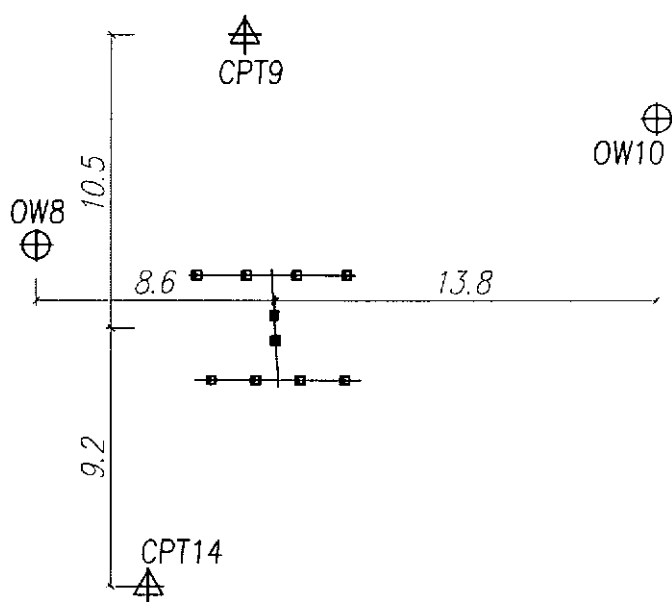
niesieniu do niektórych technologii palowania można mówić o odwrotnej tendencji niż opisana w normie. W przypadku pali prefabrykowanych wbijanych, Vibro, Fundex, Franki, a także nowszych technologii pali przemieszczeniowych wykonywanych w gruntach niespoistych średnio zagęszczonych i luźnych nośność grupy może być nie tylko większa niż suma nośności pali pojedynczych, ale dodatkowo wzrost ten będzie większy przy zmniejszeniu rozstawu pali i zwiększeniu ich liczby. Dla ścisłości należy dodać, że w p. 3.2 normy [9] zaleca się zwiększać nośność pali pracujących w grupie w przypadku części spośród wymienionych technologii palowania w gruntach niespoistych luźnych.

Z drugiej strony w monografii [15] przywołane są poglądy kilku badaczy na temat wyznaczania nośności grup palowych. W zasadzie we wszystkich spośród przytoczonych propozycji zaleca się projektowanie nośności grup palowych w gruntach niespoistych jako równych sumie pali pojedynczych. Większość spośród cytowanych w pracy badaczy jest jednak zdania, że w gruntach spoistych należy redukować nośność pali przy ich współpracy w grupie.

Z kolei w propozycji zawartej w [8] zalecane jest obliczenie nośności na dwa sposoby. Po pierwsze oblicza się nośność pala pojedynczego i na tej podstawie nośność grupy przez proste sumowanie. Po drugie grupę pali traktuje się jako pal zastępczy o wymiarach równych obrysowi grupy. Dla takiego zastępczego elementu wyznacza się nośność i porównuje z sumą nośności pali pojedynczych. Jako miarodajną przyjmuje się mniejszą z tych wartości. W metodzie „duńskiej” nośność jednostkowa nie zależy od średnicy pala i obliczana jest dla zastępczego fundamentu głębokiego z uwzględnieniem pobocznic. Jeśli chodzi o zalety, należy powiedzieć, że projektant otrzymuje narzędzie,



