

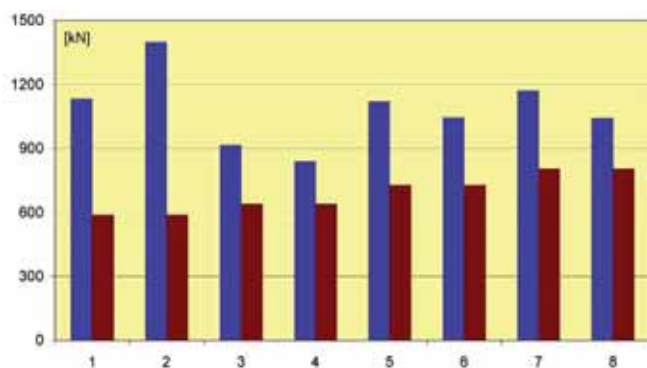
# Badania nośności pali prefabrykowanych

Leszek Cichy<sup>1</sup>, Jarosław Rybak<sup>2</sup>, Grzegorz Tkaczyński<sup>3</sup>

## Wprowadzenie

Nieodłącznym elementem projektowania fundamentów palowych są badania kontrolne nośności pali. Badania te wykonuje się metodami statycznymi i dynamicznymi.

Artykuł powstał na bazie doświadczeń zdobytych przez autorów podczas realizacji badań nośności żelbetowych pali wbijanych o kwadratowy przekroju poprzecznym (o wymiarach 25 x 25 cm, 30 x 30 cm i 40 x 40 cm). Obserwacje oparto na wynikach ok. 500 próbnych obciążeń statycznych i ponad 1000 dynamicznych testów nośności, wykonywanych w zróżnicowanych warunkach geotechnicznych w ramach projektów realizowanych przez firmę Aarsleff [7]. Liczba zbadanych pali jest tu bardzo istotna ze względu na potrzebę uogólniania wniosków. Grunty w podłożu mają bardzo zróżnicowane parametry, co wynika zarówno z urozmaiconej historii geologicznej, jak i dodatkowej modyfikacji parametrów w trakcie wbijania pali. Pale pograżane w grunty o zbliżonych wartościach parametrów, wykazują często różne nośności, w zależności od odległości między nimi. Nie są również odosobnione przypadki, gdy nośności pali zmieniają się w obrębie jednego fundamentu.



Ryc. 1. Wyniki badań nośności pali na tle wartości obliczonych według PN

Zasady projektowania i realizacji fundamentów palowych w Polsce definiuje norma PN-83/B-02482 [5]. Już pobieżne porównanie, zaprezentowane na rycinie 1, nośności pali wyinterpretowanych z wyników próbnych obciążeń (kolumny niebieskie) i obliczonych według PN, daje obraz małej dokładności wyników obliczeń statycznych nośności pali.

Ponieważ na przestrzeni ostatnich lat prowadzone przez autorów badania nośności pali prefabrykowanych wykazywały z reguły znaczne zapasy nośności, to można wysnuć następujące wnioski:

- obliczenia według PN są przesadnie bezpieczne (zaniżone współczynniki technologiczne?),
- projektanci asekurują się „ponad miarę”, mając świadomość zmienności warunków geotechnicznych,
- w przypadku pali prefabrykowanych dodatkowy zapas nośności mogą stanowić zaokrąglenia do pełnego metra długości (długość handlowa).

<sup>1</sup> Aarsleff Sp. z o.o.

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska.

<sup>3</sup> Aarsleff Sp. z o.o.

