



# Badania dynamiczne nośności pali

Kazimierz Gwizdała, Tadeusz Brzozowski

Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Politechniki Gdańskiej

Posadowienia fundamentów palowych realizowane są najczęściej w bardzo trudnych warunkach gruntowych. Obciążenie przekazywane jest na głębsze, nośne warstwy podłoża gruntowego. Pale zagłębiane są w grunty uwarstwione o bardzo zróżnicowanej wytrzymałości i odkształcalności.

Rzeczywista ocena nośności, a dokładniej zależności obciążenie – osiadanie w całym zakresie obciążenia, aż do wartości granicznej, jest bardzo trudna. Metody analityczne w tym przypadku często nie przynoszą zadowalających efektów. We współczesnych obliczeniach i projektowaniu fundamentów palowych stosuje się różne oszacowania. Podstawowe znaczenie mają badania terenowe na rzeczywistych palach, zawsze stosowane jako weryfikacja obliczeń.

Zgodnie z zaleceniami Eurokodu 7 [13] projektowanie fundamentów palowych powinno odbywać się przy wykorzystaniu jednego z następujących rozwiązań:

- na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych,
- na podstawie empirycznych lub analitycznych metod obliczeniowych, których wiarygodność została potwierdzona przez próbne obciążenia statyczne w porównywalnych warunkach,
- na podstawie wyników pomiarów dynamicznych oraz wzorów dynamicznych, gdy wiarygodność ich wykorzystania została potwierdzona przez próbne obciążenia statyczne w porównywalnych warunkach,
- na podstawie obserwacji i pomiarów terenowych dla porównywalnych fundamentów palowych w porównywalnych warunkach gruntowych.

Najbardziej wiarygodne wyniki otrzymuje się na podstawie próbnych obciążeń statycznych. Obecnie bardzo silnie rozwijane są różne rodzaje badań dynamicznych, które posiadają wiele zalet w stosunku do badań statycznych.

Metody badań dynamicznych początkowo stosowano tylko dla pali wbijanych. Obecnie są one powszechnie wykorzystywane na świecie również dla pali wierconych. W artykule przedstawiono krótką charakterystykę metod typu *High-Strain* oraz wybrane

przykłady zastosowań badań dynamicznych nośności pali wykonanych w kraju przez autorów.

Metody dynamicznego określania nośności pali w porównaniu do badań statycznych eliminują konieczność przygotowania konstrukcji kotwiących lub balastowych oraz umożliwiają przeprowadzenie kilku badań nośności pali w ciągu jednego dnia.

Metody dynamiczne można uznać za równorzędne z badaniami statycznymi. Wiarygodność wartości nośności badanych pali potwierdziła szereg wykonanych na świecie porównań wyników uzyskanych z obu rodzajów badań, np. [4, 5, 6, 7].

W większości norm i wytycznych [13, 14, 15, 16, 17] zaleca się wykonać jako korelacyjne przynajmniej jedno badanie statyczne na 5 ÷ 10 przeprowadzonych prób dynamicznych.

Najczęściej stosowane obecnie metody badań dynamicznych podzielić można w następujący sposób:

1. Wzory dynamiczne – opracowane dla różnych technologii wbijania pali oraz warunków lokalnych.
2. Niskoodkształceniowe (*Low-Strain*) – do sprawdzania długości i ciągłości pali:

SIT (*Sonic Integrity Testing*),

PIT (*Pile Integrity Testing*).