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań pali



Rys. 2. Lokalizacja punktów rozpoznania podłoża względem środka układu palowego

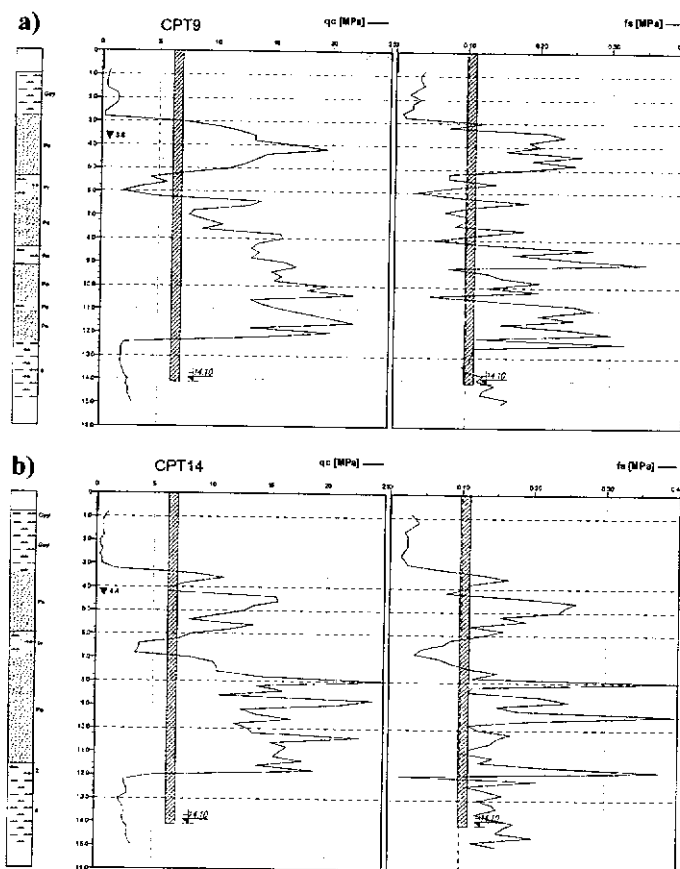
które upraszcza rozważania na temat wpływu technologii palowania, rodzaju i stanu gruntu na zachowanie grupy

W kontekście powyższych rozważań zaznacza się, że dotyczą one wyłącznie obliczeń stanu granicznego nośności. Na dzień dzisiejszy panuje duża zgodność, że osiadanie grupy pali jest w każdym przypadku równe lub większe niż osiadanie pala pojedynczego pracującego w takich samych warunkach [4, 15]. Nie należy wyciągać z tego wniosku, że istnieje jedna niezawodna metoda obliczania grup palowych według stanu granicznego użyteczności [4]. Jeśli chodzi o doświadczenia krajowe, to panuje zgodność, że osiadania grup palowych wyznaczane na podstawie propozycji [9] są zawyżone w stosunku do rzeczywiście obserwowanych [4].

BADANIE STATYCZNE NA WCISKANIE GRUPY DWÓCH PALI

W projektowaniu pali wbijanych w firmie Aarsleff od kilku lat nie stosuje się bezpośrednio wytycznych normy [9] w zakresie nośności grup palowych w gruntach spoistych o dużej wytrzymałości. Zasada ta obejmuje nie tylko wymienione w [9] grunty spoiste w stanie półzwałym, ale często także grunty twardoplastyczne. Jeśli istnieje taka możliwość, jako kryterium uwzględniania redukcji nośności w grupie przyjmowana jest wytrzymałość gruntu na ścinanie zamiast stopnia plastyczności. Ma to miejsce w przypadku, gdy wykonano sondowania statyczne CPT. W wielu przypadkach przyjmuje się nośność grupy równą co najmniej sumie nośności pali pojedynczych. W sytuacjach wątpliwych nośność grupy sprawdzana jest według propozycji [8]. Jednocześnie planowane jest przeprowadzenie serii badań mających na celu sprawdzenie wzajemnego wpływu pracy pali sąsiednich. Pierwsze z zaplanowanych badań zostało wykonane. Przeprowadzono test statyczny, polegający na obciążeniu dwóch pali jednocześnie. Dodatkowo porównawczo przeprowadzono badanie statyczne na jednym z dwóch pali, obciążając go jako element pojedynczy. Procedura badawcza w tym drugim przypadku zgodna była z wytycznymi [9]. Przy obciążeniu „grupy” zastosowano identyczne zasady w zakresie liczby oraz wielkości stopni obciążenia, przy czym osiadania mierzone były niezależnie na obu palach za pomocą dwóch zestawów, po cztery czujniki każdy. Obciążenie każdego z pali realizowano za pomocą oddzielnych siłowników, choć przy spełnieniu wymagania równości sił i równoczesności obciążenia. Badanie prowadzono w ramach inwestycji zlokalizowanej przy ul. Świderskiej w Warszawie. Pale prefabrykowane żelbetowe o przekroju 30 x 30 cm miały długość całkowitą 15 m, a ich zagłębienie w gruncie wynosiło 14,1 m. Daty wykonania badań, jak również parametry pali badanych zamieszczono w tabl. 1. Ze względu na trudności z uzyskaniem odpowiedniej liczby pali niezbędnych do zako-

