

*Jarosław Rybak**

METODY OBLICZANIA NOŚNOŚCI GRANICZNEJ PALI FUNDAMENTOWYCH

1. Wprowadzenie

Dynamicznie rozwijający się rynek budowlany oraz kurcząca się oferta atrakcyjnych terenów pod zabudowę sprawia, że nowe inwestycje otwierane są na terenach zdegradowanych i często uznawanych wcześniej za nienadające się do zabudowy. Powoduje to znaczący rozwój rynku robót geotechnicznych, umożliwiających zagospodarowanie takich działek. W kraju obecnie stosowane są już praktycznie wszystkie nowoczesne technologie geotechniczne palowania i wzmocnienia podłoża oraz zabezpieczenia głębokich wykopów. Odrębnym problemem pozostaje przystawalność obowiązujących norm dotyczących projektowania, wykonywania i odbioru robót geotechnicznych do metod i technologii stosowanych w praktyce. Dobrym przykładem są tutaj metody kontroli nośności pali fundamentowych.

Podstawowym badaniem nośności jest próbne obciążenie statyczne. Zgodnie z normą PN-83/B-02482 wykonuje się 2 badania na pierwsze 100 pali i po jednym na każde kolejne rozpoczęte 100 pali. W praktyce bada się zatem mniej niż 2% pali wykonywanych w ramach kontraktu. Badania te, niezależnie od ich wątpliwej „losowości” (wykonawca palowania wie zazwyczaj, które pale będą próbnie obciążane), są niestety mocno wrażliwe na uchybienia w trakcie ich prowadzenia i nie zawsze dają wyniki pozwalające na właściwą interpretację. Rozwiązaniem zapewniającym większą niezawodność kontroli nośności i jakości pali fundamentowych jest zastosowanie badań dynamicznych nośności. Badania takie wymagają jednak odpowiedniej kalibracji wyników. W pracy przedstawiono wstępne rezultaty obliczeń i analiz mających na celu zaproponowanie procedury wykonywania i interpretacji badań statycznych tak, aby mogły one stanowić podstawę do wyprowadzenia zasad kalibracji badań dynamicznych.

* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska, Wrocław

2. Próbne obciążenia statyczne

Próbne obciążenia statyczne wykonuje się zazwyczaj metodą belki odwróconej z wykorzystaniem sąsiednich pali jako pali kotwiących lub z zastosowaniem balastu (z płyt drogowych lub pali prefabrykowanych przeznaczonych do późniejszego wbicia). Metoda interpretacji statycznych badań nośności pali fundamentowych opisana jest szczegółowo w normie PN-83/B-02482. Norma stawia wymóg sporządzenia „Projektu próbnego obciążenia”, który ma być integralną częścią projektu posadowienia na palach. Kluczowym wymogiem poprawnego przeprowadzenia badania jest uzyskanie stabilizacji osiadań w kolejnych stopniach obciążenia realizowanego siłownikami hydraulicznymi (lub rzadziej — dokładanym balastem). Przykłady stanowisk do badań nośności przedstawiają rysunki 1 i 2.