3. Wysokoodkształceniowe (*High-Strain*) – do sprawdzania nośności pali:

DLT (*Dynamic Load Testing*),

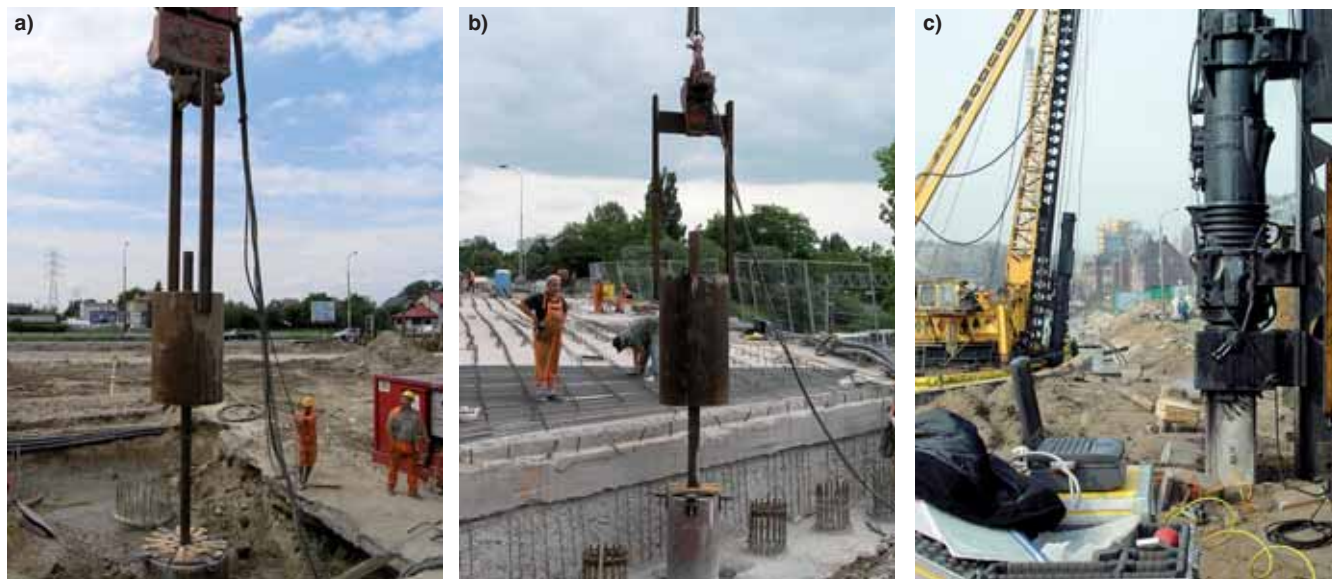
PDA (*Pile Driving Analysis*).

4. Wysokoodkształceniowe kinetyczne (*Kinetic High-Strain*) – do sprawdzania nośności pali:

STATNAMIC – zastosowanie ładunku wybuchowego,

DYNATEST – obciążenie tłumione, ze spadającym swobodnie ciężarem.

Wysokoodkształceniowe badania dynamiczne polegają na wykorzystaniu zjawiska rozchodzenia się fali naprężeń w palu podczas jego wbijania (test PDA), albo w przypadku pala wykonywanego w gruncie po jego wykonaniu i uderzeniu w głowicę młotem kafara lub innym ciężarem prowadzonym w prowadnicach (test DLT).



Rys. 1. Stanowiska do badań dynamicznych pali: a) badanie DLT, pal wiercony  $\varnothing$  1500 mm, bijak o ciężarze 92 kN, b) badanie DLT, pal CFA  $\varnothing$  600 mm, bijak o ciężarze 23kN, c) badanie PDA, pal prefabrykowany 400 × 400 mm, młot Delmag o ciężarze 30 kN

Rejestracji propagacji fali wywołanej uderzeniem bijaka w głowicę dokonuje się najczęściej za pomocą czujników starannie przykręconych do rodzimej (nienadbetonowanej), wyrównanej powierzchni pała po przeciwległych stronach w odległości ok. 1,5 średnicy pała od wierzchu głowicy. Przenośny komputer współpracujący ze wzmacniaczem sygnałów rejestruje, przetwarza i prezentuje dane. Wielkości zarejestrowane podczas uderzenia oraz charakterystyka podłoża opracowana w oparciu o rozpoznane wcześniej warunki gruntowe umożliwiają w rezultacie opisanie modelu młot – pał – grunt, za pomocą którego określa się nośność pała oraz ekwiwalentną do statycznej, zależność obciążenie – osiadanie.

Szczegółowy opis metod badań dynamicznych oraz podstaw teoretycznych zaprezentowano m.in. w pracach [1, 5, 18].

Głównym elementem konstrukcyjnym stanowiska DLT służącym do wywoływania fali naprężeń podczas uderzania pała jest bijak (młot) o ciężarze minimum 1 ÷ 2% nośności pała, wykonany np. z jednolitej bryły mocno zbrojonego betonu w osłonie z rury stalowej oraz prowadnica bijaka (rys. 1).