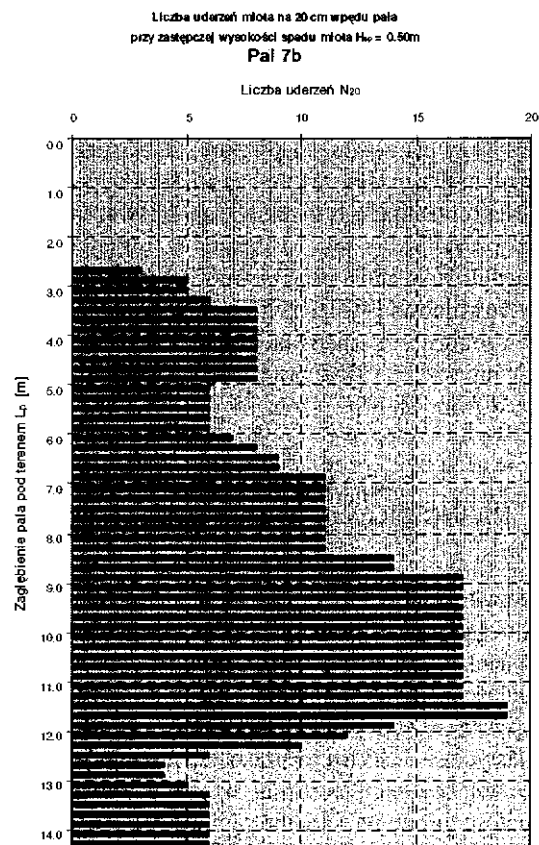
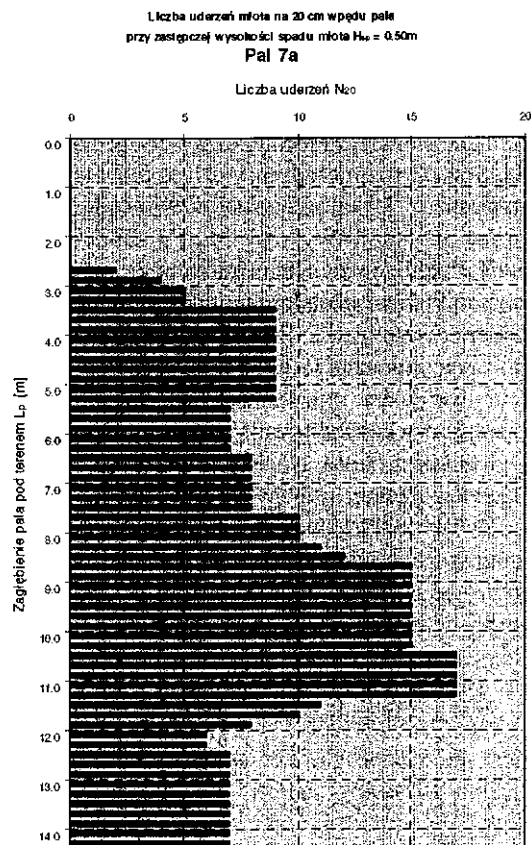
twienia stanowiska badawczego, nie udało się go zlokalizować w bezpośrednim sąsiedztwie jednego z wykonanych wcześniej sondowań statycznych. Najbliższe punkty rozpoznania podłoża znajdowały się w odległości 9-10 m. Były to dwa sondowania CPT wykonane stożkiem mechanicznym Begemanna oraz dwa wiercenia. Sposób rozmieszczenia pali kotwiących i badanych pokazano na rys. 1. Lokalizację sondowań względem badanych pali pokazano na rys. 2. Wykresy oporów sondowania, pomiędzy którymi zlokalizowano stanowisko pokazano na rys. 3. Na całym rozpatrywanym odcinku warunki gruntowe są z dobrym przybliżeniem równomierne. Dwa wiercenia OW8 i OW10, których lokalizacja widoczna jest na rys. 2 potwierdzały to założenie. Ogólnie warunki w miejscu testu można scharakteryzować następująco. Pod wierzchnią warstwą nasypów antropogenicznych do głębokości około 3 m p.p.t. występują mady rzeczne wykształcone w postaci glin pylastych i pyłów plastycznych. Następnie do około 12,5 m p.p.t. piaski rzeczne oraz pospółki średnio zagęszczone i zagęszczone, a pod nimi, do głębokości przynajmniej 15 m p.p.t. ility plicieńskie w stanie twardoplastycznym/półzwałym.