## Próbne obciążenia statyczne pali prefabrykowanych

Metody statyczne sprowadzają się do pomiaru osiadań pala próbnie obciążanego w funkcji obciążenia. Stosowane na świecie badania statyczne różnią się trybem obciążania pala (stałe kroki obciążenia, stałe kroki przemieszczenia), długością trwania badania (stałe – krótkie lub długie kroki czasowe bądź oczekiwanie na stabilizację) i wreszcie sposobem interpretacji wyników. Ołbrzymia większość metod sprowadza się do wyznaczenia nośności granicznej. Obliczeniowa nośność pala jest wtedy stosunkiem nośności granicznej i współczynnika bezpieczeństwa.

$$N = R_u / \gamma \quad (1)$$

gdzie:

N – nośność pala

R<sub>u</sub> – nośność graniczna pala (spotyka się również inne oznaczenia, np. N<sub>g</sub>)

γ – współczynnik bezpieczeństwa

Bardzo różnie definiowana jest nośność graniczna pala i wyznaczana zgodnie z różnymi definicjami, będzie się nieznacznie różnić dla tego samego pala. Najogólniej można powiedzieć, że jest to najmniejsze obciążenie pala, dla którego następuje nieskrępowany przyrost osiadań i nie następuje stabilizacja osiadań pala. W praktyce krajowej ten poziom obciążenia jest rzadko osiągnięty podczas badań. Wynika to z wymaganego normą [5] osiągnięcia maksymalnego obciążenia w czasie badań równego 1,50 (N<sub>l</sub> + T<sub>n</sub>). Pozwala to zazwyczaj na interpretację badania w zakresie wyznaczenia obliczeniowej nośności. Nośność graniczną zaś szacuje się przez ekstrapolację wyników badań [1]. Wyczerpujące zestawienie metod wyznaczania nośności granicznej przedstawił Kazimierz Gwizdała [2, 3].

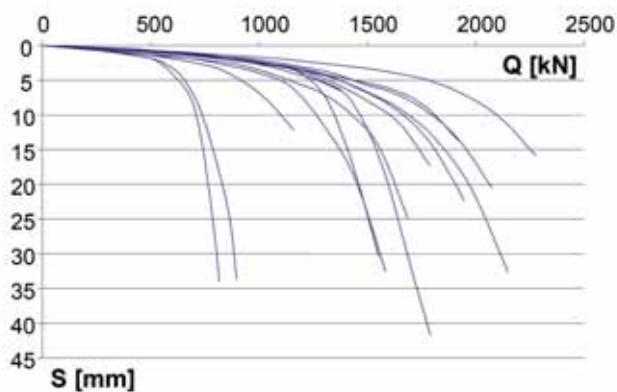
Współczynnik bezpieczeństwa przy podanym zapisie (1) będzie przyjmował wartości większe od jedności (γ > 1), a jego wartość jest różna w zależności od norm i metod obliczeń statyczno-wytrzymałościowych (metody cząstkowych współczynników bezpieczeństwa lub metody oparte o globalny współczynnik bezpieczeństwa).

Polska Norma podaje graficzną metodę interpretacji wyników pomiarów osiadań pala pod wpływem przyłożonego obciążenia. Brak jednak odniesienia do nośności granicznej pala, które wyrażałoby się zdefiniowanym ogólnie współczynnikiem bezpieczeństwa. Taki współczynnik jest niezbędny przy kalibracji badań dynamicznych, których wynikiem są nośności graniczne pala i – w zależności od metody interpretacji – rozkłady nośności na poboczniczy w podstawie pala. W praktyce interpretacją wyników pomiarów nośności zajmują się inżynierowie posiadający duże doświadczenie.

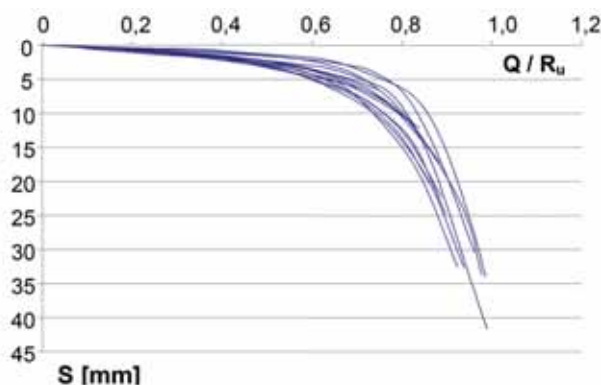
Dla pali, dla których osiągnięto lub wyinterpretowano nośność graniczną, można wyliczyć współczynnik bezpieczeństwa γ = R<sub>u</sub> / N, gdzie N jest nośnością pala wyznaczoną zgodnie z PN83/B-02482. Analizując w ten sposób dużą liczbę pali pograżonych w gruntach o różnych właściwościach, można wykazać, że współczynnik bezpieczeństwa zwykle przyjmuje wartości od 1,6 do 2,0, γ = 1,6 ± 2,0.

