

# Korelacja dynamicznych i statycznych badań pali wbijanych w Polsce

Badania dynamiczne są szczególnie przydatne do kontroli nośności fundamentów z pali wbijanych, gdzie impuls dynamiczny można wywołać młotem kafara na placu budowy. Metoda sprawdza się także w badaniach pali formowanych w gruncie. W artykule skupiono się na zagadnieniu korelacji wyników badań nośności pali wbijanych metodą dynamiczną i statyczną. Omówiono także aktualny stan prawny oraz podstawy teoretyczne i metodykę interpretacji wyników badań nośności pali.

## Dynamiczne i statyczne badania nośności pali

Obecnie w projektowaniu i kontroli nośności pali są wykorzystywane normy PN-B-02482:1983 [1], PN-EN 1997-1 [2] oraz PN-EN 12699 [3], która od 2005 r. dopuszcza prowadzenie badań dynamicznych na palach przemieszczeniowych. Od 2004 r. autor bezpośrednio wykonywał i opracowywał lub nadzorował badania statyczne i dynamiczne nośności pali żelbetonowych wbijanych o przekroju poprzecznym kwadratowym od 0,25×0,25 do 0,40×0,40 m oraz pali rurowych wbijanych i wkręcanych średnicy do 1220 mm. W latach 2005-2011 wykonano 3800 badań dynamicznych. Stanowiły one około 76% wszystkich badań pali i praktycznie od 2006 r. udział ten nie zmienia się, co nie wynika bezpośrednio z wymagań normowych. Możliwe jest ograniczenie liczby badań statycznych tylko do badań referencyjnych, co jest zgodne z zasadami Eurokodu 7 [2]. Norma ta pozwala korzystać z wcześniejszych doświadczeń zdobytych na podobnych palach, w podobnych warunkach gruntowych. W uzasadnionych przypadkach wykonywanie badań statycznych nie jest więc konieczne. Porównując warunki gruntowe, należy brać pod uwagę nie tylko rodzaj gruntu, ale też lokalizację, genezę, warunki drenażu i stopień prekonsolidacji związany z historią obciążeń. Uzyskana dokładność wyników badania dynamicznego w stosunku do statycznego wszystkich badanych pali w tych samych warunkach gruntowych nie będzie identyczna. Należy podkreślić, że w badaniu dynamicznym jest wyznaczana nośność graniczna pala. Możliwe jest również wyznaczenie granicznej nośności na pobocznicę i pod podstawą pala oraz rozkładu sił na pobocznicę pala.

Dokładność wyników badania nośności granicznej metodą dynamiczną jest podstawowym parametrem metody decydującym o jej użyteczności praktycznej. Dokładność metody jest badana od momentu jej wprowadzenia do zastosowań praktycznych w latach sześćdziesiątych XX wieku (prace [4 i 5]).

## Metody obliczania nośności granicznej na podstawie pomiaru PDA

Metody dynamiczne opierają się na rozwiązaniu równania różniczkowego opisującego przemieszczenie pala pogrążonego w gruncie

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \frac{k_s(x)}{AE} u(x,t) + \frac{c_s(x)}{AE} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

w którym:  $u$  – przemieszczenie pala,  $x$  – położenie punktu na długości pala,  $t$  – czas,  $c$  – prędkość propagacji fali naprężeń w palu,  $c_s$  – współczynnik tłumienia,  $k_s$  – współczynnik sprężystości gruntu,  $E$  – moduł sprężystości materiału pala,  $A$  – pole powierzchni przekroju pala

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

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

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

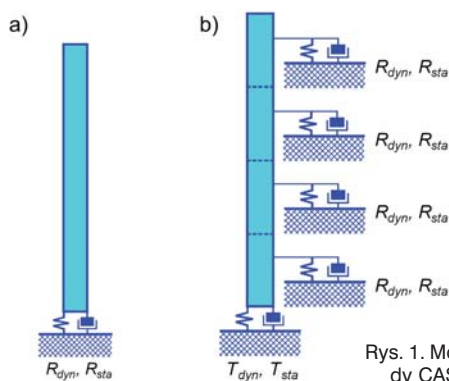
$$\uparrow F = \frac{F - Zv}{2} \quad (5)$$

$$R_{stat} = R_{total} - R_{dyn} \quad (6)$$

$$R_{stat} = \uparrow F + \downarrow F - JC(\downarrow F - \uparrow F) \quad (7)$$