Rys. 3. Wykresy oporów sondowania w rejonie badanych pali
a) CPT9, b) CPT14

Tabl. 1. Wyniki badań pali

Nr pala	Długość pala	Rodzaj pala	Data wbicia	Rodzaj badania	Data badania	Maks. obciążenie	Nośność graniczna	Całkowite osiadanie	Nośność obliczeniowa	Osiadanie miarodajne
	L_p [m]					Q_{max} [kN]	N_g [kN]	s_g [mm]	N_s [kN]	s_s [mm]
7a	14,1	30x30	11.12.2006	DSLTL	04.01.2007	1241,0	<1241,0	42,54	737,0	4,56
7b	14,1	30x30	11.12.2006	DSLTL	04.01.2007	1236,0	1270,0	9,65	734,0	4,10
7a	14,1	30x30	11.12.2006	SSLTL	26.01.2007	1205,0	1205,0	41,04	685,0	2,26



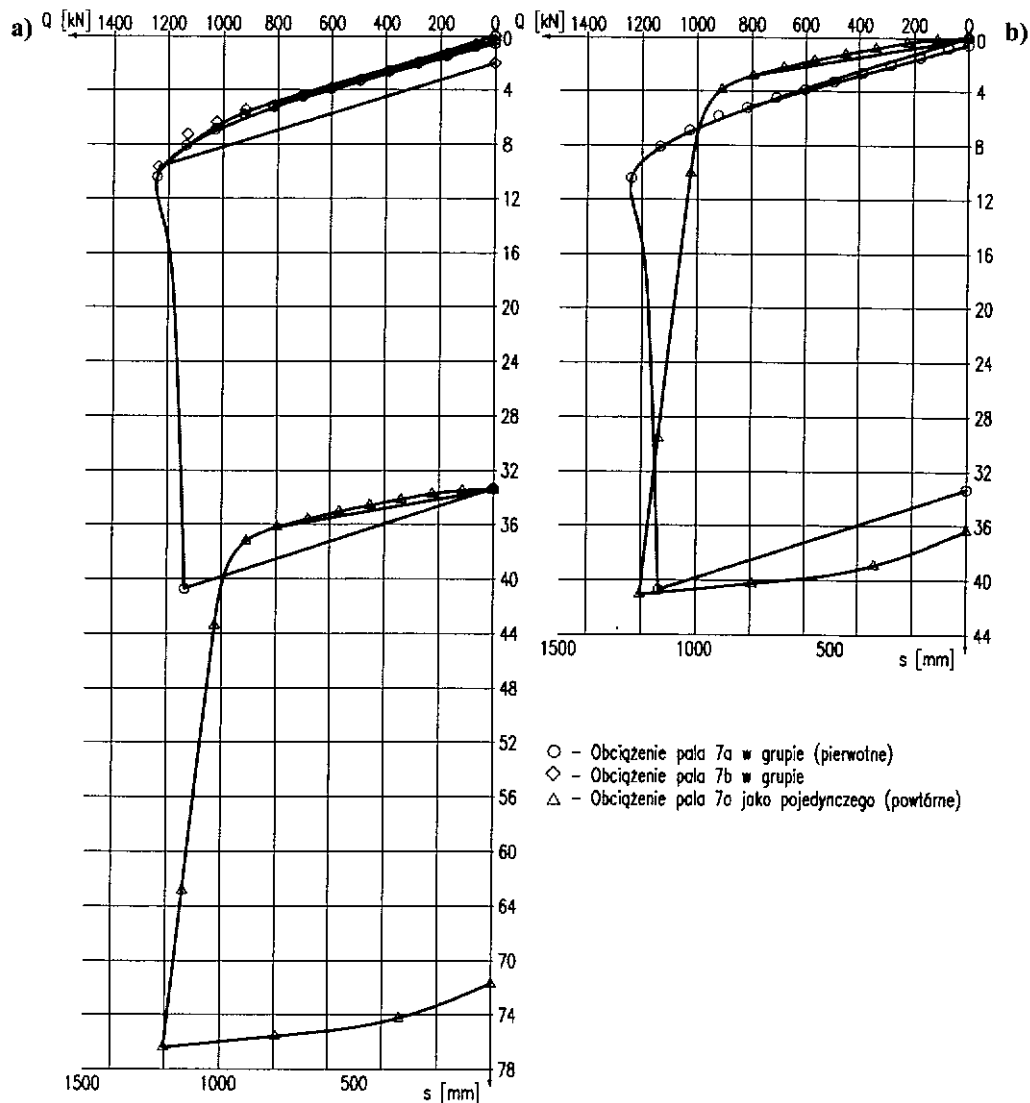
Rys. 4. Opory wbijania pali w funkcji głębokości.

Na rys. 4 przedstawiono rozkład oporów wbijania pali w postaci liczby uderzeń potrzebnych do zagłębienia pala o 20 cm. Liczbę uderzeń przeliczono na zastępczą wysokość spadu młota stałą na całej długości pograżania i równą 50 cm. Konwersji dokonano za pomocą wzoru Sørensen. Na rys. 5 przedstawiono wykresy osiadań pali w funkcji obciążenia w trakcie badania pala pojedynczego oraz grupy. Na rys. 5a pokazano wykresy przy założeniu, że położenie na wykresie punktu osiadania końcowego badania pala 7a, badanego