

*Kazimierz Gwizdała**, *Tadeusz Brzozowski**

BADANIA DYNAMICZNE NOŚNOŚCI PALI

1. Wstęp

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 pozwalają na zadowalające oceny. 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 podejść:

- 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 porównaniu do badań statycznych.

Metody badań dynamicznych początkowo stosowano tylko dla pali wbijanych. Obecnie są one powszechnie wykorzystywane na świecie również dla pali wierconych. W arty-

* Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, Gdańsk

kule 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 potwierdza szereg wykonanych na świecie porównań wyników uzyskanych z obu rodzajów badań; np. [4–7].

W większości norm i wytycznych [13–17] 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:

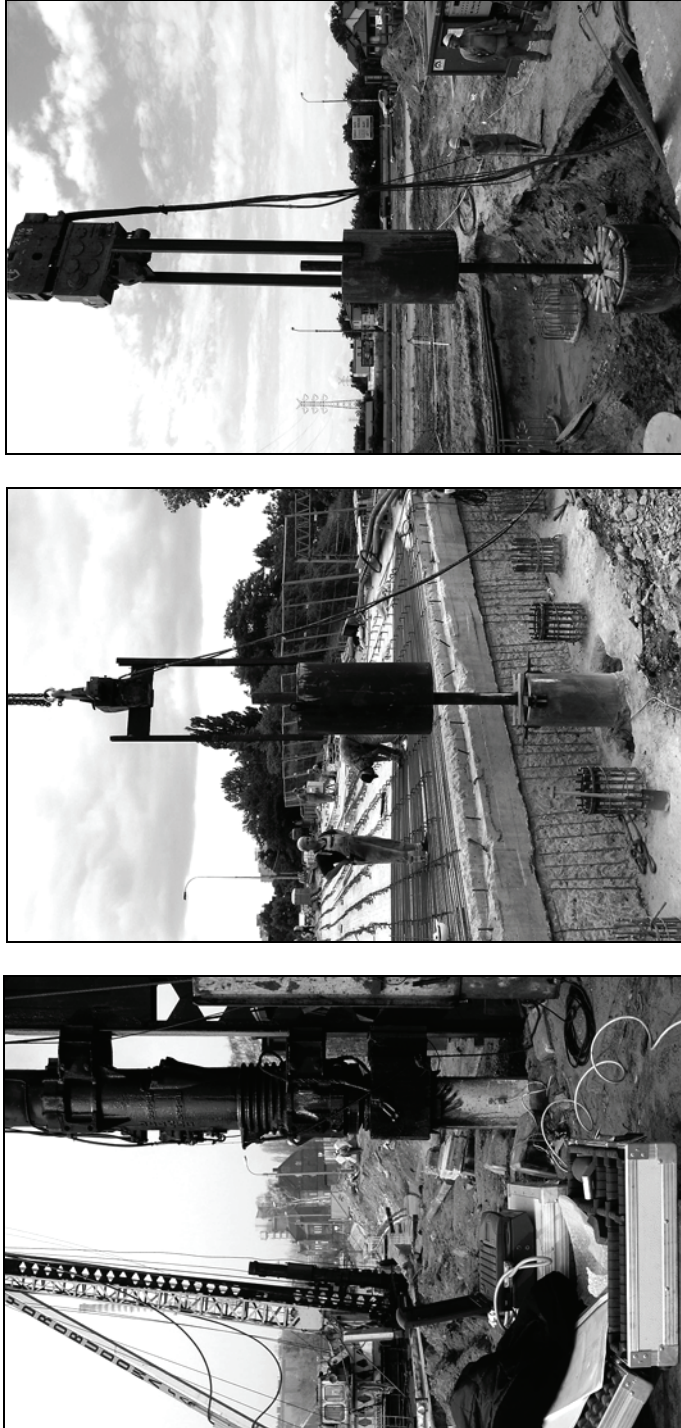
- Wzory dynamiczne — opracowane dla różnych technologii wbijania pali oraz warunków lokalnych.
- Nisko-odkształceniowe (*Low-Strain*) — do sprawdzania długości i ciągłości pali:
 - SIT (*Sonic Integrity Testing*),
 - PIT (*Pile Integrity Testing*).
- Wysoko-odkształceniowe (*High-Strain*) — do sprawdzania nośności pali:
 - DLT (*Dynamic Load Testing*),
 - PDA (*Pile Driving Analysis*).
- Wysoko-odkształceniowe kinetyczne (*Kinetic High-Strain*) — do sprawdzania nośności pali:
 - STATNAMIC — zastosowanie ładunku wybuchowego,
 - DYNATEST — obciążenie tłumione, ze spadającym swobodnie ciężarem.