Bijak unoszony jest za pomocą wibromłota lub dźwigu zapewniającego swobodne jego uwalnianie. Swobodne zwolnienie bijaka ma zapewnić jego bezwładne przemieszczanie się wzdłuż prowadnicy zamocowanej do głowicy pała i uderzenie w głowicę. Prowadnica zapewnia centryczne uderzenie bijaka w pał.

### 1. Modele analityczne stosowane w interpretacji badań dynamicznych pali

Interpretacja wyników badań odbywa się za pomocą programów numerycznych opracowanych na podstawie kilku różnych modeli młot – pał – grunt (tab. 1).

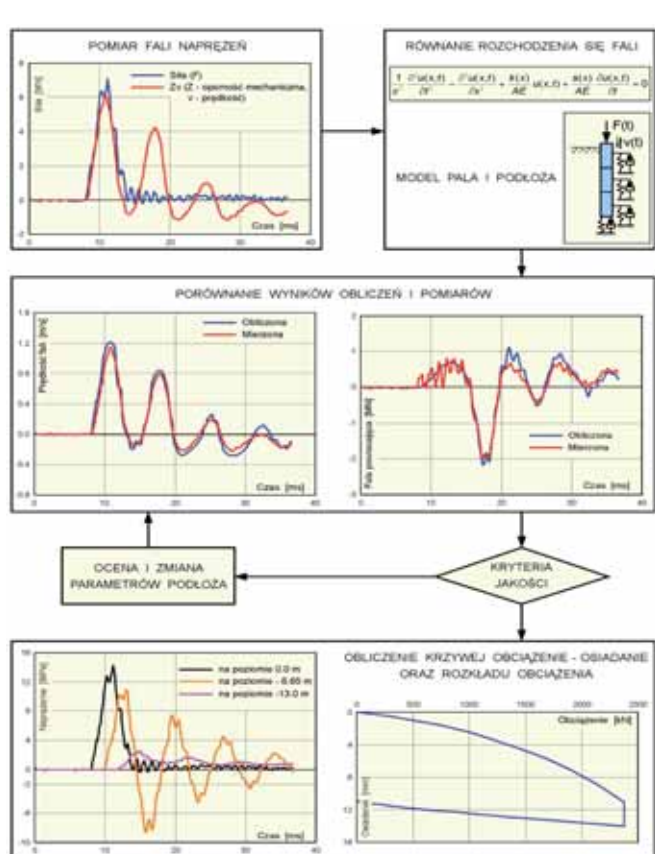
Tab. 1 Metody interpretacji badań dynamicznych w zależności od stosowanego modelu młot – pał – grunt

Metody bezpośrednie				Metody pośrednie	
CASE	IMPEDANCE	TNO	Maximum TNO	CAPWAP	TNODLT

Badania wykorzystujące modele gruntu umożliwiające określenie jedynie całkowitych oporów występujących przy wbijaniu pała, nazywa się metodami bezpośrednimi. Metody te polegają na obliczeniu nośności za pomocą gotowych wzorów, do których podstawia się wybrane wartości sił i prędkości pomierzone w czasie badań. Do obliczeń należy przyjąć również prędkości rozprzestrzeniania się fali naprężeń oraz współczynniki tłumienia i sprężystości gruntu. Błędny dobór tych parametrów powoduje uzyskanie niepoprawnych wyników. Najbardziej znanymi metodami bezpośrednimi są metoda CASE opracowana w *Case Institute of Technology* [8] oraz metoda TNO [7].

Pale w złożonych warunkach gruntowych powinny być analizowane metodami pośrednimi (zwane również rozszerzonymi), które umożliwiają o wiele lepsze odwzorowanie zarówno charakterystyki mechanicznej pała, jak i samego gruntu. Rozszerzone metody oceny nośności pali za pomocą modeli matematycznych i obliczeń iteracyjnych zostały rozwinięte już w latach 60. XX w. (metoda CAPWAP – *Case Pile Wave Analysis Program* [9]). Holenderska metoda rozszerzona zwana TNODLT wykorzystywana do interpretacji badań przez autorów artykułu została wprowadzona do badań w latach 80. [1, 7].