razem z palem 7b, stanowi początek krzywej obciążenie-osiadanie pala 7a, zbadanego jako pojedynczy. Z kolei na rys. 5b przedstawiono oba wykresy wychodzące z początku układu współrzędnych, co z kolei pozwala porównać ich kształt. W tabl. 1 zestawiono nośności zinterpretowane na podstawie tych wykresów oraz obliczone wg [9], przy czym przez osiadanie miarodajne rozumie się wielkość osiadania odpowiadającego sile obliczeniowej N_r .

OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Wykresy widoczne na rys. 5a dotyczą pali 7a i 7b obciążonych jednocześnie i są do siebie bardzo podobne. Biorąc pod uwagę fakt, że odległość między oboma palami wynosiła 90 cm, wydaje się to zrozumiałe. Zasadnicza różnica pomiędzy krzywymi obciążenie-osiadanie polega na doprowadzeniu pala nr 7a do utraty nośności. Z tabl. 1 widać, że został on obciążony siłą nieco większą niż pal 7b. Nie oznacza to, że tę właśnie wartość siły należy utożsamiać z nośnością graniczną pala. Najprawdopodobniej jest ona nieco mniejsza. W zasadzie nie ma w tej chwili możliwości określenia, przy jakim obciążeniu nastąpiłoby wciśnięcie pala 7b. Ze względu na utratę nośności przez pal