$\varepsilon$  – odkształcenie,  $a$  – przyspieszenie mierzone w poziomie głowicy pala,  $\uparrow F$ ,  $\uparrow v$ ,  $\downarrow F$  i  $\downarrow v$  – siła i prędkość poruszające się w dół i w górę pala zmierzone w czasie  $t = 2L/c$ ,  $Z = c\rho A$ ,  $\rho$  – ciężar objętościowy materiału pala,  $JC$  – bezwymiarowy współczynnik tłumienia,  $L$  – odległość od czujników do stopy pala (w czasie potrzebnym fali naprężeń do przebycia drogi w dół i w górę pala).

W 1967 r. Goble podał rozwiązanie pod nazwą „Case Method” dotyczące badań dynamicznych opartych na pomiarze odkształcenia i przyspieszenia, przeliczanych na siłę i prędkość. W 1972 r. Rausche opracował metodę CAPWAP. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczone modele obliczeniowe przyjęte w tych metodach. Istotę pomiaru opisują równania (2) i (3). Równań (4) i (5) można użyć do rozdzielenia fali naprężeń poruszających się w dół i w górę pala. W metodzie CASE poprawne rozwiązanie polega na dobraniu właściwego współczynnika tłumienia. Nośność pala według metody CASE podają równania (6) i (7). Wynikiem jest nośność graniczna pala.



Rys. 1. Model obliczeniowy: a) metody CASE, b) metody CAPWAP

Nośność statyczna pala jest równa nośności całkowitej pomniejszonej o nośność dynamiczną wynikającą z ruchu pala w trakcie badania. W metodzie CAPWAP rozwiązanie polega na iteracyjnym dopasowaniu sygnału obliczonego i pomierzonego przez dobór właściwych parametrów równania, a w szczególności: nośności granicznej pala w podziale na nośność pobocznicę i nośność podstawy oraz parametrów opisujących dynamiczne przemieszczenie pala w gruncie. Zwykle obliczenia iteracyjne wykonuje się dla fali powrotnej.

Na rysunku 2 pokazano urządzenie do rejestracji sygnału, na rys. 3 – palek żelbetonowy o przekroju 0,40×0,40 m przygotowany do badania dynamicznego, do którego przykręcono czujni-



Rys. 2. Urządzenie PDA do rejestracji sygnału z czujników



Rys. 3. Badanie pala ukończonego (Farma wiatrowa Kisielice)



Rys. 4. Pal średnicy 1220 mm przygotowany do badania; czujniki umieszczone wewnątrz pala

ki odkształceń i przyspieszeń (farma wiatrowa w Kisielicach), a na rys. 4 pal rurowy średnicy 1220 mm przygotowany do badania, z czterema parami czujników odkształceń i przyspieszeń umieszczonych wewnątrz pala. Badanie dynamiczne z wykorzystaniem młota spalinyowego (port LNG w Świnoujściu) zilustrowano na rys. 5.



Rys. 5. Badanie pala rurowego (Terminal LNG w Świnoujściu)

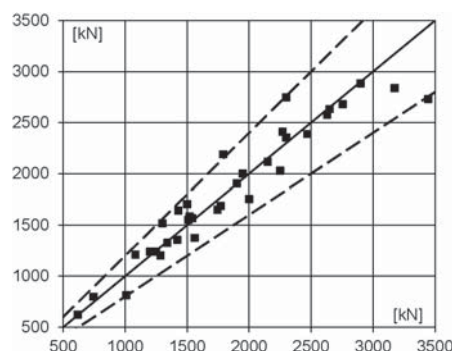
### Przykłady korelacji wyników badań statycznych i dynamicznych nośności pali

Analizy porównawczej dokonano na przykładzie wyników badań nośności pali wciskanych i wyciąganych na terenie Polski. Ze względu na nieco odmienną specyfikę szacowania nośności pali przy wyciąganiu w porównaniu do jej szacowania przy wciskaniu zagadnienia te zostały opisane oddzielnie.