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

Rejestracji propagacji fali wywołanej uderzeniem bijaka w głowicę dokonuje się najczęściej za pomocą czujników starannie przykręconych do rodzimej (nienadbetonowanej), wyrównanej powierzchni pała po przeciwnych stronach w odległości około 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 między innymi w pracach [1, 5, 18].

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



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

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

2. Modele analityczne stosowane w interpretacji badań dynamicznych pali

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

TABELA 1
Metody interpretacji badań dynamicznych w zależności od stosowanego modelu młot – pal – grunt

Metody bezpośrednie				Metody pośrednie	
CASE	IMPEDANCE	TNO	Maximum TNO	CAPWAP	TNODLT

Badania wykorzystujące modele gruntu, umożliwiające określenie jedynie całkowitych oporów występujących przy wbijaniu pala, 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 (zwanymi również rozszerzonymi), które umożliwiają o wiele lepsze odwzorowanie zarówno charakterystyki mechanicznej pala, jak i samego gruntu. Rozszerzone metody oceny nośności pali za pomocą modeli matematycznych i obliczeń iteracyjnych zostały rozwinięte już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku (metoda CAPWAP — *Case Pile Wave Analysis Program* [9]).

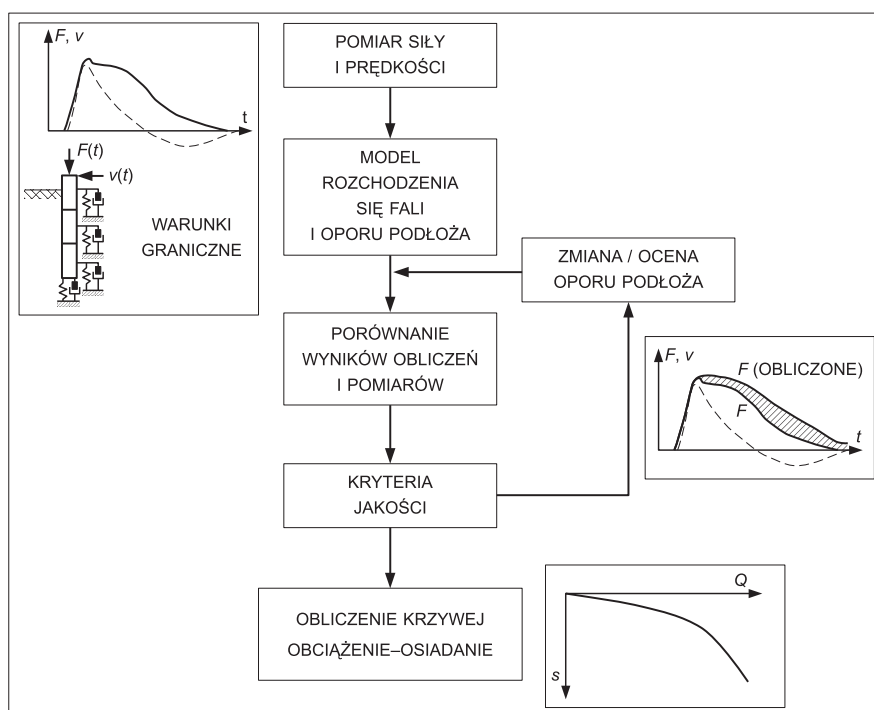
Holenderska metoda rozszerzona zwana TNODLT, wykorzystywana do interpretacji badań przez autorów artykułu, została wprowadzona do badań w latach 80. [1, 7].

W metodach pośrednich wykorzystuje się wykresy siły i prędkości w zależności od czasu, mierzone w głowicy badanego pala. Jednowymiarowa teoria falowa pozwala na ocenę oporu gruntu i obliczenie reakcji pala na uderzenie młota. Rozprzestrzenianie się fali naprężeń w palu 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 pobocznic modelowany jest w punktach dyskretnych wzdłuż pobocznic pała. Warunki początkowe modelu gruntu są przyjmowane na podstawie badań terenowych (najlepiej sondowania statycznego CPT).

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.