7a, właśnie on wybrany został do dalszego próbnego obciążenia jako pal pojedynczy. Na podstawie wykresu osiadania pala 7a przy obciążeniu go razem z palem 7b można postawić hipotezę, że przynajmniej część gruntów występujących wzdłuż pala ma charakterystykę ścinania z wytrzymałością szczytową i rezydualną. Zwraca się uwagę, że do zmobilizowania granicznego oporu poboczniczy konieczne są osiadania rzędu zaledwie 1% wymiaru poprzecznego pala D , natomiast pod podstawą osiadania rzędu (5-10)% D . Porównując te wielkości z wartością osiadania pala, przy której najprawdopodobniej wystąpił „pik” wykresu, wytrzymałość rezydualna ujawniła się w tym przypadku w warstwie zalegającej pod podstawami pali iłu w stanie twaroplastycznym i półzwartym. Z analizy wykresów dla pala 7a przy obu sposobach obciążenia można zakładać, że nośności graniczne były w każdym z tych przypadków zbliżone. Przy tym pal obciążony pojedynczo wykazywałby pozornie nieco niższą nośność graniczną, odpowiednio 1205 kN w porównaniu z 1240 kN przy palu obciążonym w grupie. W tym miejscu konieczne są jednak dwie uwagi. Po pierwsze pomiędzy obu badaniami minęło 22 dni. Nie jest oczywiste, jaki czas od chwili wbicia pali w grunt konieczny jest do redystrybucji obciążeń, rozproszenia ciśnienia porowych i odbudowy struktury iłu zalegającego w poziomie podstaw. W tej sytuacji niższa nośność graniczna mogłaby być spowodowana wystąpieniem wspomnianych zjawisk w niepełnym stopniu. W przypadku opisanych badań nie ma możliwości sprawdzenia czasu niezbędnego do odbudowy nośności pala, a co za tym idzie – weryfikacji tej hipotezy. Konieczne byłoby obciążenie pala 7a jako pojedynczego po innym, tym razem dłuższym niż 22 dni czasie i porównanie obu krzywych. Drugim zastrzeżeniem przy porównaniu obu nośności granicznych jest fakt, że przy sile 1240 kN w trakcie badania grupy



Rys. 5. Wykresy osiadania pali w funkcji obciążenia

pali nie uzyskano stabilizacji osiadań pala 7a. Była to wartość obciążenia określona w zaleceniach do próbnych obciążeń. Po osiągnięciu tej siły w trakcie badań stwierdzono brak stabilizacji i zmniejszono obciążenie do niższego stopnia. Wobec tego zarówno uzyskane w badaniu obciążenie 1240 kN nie powinno być interpretowane jako nośność graniczna pala, jak i wartość siły wynosząca 1135 kN nie może być jednoznacznie określona jako nośność rezydualna. Niemniej, na podstawie bardzo dużego podobieństwa krzywych pali 7a i 7b, przy ich jednoczesnym obciążeniu oraz ich nieznaczącej odległości, z dużym prawdopodobieństwem można zakładać, że nośność graniczna bliska jest podanej sile maksymalnej, a nośność rezydualna mieści się w przedziale pomiędzy siłą 1135 kN a nośnością graniczną. Istnieje oczywiście możliwość, że skoro w wyniku wbijania pali struktura łoża została trwale naruszona i nie wykazuje on charakterystyki ścinania właściwej dla tego rodzaju gruntów, w takim wypadku „pik” w charakterystyce obciążenie-osiadanie pala 7a wynikałby wyłącznie ze sposobu prowadzenia badania i nie byłoby mowy o nośności granicznej i rezydualnej pala.