- **Korelacja wyników badań statycznych i dynamicznych przy wciskaniu.** Wyniki badań dotyczą pali o przekroju poprzecznym  $0,25 \times 0,25$ ;  $0,30 \times 0,30$  i  $0,40 \times 0,40$  m, zagłębionych w gruncie od 7,0 do 29,0 m. Pale opierały się stopą w gruntach niespoistych lub spoistych. Nośność graniczna pali, wyznaczona na podstawie badań dynamicznych, wynosiła  $620 \div 2880$  kN, a na podstawie badań statycznych  $620 \div 3450$  kN. Należy tu nadmienić, że niżej podanej analizie nie należy ekstrapolować na inne, nieuwzględnione w badaniach, rodzaje gruntów.

Do porównania nośności pali przy wciskaniu wykorzystano pale, których nośność graniczną określono metodą statyczną, lub pale, których ekstrapolacja pomiarów statycznych nie budziła wątpliwości. Pomiaru statyczne ekstrapolowano metodą opisaną w PN-B-02482:1983 [1] i założono, że pal osiąga nośność graniczną, gdy pod wpływem danego obciążenia następuje jego nieskrępowane przemieszczenie. Za nieskrępowane przemieszczenie przyjęto  $D \approx 0,1a + 5$  [mm], gdzie  $a$  – wymiar boku pala o przekroju kwadratowym. Pomiaru dyna-

miczne nośności granicznej wykonano na tych samych palach. Dokładność wyznaczonych metodą dynamiczną nośności pali przy wciskaniu mieści się w przedziale  $[-21; +22\%]$ , a odchylenie standardowe próby  $\sigma = 0,10$ . Poziom ufności w przedziale  $[-20; +20\%]$   $p = 94\%$ . Uzyskaną dokładność wyników badań dynamicznych w odniesieniu do wyników badań statycznych uznano za wystarczającą w praktycznych zastosowaniach inżynierskich. Na rysunku 6 wyniki badań przedstawiono graficznie. Przekątna obrazuje nośność graniczną pala, linie przerywane – założony przedział ufności wyników pomiarów  $[-20; +20\%]$ , a poszczególne punkty – wyniki badań dynamicznych nośności granicznej.

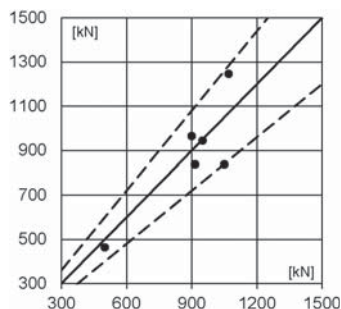


Rys. 6. Wyniki badań porównawczych przy wciskaniu pali o przekroju kwadratowym  $0,25 \times 0,25$  do  $0,40 \times 0,40$  m (poziom ufności  $p = 94\%$  w przedziale  $[-20; +20\%]$ )

- **Korelacja wyników badań statycznych i dynamicznych przy wyciąganiu.** W celu porównania nośności pali przy wyciąganiu uwzględniono tylko pale, na których osiągnięto nośność graniczną w trakcie badania statycznego. Przyjęto, że nośność graniczna pala to maksymalne obciążenie wyciągające, jakim można obciążyć pal. Badania porównawcze wykonano na palach o przekroju poprzecznym  $0,40 \times 0,40$  m i zagłębieniu stopy od 6,0 do 20,0 m. Pale były pograżone w gruntach niespoistych i spoistych. Nośności graniczne pali na pobocznicach na podstawie badań dynamicznych mieściły się w zakresie  $580 \div 1685$  kN, a nośności graniczne uzyskane w badaniu statycznym  $500 \div 1070$  kN. W trakcie badania dynamicznego kierunku siły obciążającej pal jest przeciwny do kierunku działania obciążenia w próbie statycznej.