Nie jest jednak rzadkością (zwłaszcza w przypadku pali o dużym udziale nośności poboczniczy) wyznaczanie  $\gamma = 1,3 \div 1,5$ .

Poniżej przedstawiono zestawienie 15 próbnych obciążeń statycznych wykonanych dla pali wbijanych przez firmę Aarsleff na budowie węzła Prymasa Tysiąclecia w Warszawie. Wykres na rycinie 2a przedstawia wyniki badań w funkcji obciążenie – osiadanie. Na rycinie 2b oś obciążeń znormalizowano przez podzielenie wszystkich kroków obciążenia badanych pali przez ich nośność graniczną  $R_u$ . Miłą informacją dla projektanta jest obserwacja, że wszystkie badane pale (o różnych wymiarach przekroju, długościach i nośnościach) wykazują dla współczynnika bezpieczeństwa zbliżonego do  $\gamma = 1,6$  (co odpowiada obliczeniowym obciążeniom) osiadania w granicach od 2 do 4 mm. Można zarazem zaobserwować, że przebiegi zależności obciążenie – osiadanie dla pali wbijanych w gruntach niespoistych nie różnią się istotnie (rys. 2b) i przyjmują kształt charakterystyczny dla pali, które większość swojej nośności mobilizują na pobocznicę.



Ryc. 2a. Wyniki badań nośności pali



Ryc. 2b. Obciążenia znormalizowane do nośności granicznej

Analiza wykresów osiadań uzyskanych dla różnych warunków gruntowych pozwala na wyznaczenie współczynników bezpieczeństwa. Tym samym odniesienie do nośności granicznej jest znane. Mimo że przyjmuje ono wartości różniące się do ok. 20%, to jak pokazuje 25-letnia praktyka stosowania polskiej normy palowej, nie to jest źródłem problemów z posadowieniem na palach.

#### Metody dynamiczne pomiarów nośności pali

Stosowanie metod dynamicznych dopuszcza norma PN-EN-12699 [6]. Idea pomiaru dynamicznego nośności pala sprowadza się do pomiaru odkształceń „ $\epsilon$ ” i przyspieszeń „ $a$ ” w poziomie głowicy pala testowego w trakcie jego dynamicznego pogrążania.

$$F = EA\epsilon \quad (2)$$

$$v = \int a dt \quad (3)$$

Znajomość całkowitej siły  $F$  i całkowitej prędkości  $v$  pozwala rozdzielić falę siły poruszającą się w dół pala i w górę pala.

$$\downarrow F = \frac{F + Zv}{2} \quad (4)$$

$$\uparrow F = \frac{F - Zv}{2} \quad (5)$$

gdzie:

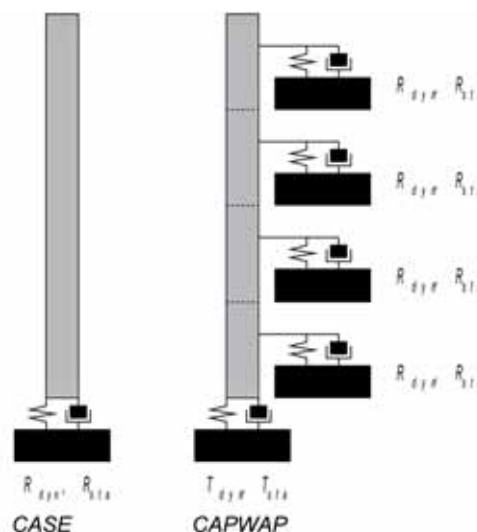
$\uparrow F$  – siła poruszająca się w górę pala

$Z = c\rho A$

$c$  – prędkość fali

$\rho$  – gęstość materiału

Analizy wyników pomiarów dokonuje się dwiema metodami, CASE i CAPWAP. Na rycinie 3 przedstawiono ideowe modele dyskretnie układu pal – grunt dla obu metod.