Rys. 2. Przebieg generowania modelu oraz iteracyjnego dopasowania sygnału

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 (zobacz Eurocode 7 [13–15]). 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 między innymi w pracach [4, 19].

3. Przykłady wykonanych badań dynamicznych

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

3.1. Most na rzece Rurzyca w dolinie rzeki Odry

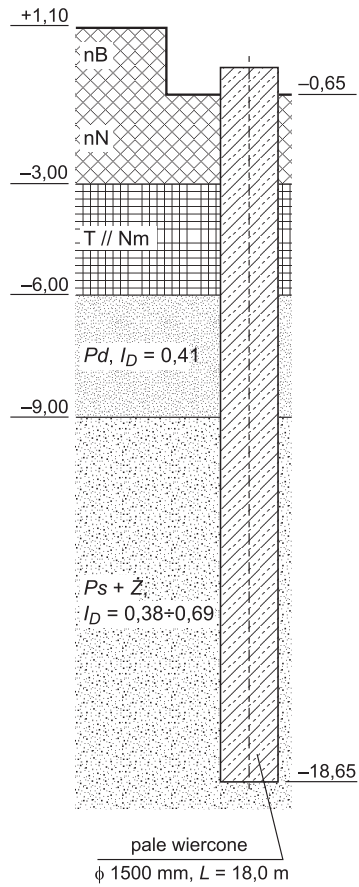
Przedstawiony przykład ilustruje pierwsze samodzielnie zrealizowane przez Zespół badania dynamiczne. Most wykonany w ramach modernizacji drogi krajowej zaprojektowano jako konstrukcję jednoprzęsłową opartą na dwóch przyczółkach, posadowionych na palach wierconych ϕ 1500 mm, o długości 18,0 m. Pod każdą 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 $Q_r = 4070$ kN.

Most zlokalizowany jest na rzece Rurzyca — dopływie rzeki Odry. Pod warstwą nasypów występują grunty organiczne w postaci torfów. Grunty te zalegają do głębokości około 7 m ppt. Poniżej, do głębokości około 10 m ppt., znajdują się piaski drobne pochodzenia aluwialnego, od luźnych do średniozagęszczonych ($I_D = 0,21 \div 0,41$). Pod tą warstwą zalegają piaski średnie ze żwirem w stanie od średniozagęszczonego 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.

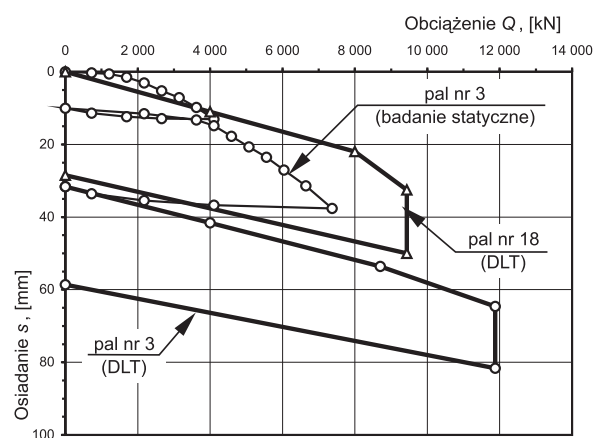
Jako pierwsze wykonano obciążenie statyczne pala nr 3 (przyczółek nr 1), następnie na tym samym palu przeprowadzono badanie dynamiczne. Jako ostatnie wykonano badanie dynamiczne pala nr 18 na przyczółku prawobrzeżnym nr 2.

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.

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.



Rys. 3. Warunki geotechniczne. Most na rzece Rurzyca



Rys. 4. Krzywe obciążenie–osiadanie. Most na rzece Rurzyca

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.

W związku z trudnościami z interpretacją wyników badań nośności, 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.