Kształt krzywych obciążenie-osiadanie pochodzących z obu sposobów badania pala 7a pokazuje, że punkt załamania charakterystyki pala obciążanego jako pojedynczy wystąpił przy

mniejszej wartości siły niż w przypadku jednoczesnego obciążenia obu pali. W związku z tym charakterystykę pala pracującego w grupie można określić jako bezpieczniejszą dla konstrukcji i pomimo podobnej nośności granicznej dopuścić nieco większe obciążenie obliczeniowe. Nie jest jednak pewne, na ile wcześniejsze załamanie krzywej wynika z faktu gorszej pracy pala pojedynczego w gruncie w porównaniu z grupą, a na ile ponownie mamy do czynienia z nieodbudowaną strukturą łoża. Mało prawdopodobne jest, aby tylko ten drugi czynnik grał tutaj decydującą rolę. Wnioskować o tym można z dużej różnicy sił odpowiadających załamaniu wykresu. W przypadku pala pojedynczego jest to wartość około 900 kN, w drugim przypadku prawie 1200 kN. W ramach tej samej inwestycji wykonano także serię badań dynamicznych pali z interpretacją wyników metodami CASE i CAPWAP. Dwa spośród badanych w ten sposób pali zagłębione były stopami w tę samą warstwę łoża, co opisane wyżej pale. Uzyskane nośności graniczne podstaw mieściły się w obu przypadkach w granicach 350-400 kN. W odniesieniu do wątpliwości poruszonych poprzednio oznaczałoby to, że odbudowa nośności gruntu w rejonie stopy pala 7a w okresie pomiędzy dwoma jego obciążeniami nastąpiła w bardzo małym stopniu. Jest to też o tyle mało prawdopodobne, że nośność gra-

niczna z badania statycznego pala 7a pojedynczego jest bardzo zbliżona do jego nośności jako pala w grupie, co wskazywałoby, że struktura gruntu w zasadzie uległa odbudowaniu. Pomimo tych uwag, nie sposób całkowicie wykluczyć wpływu wcześniejszego badania na załamanie krzywej w badaniu późniejszym.

Kolejną widoczną z porównania krzywych cechą, zgodną zresztą z ogólnym poglądem panującym na ten temat, jest bardziej stromy charakter krzywej pala obciążonego w grupie w stosunku do pala pojedynczego i wynikające z tego większe jego osiadanie przy tej samej sile. Znow nałożyć się mogą w tym miejscu dwa wpływy. Po pierwsze oczywisty czynnik wzajemnego wpływu na siebie obu badanych pali. Drugim elementem może być fakt, że obciążenie pala pojedynczego nastąpiło później, a tym samym jego współpraca z gruntem odbywała się w zakresie wtórnych modułów odkształcenia, większych od modułów pierwotnych. Hipoteza ta jest znacznie bardziej prawdopodobna w odniesieniu do rzecznych piasków, zalegających wzdłuż poboczniczy pali. Jeśli chodzi o plioceńskie ility na obszarze Warszawy, to są one silnie prekonsolidowane przez lodowiec i najprawdopodobniej praca pala już przy pierwszym obciążeniu odbywała się w zakresie wtórnych modułów odkształcenia, oczywiście z pewnym zastrzeżeniem dotyczącym zniszczenia struktury gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie pala w trakcie jego wbijania i wynikającym z tego zniszczeniu efektów naturalnej prekonsolidacji.