W metodach pośrednich wykorzystuje się wykresy siły i prędkości w zależności od czasu, mierzone w głowicy badanego pała. Jednowymiarowa teoria falowa pozwala na ocenę oporu gruntu i obliczenie reakcji pała na uderzenie młota. Rozprzestrzenianie się fali naprężeń w pału i przekazanie energii do gruntu oparte są na modelu numerycznym. W opisie modelu opór gruntu dzieli się na statyczny i dynamiczny. Do opisu statycznego oporu gruntu przyjmuje się model sprężysto-plastyczny natomiast opór dynamiczny reprezentuje lepki tłumik. Opór poboczniczy modelowany jest w punktach dyskretnych wzdłuż pobocznic pała. Warunki początkowe modelu gruntu są przyjmowane na podstawie badań terenowych (najlepiej sondowania statycznego CPT).



Rys. 2. Przebieg generowania modelu oraz iteracyjnego dopasowania sygnału

Obliczony z modelu przebieg siły w czasie może być porównany ze zmierzonym w badaniu. Parametry gruntu (i pała) dostosowywane są w kolejnych iteracjach aż do najlepszego możliwego dopasowania pomiędzy krzywymi siły: obliczoną i pomierzoną. Na rysunku 2 przedstawiono schemat generowania modelu młot – pał – grunt oraz iteracyjnego dopasowania sygnału pomierzonego do obliczonego.

Jako rezultat przedstawionej procedury obliczony zostaje rozkład oporów na pobocznicę i pod podstawą pała oraz krzywą obciążenie – osiadanie w głowicy. Jest to zależność ekwiwalentna do krzywej obciążenie – osiadanie otrzymanej z obciążenia statycznego.

Autorzy artykułu stosują do badań DLT aparaturę holenderskiej firmy „Profound” (własność Hydrobudowy SA Gdańsk) oraz metodę pośrednią TNODLT.

Należy podkreślić, że w wielu krajach na świecie opracowano już normy, projekty norm lub zalecenia dotyczące zasad stosowania metody dynamicznej do określania nośności pali [16, 17, 19]. W nowej wersji polskiej normy palowej konieczne jest wprowadzenie dopuszczalności i zasad stosowania tego typu badań w praktyce (zob. Eurokod 7 [13, 14, 15]). Warto dodać, że obecnie na świecie wprowadzono już nową udoskonaloną metodę badania łączącą cechy obciążenia statycznego i badania dynamicznego, znaną pod nazwą „Statnamic”. Jej opis w literaturze można znaleźć m. in. w pracach [4, 19].

### 2. Przykłady wykonanych badań dynamicznych

Poniżej zaprezentowano przykłady badań dynamicznych nośności pali wierconych dla dwóch wybranych obiektów. Szerszy opis wykonanych badań oraz wyniki porównawcze prezentowano m.in. na XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania [12].

#### 2.1. Most na rzece Rurzyca w dolinie rzeki Odry

Przedstawiony przykład ilustruje pierwsze samodzielnie zrealizowane przez Zespół badania dynamiczne. Most wykonany w ramach modernizacji drogi krajowej zaprojektowano jako konstrukcję jednoprzęsłową opartą na dwóch przyczółkach posadowionych na palach wierconych Ø 1500 mm, o długości