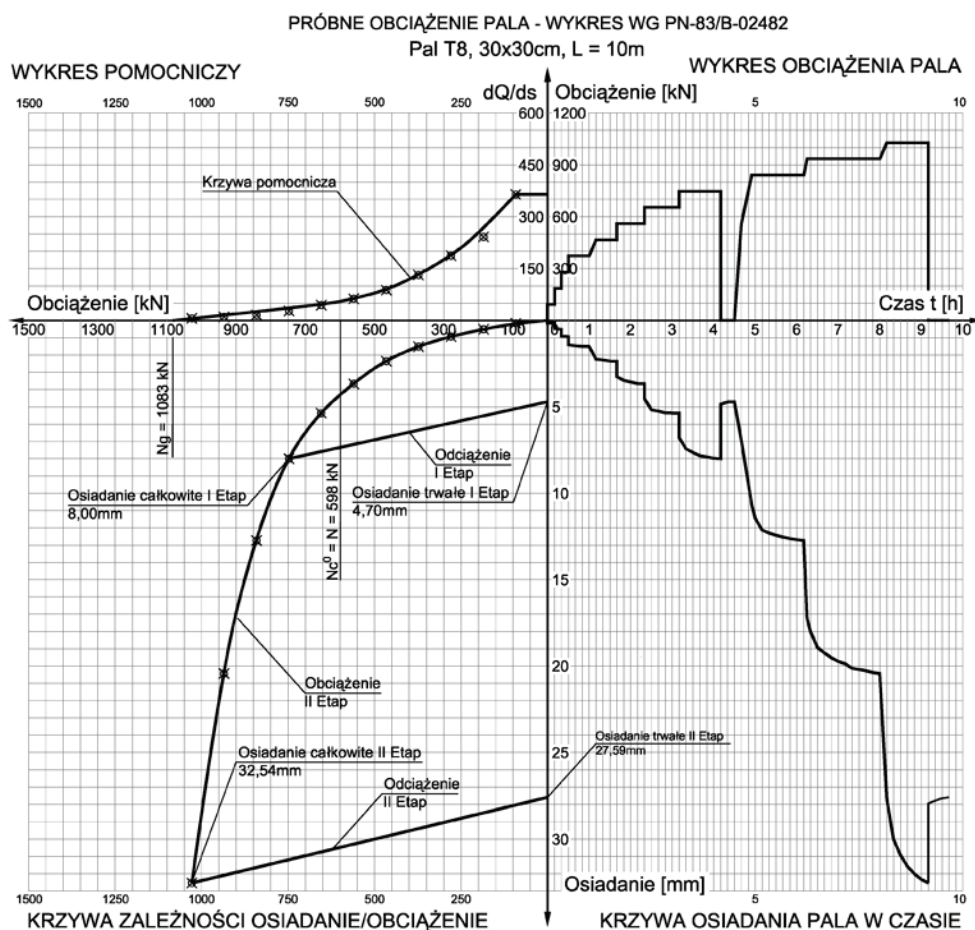


Rys. 1. Stanowisko do badań nośności pali jet-grouting



Rys. 2. Stanowisko do badań nośności pali prefabrykowanych. Widoczny balast z pali

Podstawą analizy jest uzyskana w trakcie badań polowych zależność obciążenie — osiadanie, tj. $s(Q)$, wykreślenie na tej podstawie krzywej dQ/ds i odnalezienie na niej charakterystycznych punktów pozwalających na wyznaczenie obliczeniowej nośności pała $k \cdot N_c^0$. Przykład interpretacji: wyznaczenia N_c^0 oraz N_{gr} pokazano na rysunku 3. Jest rzeczą istotną, że w badaniu statycznym zakłada się wcześniej jego zakres, ustalając maksymalne obciążenie pola w czasie testu na ok. $1,5(N_t + T_n)$, gdzie N_t jest nośnością pała wyznaczoną ze wzorów statycznych, a T_n oszacowaną (obliczoną) wielkością tarcia ujemnego, jakie może się z czasem zmobilizować na pobocznicy pała. Taki sposób przeprowadzenia badania weryfikuje poprawność założeń projektowych i obliczeń statycznych w odniesieniu do badanego pała, nie daje jednak zazwyczaj precyzyjnej informacji o nośności granicznej pała rozumianej jako obciążenie, przy którym nie uzyskuje się stabilizacji narastających osiadań.