PODSUMOWANIE

Przedstawiona w polskiej normie [9] zasada wyznaczania nośności pali w grupie jest dyskusyjna. Wielu zagranicznych badaczy jest zdania, że w gruntach niespoistych nośność grupy jest równa sumie nośności pali pojedynczych. Większość spośród nich uważa przy tym, że w przypadku gruntów spoistych zasadne jest uwzględnianie wpływu pali sąsiadujących. W pracy przedstawiono i omówiono wyniki próbnego obciążenia statycznego grupy dwóch pali. Pale obciążone były w dwóch etapach. W pierwszym badano zachowanie się dwóch pali wciskanych jednocześnie. Identyczne wartości obciążeń przykładano do głowic obu pali. Po około trzech tygodniach przeprowadzono badanie statyczne na wciskanie przy takich samych wartościach sił jednego z dwóch badanych uprzednio pali. W trakcie interpretacji wyników doświadczenia nie udało się w sposób jednoznaczny oddzielić wpływu różnych czynników, nad którymi w trakcie obciążenia nie było kontroli. Dotyczyło to szczególnie naruszenia struktury gruntu spoistego w pierwszym etapie badań. Mimo to można stwierdzić, że każdy z pali jednocześnie obciążonych ma bardziej gładką charakterystykę, przy czym w zakresie obciążenia odpowiadającego normalnej pracy pala – mniejsze osiadania wykazuje pal pojedynczy. Jest to zgodne z powszechnie panującym poglądem na temat wpływu grup na osiadania pali. Załamanie charakterystyki obciążenie – osiadanie w przypadku pali w grupie nastąpiło przy większej wartości siły niż dla pala pojedynczego. Z zastrzeżeniem niepewności odnośnie do wpływu na wyniki badań niekontrolowanych czynników można stwierdzić, że z inżynierskiego punktu widzenia dwa pale pracowały w danych warunkach gruntowych lepiej niż pal pojedynczy.

Przedstawione wyniki nie mogą być podstawą do podsumowania wniosków ogólnych nawet dla danego układu warstw gruntowych. Powodów jest kilka. Po pierwsze wykonano zaledwie jedno badanie, po drugie rozmiar grupy pali był niewielki. Trudno też stwierdzić, w jakim stopniu różnice kształtu krzywych obciążenie – osiadanie przy palu pojedynczym i przy grupie wynikają z ich wzajemnego oddziaływania, a na ile są wynikiem naruszenia struktury gruntu w trakcie pierwszego w kolejności badania. Dodatkowo badania prowadzone były na palach wbijanych i – ze względu na specyfikę ich pracy – powinny być rozpatrywane wyłącznie w odniesieniu do tej technologii.

LITERATURA

1. Brzozowski T., Blockus M.: Warunki prawidłowego wykonania badań dynamicznych pali. Materiały z seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska PG, Gdańsk 2004.
2. Brzozowski T., Blockus M.: Warunki prawidłowego wykonania badań dynamicznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6/2004.
3. Gwizdała K.: Nowe techniki fundamentowania. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3-4/2003.
4. Gwizdała K., Dyka I.: Osiadanie pali i fundamentów palowych. Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”. Gdańsk, 25 czerwca 2004.
5. Gwizdała K., Krasieński A., Brzozowski T.: Analiza sztywności pali w warunkach gruntowych Portu Północnego w Gdańsku. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2005.
6. Gwizdała K.: Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Wodne nr 41, Gdańsk 1996.
7. Gwizdała K., Stępczński M.: Obliczanie nośności pali na podstawie wyników badań sondą CPT. Materiały XLIV Konferencji Naukowej. Tom VII Geotechnika, Krynica 98.
8. Hansen Bent. Advanced theoretical soil mechanics. Danish Geotechnical Society. Januar 2001.
9. PN-83/B-02482 Fundamenty Budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
10. PN-81/B-03020 Grunty Budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
11. Sikora Z.: Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
12. Słabek A., Tejchman A.: Porównanie pomiarów i obliczeń osiadania fundamentu na palach obiektu Gdańskiego Terminalu Gazowego. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2000.
13. Tejchman A.: Błędy występujące w projektowaniu i wykonawstwie pali – cz. I. Materiały z seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska PG, Gdańsk 2004.
14. Tejchman A.: O nowej normie palowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3-4/2003.
15. Tejchman A., Gwizdała K., Dyka I. i inni: Nośność i osiadanie fundamentów palowych. Politechnika Gdańska, Gdańsk, kwiecień 2001.
16. Zadroga B.: Czy i jak zmodyfikować Polską Normę Palową PN-83/B-02482. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2000.