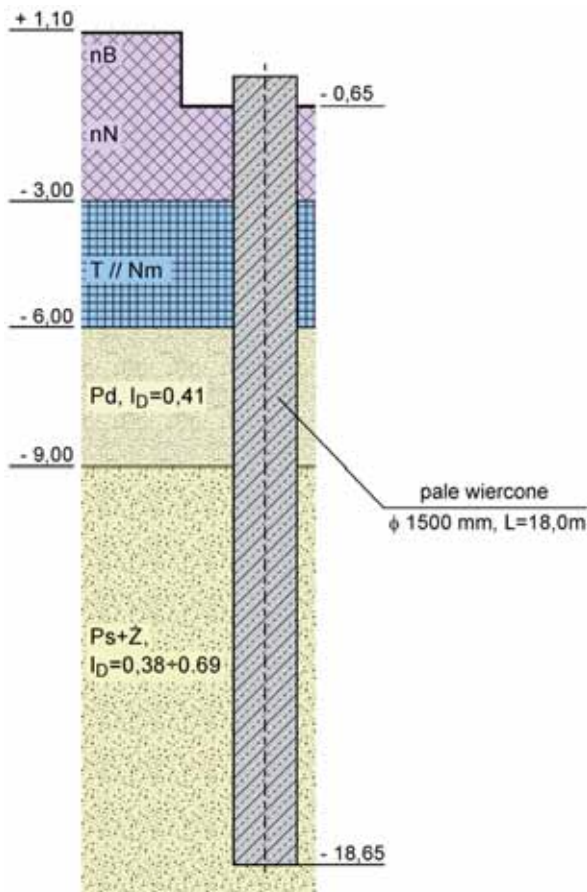


18,0 m. Pod każdą z podpór zastosowano po 10 pali z iniekcją pod podstawami według rozwiązania Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej (patent nr 188356, [11]). Obciążenie obliczeniowe przekazywane na pojedynczy pal wynosiło  $Q_p = 4070$  kN.

Most zlokalizowany jest na rzece Rurzyca, dopływie rzeki Odry. Pod warstwą nasypów występują grunty organiczne w postaci torfów. Grunty te zalegają do głębokości ok. 7 m p.p.t. Poniżej do głębokości ok. 10 m p.p.t. znajdują się piaski drobne pochodzenia aluwialnego od luźnych do średnio zagęszczonych ( $I_D = 0,21 \div 0,41$ ). Pod tą warstwą zalegają piaski średnie ze zwirami w stanie od średnio zagęszczonego do zagęszczonego ( $I_D = 0,38 \div 0,69$ ). Podstawy pali zagłębione są w piaskach o stopniu zagęszczenia  $I_D = 0,69$ . Uogólniony profil geotechniczny przedstawiono na rysunku 3.

Jako pierwsze wykonano obciążenie statyczne pala nr 3 (przyczółek nr 1), następnie na tym samym palu przeprowadzono badanie dynamiczne. Jako ostatnie wykonano badanie dynamiczne pala nr 18 na przyczółku prawobrzeżnym nr 2.

Wyniki badań pali w postaci krzywych obciążenie – osiadanie przedstawiono na rysunku 4. Krzywą z badania dynamicznego dla pala nr 3 wrysowano poniżej krzywej z obciążenia statycznego, traktując próbę dynamiczną jako kontynuację badań statycznych.

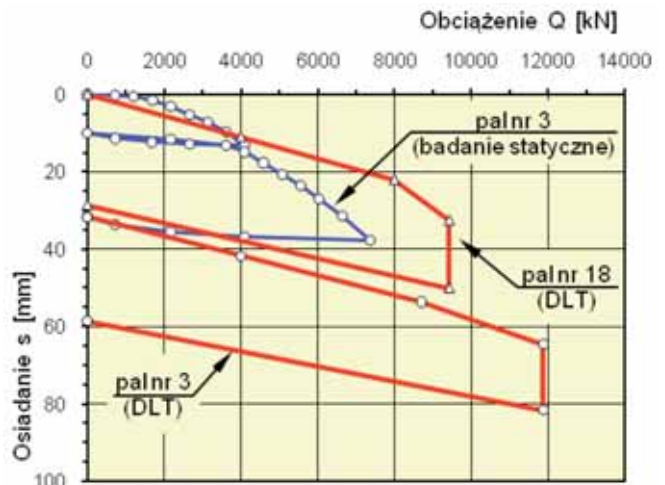


Rys. 3. Warunki geotechniczne, most na rzece Rurzyca

Porównanie krzywych obciążenie – osiadanie, uzyskanych na podstawie badań dynamicznych z krzywą z próbnego obciążenia statycznego, wykazuje generalnie dobrą zgodność wyników badań. Podkreślić należy zgodność wartości osiadań uzyskanych z obu rodzajów badań dla obciążeń zbliżonych do wartości projektowych.