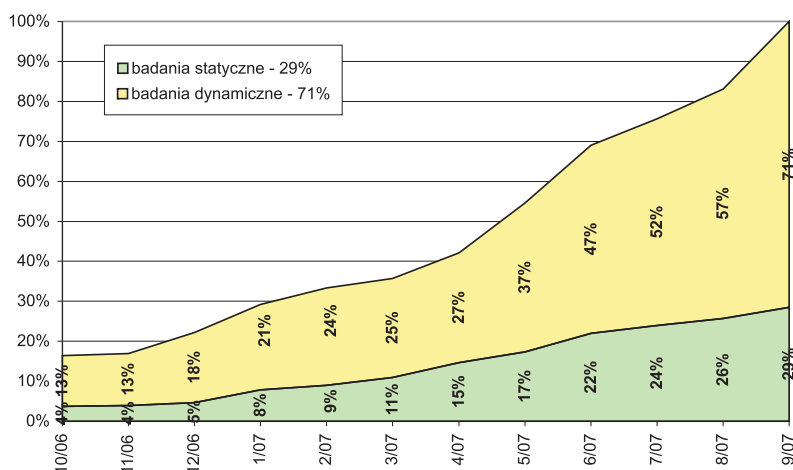
Rys. 3. Przykład interpretacji wyników próbnego obciążenia statycznego

Również ekstrapolacja wyników takiego badania na pozostałe pale, w warunkach skomplikowanych warunków geotechnicznych, a takie zazwyczaj występują na budowach, gdzie wykonywane jest posadowienie pośrednie, jest wysoce problematyczna.

Odrębnym mankamentem statycznych badań nośności jest czas potrzebny w trakcie badań na uzyskanie wymaganej stabilizacji osiadań. Dla pali pograżonych w gruntach spolistych czas oczekiwania przy kolejnych stopniach obciążenia może przekraczać godzinę, a czas całego badania kilkanaście godzin. Z uwagi na konieczność wyeliminowania wpływów dynamicznych na podłoże i układ obciążający wyklucza się w zasadzie w tym czasie prowadzenie robót budowlanych (w szczególności robót palowych) w bezpośrednim sąsiedztwie stanowiska badawczego. Jeszcze inne problemy związane są z koniecznością przestrzegania ustalonego w normie czasu, jaki musi upłynąć od wykonania pala do jego obciążenia.

3. Próbné obciążenia dynamiczne pali fundamentowych

W warunkach krajowych badania dynamiczne wykonywane są od 1996 roku. Szczególnie często wykonywane są dla prefabrykowanych pali wbijanych, od 2004 roku praktycznie w ramach każdego kontraktu palowego realizowanego w tej technologii. W latach 2005–2007 udział badań dynamicznych w ogólnej liczbie wykonywanych badań pali prefabrykowanych wzrósł z 57 do 71%. Dominujący obecnie udział badań dynamicznych oraz ogólnie badań nośności pali przedstawia wykres na rysunku 4.



Rys. 4. Skumulowany udział badań statycznych i dynamicznych w kolejnych miesiącach

W przypadku pali wbijanych technologia pozwala na wykorzystanie młota palownicy jako urządzenia generującego falę sprężystą w palu. Przykład badania pala prefabrykowanego pokazuje rysunek 5.

W przypadku innych technologii palowych konieczne jest wykonywanie specjalnych stelaży ze spadającą masą, których transport i montaż na palu stanowią dodatkowe utrudnienie.

Sprzęt do badań dynamicznych (poza urządzeniem uderzającym) mieści się w walizce (rys. 6). Montaż czujników i samo badanie (rys. 5) trwa ok. pół godziny i, co ważne, poza samym momentem rejestracji nie jest wymagana „cisza” na budowie.



Rys. 5. Badanie dynamiczne nośności



Rys. 6. Sprzęt do badań dynamicznych pali

Najważniejszymi zaletami badań dynamicznych są: swobodna możliwość wyboru pali poddanych badaniom na każdym etapie realizacji robót palowych oraz możliwość powtórnego obciążania pali wcześniej przebadanych, co pozwala np. na ocenę przyrostu nośności pala w czasie.