Ryc. 3. Modele dyskretnie układu pal – grunt metodami CASE i CAPWAP

Nośność pala według metody CASE:

$$\begin{aligned} R_{total} &= R_{statyczne} + R_{dynamiczne} \\ R_{statyczne} &= R_{total} - R_{dynamiczne} \\ R_{total} &= \frac{1}{2}(F_1 + Zv_1 + F_2 - Zv_2) \\ R_{statyczne} &= \frac{1}{2}(1 - JC)(F_1 + Zv_1) + \frac{1}{2}(1 + JC)(F_2 - Zv_2) \end{aligned} \quad (6)$$

gdzie:

$F_1$  – siła w chwili  $t_1$

$v_1$  – prędkość w chwili  $t_2$

$JC$  – bezwymiarowy współczynnik tłumienia

$t_2 = t_1 + L/c$

$L$  – długość pala od czujników do jego stopy

Niewiadomymi są tutaj nośność graniczna pala  $R_{statyczna}$  (6) i współczynnik tłumienia  $JC$ . Rozwiązanie sprowadza się do wyznaczenia właściwego współczynnika tłumienia dla pala testowego.

Metoda CAPWAP wykorzystuje dopasowanie funkcji fali powrotnej, generowanej przez model obliczeniowy pala pogrążonego w gruncie, do fali powrotnej pomierzonej w trakcie testu dynamicznego nośności pala. Dopasowanie krzywych odbywa się przez dobór wartości kilkunastu parametrów funkcji. Wynikami metody CAPWAP jest nośność graniczna z rozbięciem na stopę i pobocznicę oraz symulowana krzywa zależności osiadania pala od jego obciążenia.

Symulowana krzywa ma charakter przybliżony i charakter krzywej jest uzależniony od przyjętego modelu matematycznego. Ważne jest, że w obszarze odkształceń sprężystych krzywa rzeczywista i symulowana mają najbardziej zbliżony przebieg, a różnice w ich przebiegu zwiększają się dopiero przy wzroście odkształceń plastycznych w stosunku do sprężystych. Taki

przebieg symulowanej krzywej osiadania pała pozwala na kontrolę jego osiadań dla zakresu obciążeń generujących osiadania sprężyste bez potrzeby wykonywania pomiarów statycznych. Wyniki uzyskiwane na podstawie metody CAPWAP są bardziej wiarygodne aniżeli wyniki metody CASE i zwykle na nich opiera się wyznaczenie nośności granicznej pała. Należy jednak podkreślić, że wyniki metody CASE, właściwie skalibrowane do metody CAPWAP lub do pomiarów statycznych nośności pali, mogą stanowić podstawę do wyliczenia nośności pała. Kalibracja polega na doborze współczynnika tłumienia  $J_C$  na podstawie znanej nośności granicznej badanego pała w znanych warunkach gruntowych. Właściwie wyliczone  $J_C$  pozwala określać nośność graniczną pali, dla których prowadzona jest tylko analiza metodą CASE, a pogrążonych w takich samych gruntach jak pał, dla którego na podstawie znanej nośności granicznej wyznaczono współczynnik tłumienia  $J_C$ .