Przedstawiony przykład wskazuje na trudność interpretacji badań w przypadku, gdy na jednym palu wykonywane są zarówno badania statyczne, jak i dynamiczne. Mimo dość dobrej zgodności obu krzywych, trudno jest jednoznacznie określić dla jakiej wartości osiadań należy rozpocząć wykres kolejnego badania przeprowadzonego na tym samym palu.

Mając na uwadze trudności z interpretacją wyników badań



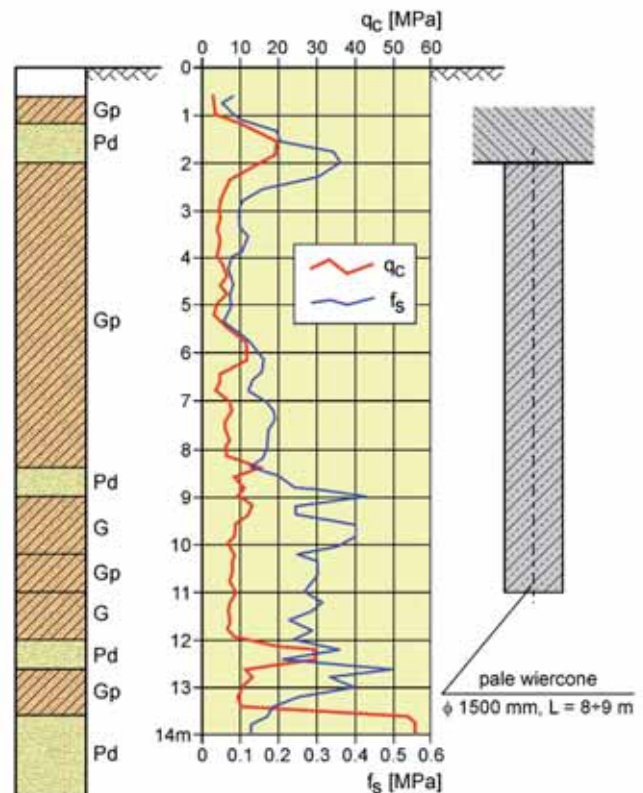
Rys. 4. Krzywe obciążenie– osiadanie, most na rzece Rurzyca

ności, obciążenia statyczne i dynamiczne nie powinny być raczej wykonywane na tym samym palu. Wymaga to przygotowania dodatkowej głowicy pala do próbnego obciążenia, co oczywiście zwiększa koszty. Jednak biorąc pod uwagę globalny koszt przygotowania badania statycznego, nie ma to praktycznie znaczenia.

Należy zwrócić uwagę, że pale wybrane do badań korelacyjnych powinny być wykonane w możliwie zbliżonych warunkach gruntowych oraz charakteryzować się takimi samymi parametrami geometrycznymi i technologicznymi.

## 2.2. Wiadukty drogowe nad ul. Puławską w Piasecznie

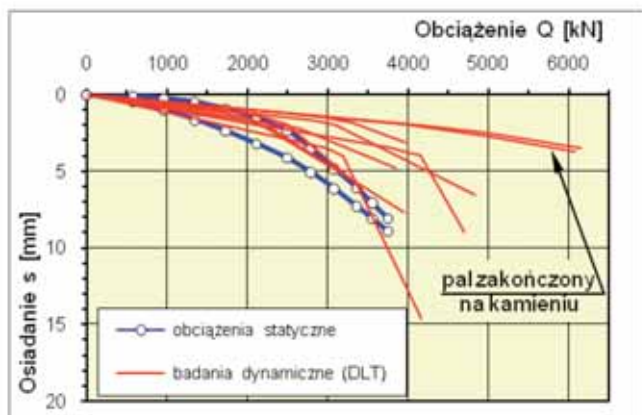
Drugi z prezentowanych przykładów dotyczy jednego z ostatnich obiektów, na którym Zespół wykonał badania dynamiczne. Były to wiadukty drogowe wykonywane w ramach bezkolizyjnego skrzyżowania zlokalizowanego na granicy Warszawy i Piaseczna nad ul. Puławską. Każdą z 12 podpór posadowiono na czterech palach wierconych  $\phi 1500$  mm o długości od 8,0 do 10,0 m. W podstawach pali zastosowano iniekcję cementową według rozwiązania Katedry Geotechniki Politechniki



Rys. 5. Warunki geotechniczne, wiadukty nad ul. Puławską w Piasecznie

Gdańskiej (jak w pkt 2.1). Obciążenie obliczeniowe przekazywane na pojedynczy pal wynosi w zależności od podpory  $Q_r = 2450 \div 2930$  kN.