Kierunek działania siły ma wpływ na nośność graniczną pobocznic pala. Wartość redukcji zależy od rodzaju gruntu. W gruntach niespoistych redukcja będzie większa, a w spoistych mniejsza. Ustalenie, w jakich gruntach jest pograżony pal, nie zawsze jest możliwe, dlatego właściwsze jest wyznaczenie średniego współczynnika redukcji nośności. W analizie przyjęto redukcję nośności na pobocznicach pala do  $80\%$  nośności pobocznic  $\gamma_s = 0,8$ ,  $Ng_w = \gamma_s R_s$ ,  $Ng_w$  – nośność graniczna pobocznic przy wyciąganiu,  $R_s$  – nośność graniczna pobocznic w trakcie badania dynamicznego. Dokładność wyników

badania dynamicznego nośności pali przy wyciąganiu mieściła się w przedziale [-20; +17%], a odchylenie standardowe  $\sigma = 0,13$ . Poziom ufności dla przedziału [-20; +20%]  $p = 100\%$ . Dokładność wyników badania nośności przy wyciąganiu obrazuje rys. 7. Próba wyników badań porównawczych nośności pali przy wyciąganiu nie jest liczna, a dane statystyczne mogą być obarczone pewnym błędem.



Rys. 7. Wyniki badań porównawczych przy wyciąganiu pali o przekroju kwadratowym 0,40x0,40 m (poziom ufności  $p = 100\%$  w przedziale [-20; +20%])

### Podsumowanie i wnioski

Wykonywane i opracowywane przez autora wyniki badań statycznych i dynamicznych pali wbijanych na terenie Polski od 2004 r. pozwoliły na wiarygodną kontrolę przydatności metod dynamicznych do pomiaru nośności pali wbijanych w szerokim

spektrum warunków gruntowych. Te wyniki umożliwiają sformułowanie następujących wniosków:

- badanie dynamiczne nośności pala, którego dokładność zmierzono w badaniu statycznym w zbliżonych warunkach gruntowych może być wykorzystywane jako podstawowy element kontroli nośności fundamentu palowego;
- nie ma konieczności kalibrowania badania dynamicznego badaniem statycznym na każdym placu budowy, a w szczególności na każdej podporze obiektu mostowego;
- metody dynamiczne można stosować do szacowania nośności pali, zarówno przy wciskaniu, jak i przy wyciąganiu.

### Podziękowania

Autor dziękuje firmie Aarsleff Sp. z o.o. za udostępnienie wyników badań pali, niezbędnych do przygotowania niniejszego artykułu.

### PIŚMIENNICTWO

- [1] PN-B-02482:1983 Fundamenty budowlane – Nośność pali i fundamentów palowych.
- [2] PN-EN 1997-1:2004 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.
- [3] PN-EN 12699 Specjalne roboty geotechniczne – Pale przemieszczeniowe.
- [4] *Hanningan P.J., Webster S.D.*: Comparison of static load tests and dynamic pile testing results. The 2nd International Symposium, Deep Foundation Institute. Luxembourg, 1987.
- [5] *Likins G.E., Rausche F.*: Correlation of CAPWAP with Static Load Tests. Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles 2004: Petaling Jaya, Selangor, Malaysia, August 2004.

# AARSLEFF



#### Roboty palowe

- Dostawa i instalacja pali prefabrykowanych wbijanych
- Pale formowane w gruncie
- Mikropale
- Pale stalowe wbijane i wwbrowywane
- Fundamenty palowe ekranów akustycznych i słupów sieci trakcyjnych
- Wzmacnianie gruntu – pale prefabrykowane, kolumny betonowe, kolumny DSM
- Badanie nośności pali – próbné obciążenia statyczne, dynamiczne testy nośności pali, badania ciągłości pali

#### Zabezpieczenia głębokich wykopów

- Stalowe ścianki szczelne – instalacja grodzic z zastosowaniem metod tradycyjnych oraz bezwibracyjnej metody wciskania
- Ścianki berlińskie
- Iniekcyjne kotwy gruntowe
- Roboty ziemne i odwodnieniowe
- Pomiaru wibracji

#### Roboty hydrotechniczne

- Przesłony przeciwfiltacyjne
- Konstrukcje hydrotechniczne na wodach morskich i śródlądowych

#### Projektowanie

- Prace projektowe na potrzeby wykonywanych robót, realizowane we własnej pracowni projektowej

[www.aarsleff.com.pl](http://www.aarsleff.com.pl)