4. Próbné obciążenie statyczne jako badanie referencyjne

Dopuszczenie badań dynamicznych jako testu nośności wymaga wiarygodnej korelacji między wyznaczoną nośnością graniczną a nośnością obliczeniową, do której można by odnieść obliczeniowe obciążenie pala. Wprowadzona w 2005 roku norma PN-EN 12699 [3] dopuszcza test dynamiczny do badania nośności, lecz nie podaje niezbędnych korelacji, pozwalających na wyznaczenie obliczeniowej nośności pala. Korelacja musi być zatem każdorazowo ustalana na budowie na bazie testu referencyjnego, jakim jest próbné obciążenie statyczne. W warunkach polskich współczynnik pozwalający na przeliczenie nośności granicznej na obliczeniową zawiera się zazwyczaj w przedziale 1,6÷2,5.

5. Metody szacowania nośności granicznej w badaniu statycznym

Gdy w czasie próbnego obciążenia statycznego nie osiąga się nośności granicznej, a dalsze zwiększanie obciążenia jest niemożliwe, np. ze względu na niedostateczną nośność układu obciążającego lub pali kotwiących, zachodzi konieczność ekstrapolowania dalszego przebiegu badania na podstawie posiadanych danych. Przyjmuje się zazwyczaj, że zależność obciążenie — osiadanie przed osiągnięciem nośności granicznej ma postać wielomianu lub funkcji hiperbolicznej. W literaturze można znaleźć szereg metod interpretacji badania nośności, lecz tylko niektóre pozwalają na oszacowanie nośności granicznej.

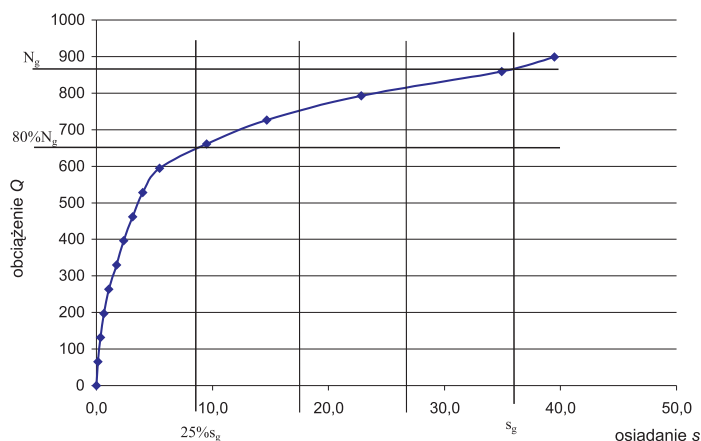
5.1. Metoda normowa

Zaproponowana w Polskiej Normie [2] metoda polega na przedłużeniu zakładanej liniowej zależności dQ/ds do przecięcia z osią $dQ/ds = 0$, co oznacza nieskończony przyrost osiadania bez przyrostu obciążenia (rys. 3). Metoda ta jest „wystarczająco dokładna”, lecz czasem nie jest skuteczna. Przypadek taki ma miejsce, gdy przeprowadzony zakres próbnego obciążenia nie wychodzi poza zakres sprężystej pracy pala w gruncie i wtedy dQ/ds jest funkcją stałą.