Bezpośrednio pod warstwą gleby zalegają twardoplastyczne gliny piaszczyste o stopniu plastyczności  $I_L = 0,10 \div 0,25$ , przewarstwione piaskami drobnymi i gliniastymi zróżnicowanej miąższości. Spąg gruntów spoistych w zależności od rozpatrywanej podpory znajduje się na głębokości od 5,0 m p.p.t do ok. 12,0 m p.p.t. Poniżej gruntów spoistych w całym przekroju występują grunty niespoiste w postaci piasków drobnych w stanie zagęszczonym o ( $I_D = 0,80$ ). Większość pali zakończono w twardoplastycznych glinach piaszczystych i dla takich pali wykonane były prezentowane badania. Uproszczony profil geotechniczny wraz z wynikami badań sondą wciskaną CPT (opory  $q_r$  oraz  $f_s$ ) przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 6. Krzywe obciążenie – osiadanie, wiadukty nad ul. Puławską w Piasecznie

Na rozpatrywanym obiekcie w pierwszej kolejności wykonano dwa obciążenia statyczne, a następnie 10 badań dynamicznych pali. Wyniki badań pali w postaci krzywych obciążenie – osiadanie ilustruje rysunek 6.

Porównanie krzywych obciążenie – osiadanie otrzymanych na podstawie badań dynamicznych z krzywymi z próbnymi obciążeniami statycznymi wykazuje większą sztywność dla pali badanych dynamicznie, szczególnie dla nośności granicznej. W zakresie obciążeń zbliżonych do wartości projektowych osiadania dla wszystkich badań wynoszą od 2 do ok. 5 mm. Różne nachylenie krzywych z badań dynamicznych wynika głównie z różnego zagłębienia pali w warstwie nośnej. Dodatkowo dwie „najbardziej płaskie” krzywe otrzymano dla pali wykonanych w najlepszych warunkach gruntowych. Jeden z tych pali został zakończony na kamieniu.

### 3. Podsumowanie

Duże tempo robót budowlanych oraz realizacja prac fundamentowych w bardzo trudnych warunkach gruntowych wymaga obecnie zastosowania nowoczesnych, analitycznych metod obliczeniowych, nowych technologii oraz szybkich, pewnych metod kontroli i odbioru robót.

Badania dynamiczne pali są nowoczesnym sposobem oceny rzeczywistej nośności i osiadań fundamentów palowych. Podstawową zaletą badań dynamicznych jest krótki czas ich realizacji. Bardzo ważne, w stosunku do próbnego obciążenia statycznego, jest wyeliminowanie konieczności montażu urządzeń kotwiących lub (oraz) balastu, mniejszy koszt jednostkowy całego badania. Zalety badań dynamicznych uwidaczniają się również w przypadku, gdy warunki terenowe na budowie utrudniają przeprowadzenie próbnego obciążenia statycznego, np. obiekty mostowe, kolejowe, pale w głębokich wykopach, pale pod konstrukcje w budownictwie wodnym i morskim.

Zgodnie z Eurokodem 7 oraz dobrymi doświadczeniami praktyki inżynierskiej badania dynamiczne (DLT) należy kalibrować za pomocą próbnego obciążenia statycznego, przyjmując je jako badanie korelacyjne dla danego obszaru geotechnicznego.

Aktualnie podstawowe zagadnienie stanowi właściwa interpretacja wyników pomiarów dynamicznych i wiarygodne określenie zależności obciążenie – osiadanie. Temu celowi służy m.in. program badań realizowany przez Zespół Katedry Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Politechniki Gdańskiej. W odniesieniu do badań dynamicznych nośności pali wierconych, na podstawie ok. 150 badań terenowych, wykonano własne analizy wsteczne w celu określenia współczynników tłumienia dla warunków polskich.