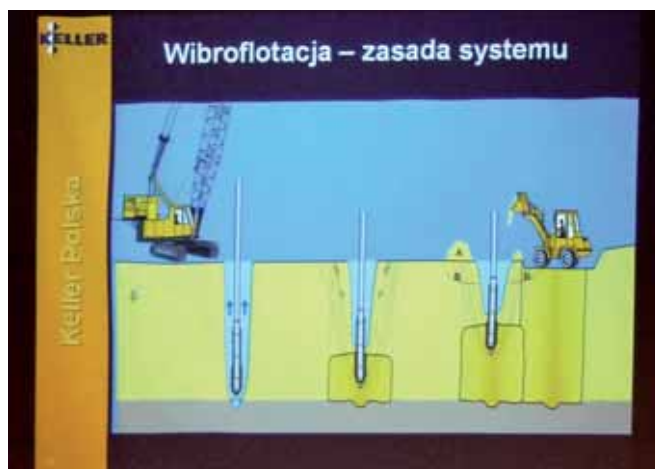
### Podsumowanie

Obserwowana powszechnie zmienność uzyskiwanych nośności dla gruntów o podobnych właściwościach sprawia, że projekt fundamentu palowego nie może być zredukowany tylko do obliczeń nośności przy użyciu wybranego modelu matematycznego (wzórów, nomogramów, tabel). Optymalną procedurą projektowania jest każdorazowe kalibrowanie metod obliczeniowych w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań nośności. Technologia pali

prefabrykowanych ze względu na możliwość przeprowadzenia badań nośności w krótkim czasie od wbicia pała, znacznie ułatwia (skraca w czasie) ewentualną modyfikację projektu. Choć „aktualizacja” projektu może prowadzić do oszczędności, to utrudnia znacznie logistykę (prefabrykacja i transport pali). W praktyce optymalizacja projektów jest możliwa tylko w przypadku firm dysponujących efektywnym zapleczem (zespół badawczy, biuro projektowe, magazyn pali).

### Literatura

1. Chin F.K.: *Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Southeast Asian Conference on Soil Engineering*. Singapore 1971, pp. 81–90.
2. Gwizdała K.: *Kontrola nośności i jakości pali fundamentowych*. „Geoinżynieria i Tunelowanie” 2004, nr 1.
3. Gwizdała K.: *Projektowanie pali fundamentowych. Materiały konferencyjne. XX Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji*. Wisła – Ustroń, 1–4 marca 2005.
4. Rippel R.: *Próbne obciążenia i badania głębokich fundamentów*. „Geoinżynieria i Tunelowanie” 2004, nr 2.
5. PN-83/B-02482 *Fundamenty budowli. Nośność pali i fundamentów palowych*.
6. PN-EN 12699 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe*.
7. Materiały archiwalne Aarsleff Sp. z o.o.



W ostatnich miesiącach Polski Komitet Geotechniki (PKG) oddział małopolski miał przyjemność zaprosić Państwa na spotkania podejmujące temat wzmacniania podłoża oraz zastosowania geosyntetyków w budownictwie komunikacyjnym.

Podczas seminarium naukowego, zorganizowanego przy udziale Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, prezentację *Metody wzmacniania i uszczelniania słabego podłoża gruntowego z uwzględnieniem technologii stosowanych przez firmę Keller Polska Sp. z o.o.* przedstawił Mariusz Poślajko z Keller Polska Sp. z o.o. Uczestnicy spotkania mieli okazję poszerzyć wiedzę z zakresu specjalistycznych technik wzmacniania podłoża gruntowego, takich jak: wibroflotacja, kolumny DSM czy iniekcje strumieniowe. Tematyka ta spotkała się z dużym zainteresowaniem, czego przejawem była nie tylko pełna sala, ale również ożywiona dyskusja podsumowująca prezentację.

25 listopada 2008 r. małopolski oddział PKG oraz Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziemi Uniwersytetu Rolniczego gościł Przedsiębiorstwo Realizacyjne INORA, które przedstawiło swoje doświadczenia w zakresie projektowania rozwiązań oraz zastosowania geosyntetyków w budownictwie komunikacyjnym.

Małopolski oddział PKG zaprasza na pierwsze w 2009 r. spotkanie oddziału, podczas którego zostanie zaprezentowany system barier chroniących przed lawinami śnieżnymi firmy Geobrugg AG. Prezentację pod tytułem *Lawiny śnieżne – problem nie tylko alpejski* przedstawi mgr inż. Piotr Baraniak. Uczestnicy poznają historię tworzenia rozwiązań chroniących przed powstawaniem lawin śnieżnych oraz obecny poziom techniki stosowanej na całym świecie. W Europie bariery śnieżne są dość powszechnym widokiem np. w rejonach alpejskich i Pirenejach. Zapraszamy!