5.2. Metody Brinch Hansena

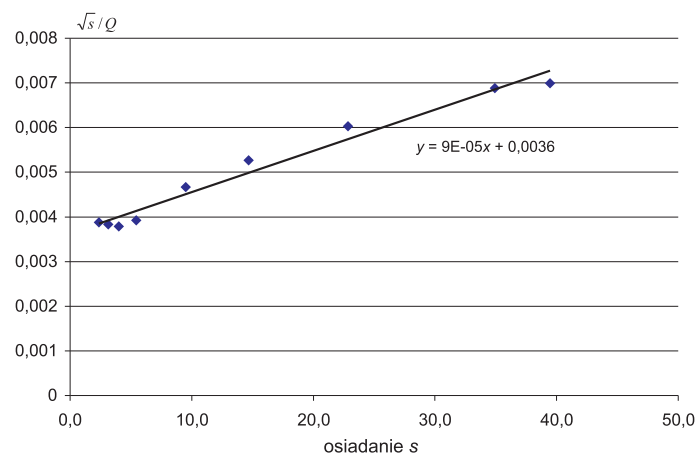
Metody zaproponowane przez Brinch Hansena [1] ze szczególnym wskazaniem na pale w gruntach spoistych, podobnie jak metoda normowa, wymagają przeprowadzenia badania statycznego w zakresie wykraczającym poza pracę sprężystą.

- Metoda 90%. Za nośność graniczną rozumie się takie obciążenie, dla którego osiadanie przekroczyło dwukrotnie wartość pomierzoną przy 90% tego obciążenia.
- Metoda 80%. Za nośność graniczną rozumie się takie obciążenie, dla którego osiadanie przekroczyło czterokrotnie wartość pomierzoną przy 80% tego obciążenia (rys. 7).



Rys. 7. Wyznaczenie nośności granicznej według Brinch Hansena (metoda 80%)

Transformując zależność osiadanie — obciążenie ($s - Q$) do układu współrzędnych: osiadanie s — odcięte i \sqrt{s}/Q — rzędne (rys. 8). Dla ostatnich punktów przeprowadzonego badania uzyskuje się (przez aproksymację) zależność liniową w postaci $\sqrt{s}/Q = A \cdot s + B$. Można łatwo obliczyć, że graniczna nośność pała $N_g = 1/(2 \cdot \sqrt{A \cdot B})$, a towarzyszące mu osiadanie wynosi $s_g = B/A$.



Rys. 8. Obliczenie nośności granicznej według Brinch Hansena (metoda 80%)

W przykładzie na rysunku 8 otrzymujemy z aproksymacji prostą: $A = 0,00009$ i $B = 0,0036$. Możemy zatem obliczyć $N_g = 878$ kN. Osiadanie s_g odpowiadające nośności granicznej szacuje się na ok. 40 mm, co jest zgodne z przebiegiem próbnego obciążenia na rysunku 7. Obie metody Brinch Hansena definiują nośność graniczną jako punkt, po przekroczeniu którego następuje nieskrępowany przyrost osiadań.

6. Przeprowadzone obliczenia

Dla zbadania przydatności przedstawionych wcześniej metod wyznaczania nośności granicznej na podstawie próbnego obciążenia statycznego, dla pali wykonywanych w różnych technologiach i warunkach geotechnicznych, przeprowadzono szereg obliczeń. Aby móc odnieść uzyskane wyniki do realnych danych, wykorzystano te badania statyczne (z archiwum autora i archiwum AARSLEFF Sp. z o.o. [4]), w których osiągnięto nośność graniczną. Przykładowe wyniki badań polowych (P.O.S. — próbne obciążenie statyczne) i obliczeń nośności granicznej pali zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Przykładowe wyniki badań (P.O.S.) i obliczeń nośności granicznej pali

Technologia	Podłoże	Nośność graniczna			
		P.O.S.	wg PN	BH 90%	BH 80%
CFA	piaski	>1196	1240	1192	1371
CFA	gliny	>1867	1920	1705	1961
CFA	gliny	>857	890	794	913
prefabrykowany	gliny	1681	1615	1500	1725
prefabrykowany	gliny	1120	1040	1051	1209
prefabrykowany	gliny	1431	1435	1255	1443
prefabrykowany	gliny	1323÷1513	1450	1287	1489
prefabrykowany	żwir/pyły	660	615	591	680
prefabrykowany	żwir/pyły	555	528	499	573
prefabrykowany	żwir/pyły	431	426	382	440
prefabrykowany	żwir/pyły	634÷687	640	599	689
prefabrykowany	piaski	1529÷1699	1440	1375	1581
prefabrykowany	żwir/pyły	>2792	2780	2806	3227
prefabrykowany	gliny	>1921	1975	1821	2094
prefabrykowany	gliny	>2115	2184	1984	2282