W dotychczasowej praktyce inżynierskiej analizy obciążeń dynamicznych wykonano we współpracy z Peterem Middendorpem (firma Profound B.V z Holandii).

Materiał badawczy oraz własne analizy będą podstawą opracowania metody interpretacji z możliwością ich wykorzystania w załączniku krajowym do Eurokod 7.

### Literatura

1. Barends F.B.J.: *Stress Wave Theory to Piles*. Balkema. 4<sup>th</sup> International Conference, Rotterdam 1993.
2. Chiesura G.: *Some dynamic parameters of drilled piles under low and high-energy tests*. "Geoengineering Roads Bridges Tunnels" 1998.
3. Geerling J., Smits M.Th.J.H.: *Prediction of load displacements characteristics of piles from the results of dynamic/kinetic load test*, 1992.
4. Gwizdała K.: *Projektowanie fundamentów na palach*. WPPK, Wisła-Ustroń 2005.
5. Holeyman A.E.: *Technology of pile dynamic testing*. Balkema, Rotterdam 1992.
6. Klingmüller O.: *Dynamische Pfahlprüfung als Optimierungsproblem*. Insitut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1991.
7. Middendorp P., van Veele A.F.: *Application of the characteristic stress wave method in offshore practice*. Poceedings 3<sup>rd</sup> International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes 1986.
8. Rausche F., Goble G.G.: *Pile load test by impact driving*, 1970.
9. Rausche F.: *Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen*. Baugrundtagung. Frankfurt/Main-Höchst 1974, s. 395-409.
10. Rausche F., Goble G.G., Likins G.E.: *Dynamic determination of pile capacity*. J. Geot. Env. Div. ASCE 111, s. 367-383, 1985.
11. Tejchman A., Gwizdała K.: *Zwiększanie nośności pali wierconych*. XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB „Krynica 2001”. Opole-Krynica, 16-21 września 2001, t. 3, s. 299-306.
12. Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T., Blockus M., Słabek A.: *Dynamiczne badania nośności pali wierconych*. XIII KKMGiF Gliwice – Szczyrk, 11-13 czerwca 2003. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Budownictwo” 2003, z. 97, s. 279-294.
13. EN 1997 (2004) *Eurocode 7. Geotechnical design*.
14. PN-EN 1536 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale wiercone*.
15. PN-EN 12699 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe*.
16. ASTM, D4945-00 *Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles*.
17. Recommendations by the Committee 2.1 of the DGGT for the impact testing of piles. *Dynamic Pile Load Test*, (draft) 1997.
18. *Foundation Pile Diagnostic System – User’s Guide*. TNO Building and Construction Research.
19. *Testing of piles: rapid load testing*. 6 November 2007 (draft standard).



# AARSLEFF



Trasa Siekierkowska, Warszawa - posadowienie na palach prefabrykowanych wbijanych



Farma wiatrowa w Karścinie - posadowienie na palach prefabrykowanych wbijanych



Grunwaldzki Center, Wrocław - zabezpieczenie wykopu głębokiego ścianką szczelną



Sopot - zabezpieczenie wykopu ścianką szczelną wciskaną

## Roboty palowe

- Dostawa i instalacja pali prefabrykowanych wbijanych dla posadowienia mostów, konstrukcji inżynierskich oraz obiektów kubaturowych
- Wzmacnianie nasypów i korpusów drogowych
- Posadowianie na palach wbijanych ekranów akustycznych i słupów sieci trakcyjnych
- Instalacja mikropali
- Wbijanie i wwbrowywanie pali stalowych
- 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 grodzic prasą hydrauliczną SILENT PILER
- Ścianki berlińskie
- Iniekcyjne kotwy gruntowe
- Roboty ziemne i odwodnieniowe
- Pomiarы wibracji

## Projektowanie

- Prace projektowe dla potrzeb wykonywanych robót realizowane we własnej pracowni projektowej
- Serwis projektowy - [www.aarsleff.com.pl/serwis.php](http://www.aarsleff.com.pl/serwis.php) - do pobrania rysunki, specyfikacje, wytyczne oraz **KALKULATOR PALI** - program do projektowania fundamentów palowych

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

WARSZAWA KATOWICE GDAŃSK SZCZECIN RZESZÓW POZNAŃ