Bez względu na technologię palową i rodzaj podłoża można zaobserwować dobrą zgodność szacowania nośności granicznej z uzyskaną w badaniu statycznym. Najlepsze oszacowanie daje metoda 80%. Paradoksalnie, ta metoda, dająca najwyższe oszacowanie nośności granicznej, prowadzi zarazem do bezpieczniejszego projektowania, bowiem współczynnik bezpieczeństwa opisujący stosunek nośności granicznej do nośności obliczeniowej jest wtedy większy.

7. Podsumowanie i wnioski

Należy nadmienić, że wprowadzenie próbnych obciążeń dynamicznych znacząco zwiększyło niezawodność realizowanych robót palowych. Dla przykładu: W latach 2005–2007 liczba przebadanych pali prefabrykowanych przekraczała już średnio 2,5 na każde 1000 mb wbitych pali. Dla porównania wymagania normowe nakazują przebadanie niewiele ponad 1 pala na każde 100 (co przy średniej długości przekraczającej 10 m daje wskaźnik ok. 1,0 na każde 1000 mb).

Ważną obserwacją jest fakt, że szerokie wprowadzenie badań dynamicznych pali prefabrykowanych nie ograniczyło wcale liczby wykonywanych badań statycznych, zmieniła się jednak ich funkcja. Nie stanowią już podstawowego badania nośności, mającego na celu weryfikację projektu, a raczej stanowią test referencyjny dla większej liczby badań dynamicznych. Z tego powodu należy tak projektować badania statyczne, by w ich wyniku wyznaczyć nośność graniczną pala lub, co najmniej, uzyskać dane do wyznaczenia nośności granicznej przez ekstrapolację. Jeżeli nie osiąga się w przebiegu próbnego obciążenia znaczących przyrostów osiadania, a układ obciążający i konstrukcja stanowiska badawczego pozwalają na kontynuowanie obciążenia poza zaprojektowany w projekcie próbnego obciążenia zakres, to inżynier prowadzący próbne obciążenie powinien podjąć decyzję o kontynuacji badań (zwiększeniu obciążenia w kolejnych krokach).

Przedstawiona w pracy metoda 80%, po jej przetestowaniu na większej liczbie badań, może być skutecznym narzędziem w obliczaniu nośności granicznej pali na podstawie badań statycznych.

Problemami, jakie należy rozwiązać, pozostają: określenie liczby obserwacji $Q - s$, jakie należy brać do obliczeń, i ewentualne przyporządkowanie wag tym obserwacjom. Wydaje się, że cenną inicjatywą byłaby budowa bazy danych wyników próbnych obciążeń statycznych, przynajmniej tych, których dysponentami są ośrodki akademickie. Taka baza pozwoliłaby na podanie lokalnych korelacji (współczynnika bezpieczeństwa) dla różnych rodzajów gruntu i technologii palowych.

Autor składa szczególne podziękowania firmie AARSLEFF Sp. z o.o. za udostępnienie dokumentacji fotograficznej i informacji dotyczących realizowanych badań nośności pali.

LITERATURA

- [1] Brinch Hansen J. Discussion, Hyperbolic Stress-Strain response, Cohesive soil. Journal of soil mechanics and foundation engineering division, ASCE, 1963, 89 (241–242)
- [2] PN-83/B-02482: Fundamenty budowli. Nośność pali i fundamentów pałowych
- [3] PN-EN 12699: 2003. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe
- [4] *Tkaczyński G.*: Wyniki i opracowania statystyczne badań nośności pali z archiwum AASLEFF Sp. z o.o. (komunikacja prywatna)