3.2. Wiadukty drogowe nad ul. Puławską w Piasecznie

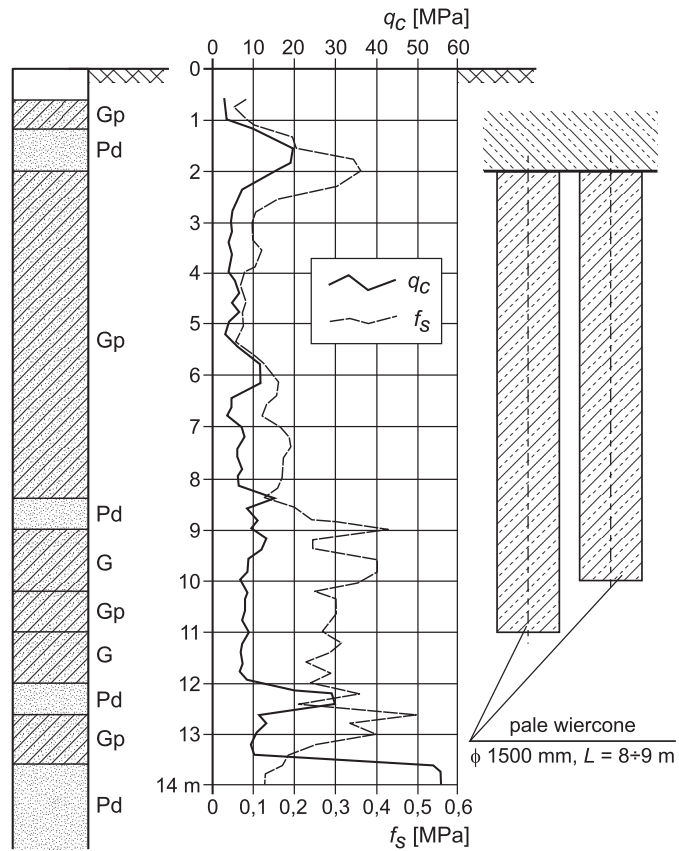
Drugi z prezentowanych przykładów dotyczy jednego z ostatnich obiektów, na którym Zespół wykonał badania dynamiczne. Były to wiadukty drogowe wykonywane w ramach bezkolizyjnego skrzyżowania zlokalizowanego na granicy Warszawy i Piaseczna nad ul. Puławską. Każdą z dwunastu podpór posadowiono na czterech palach wierconych ϕ 1500 mm o długości od 8,0 do 10,0 m. W podstawach pali zastosowano iniekcję cementową według rozwiązania Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej (jak w podrozdz. 3.1). Obciążenie obliczeniowe przekazywane na pojedynczy pał 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 o zróżnicowanej miąższości. Spąg gruntów spoistych, w zależności od rozpatrywanej podpory, znajduje się na głębokości od 5,0 m ppt do około 12,0 m ppt. Poniżej gruntów spoistych w całym przekroju występują grunty niespoiste, głównie w postaci piasków drobnych w stanie bardzo 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_f oraz f_s) przedstawiono na rysunku 5.

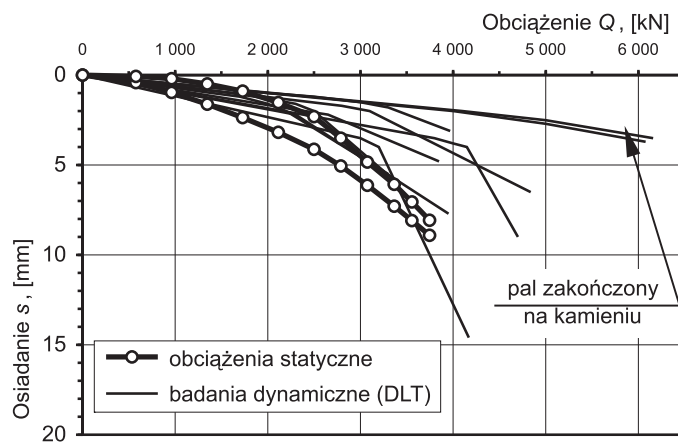
Na rozpatrywanym obiekcie w pierwszej kolejności wykonano dwa obciążenia statyczne, a następnie 10 badań dynamicznych pali. Wyniki badań pali w postaci krzywych obciążenie–osiadanie ilustruje rysunek 6.

Porównanie krzywych obciążenie–osiadanie otrzymanych na podstawie badań dynamicznych z krzywymi z próbnymi obciążeniami statycznymi wykazuje większość sztywność dla pali badanych dynamicznie — szczególnie dla nośności granicznej.

W zakresie obciążeń zbliżonych do wartości projektowych osiadania dla wszystkich badań wynoszą od 2 do około 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.



Rys. 5. Warunki geotechniczne. Wiadukty nad ul. Puławską w Piasecznie



Rys. 6. Krzywe obciążenie-osiadanie. Wiadukty nad ul. Puławską w Piasecznie



4. 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 i 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 między innymi program badań realizowany przez Zespół Katedry Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Politechniki Gdańskiej. W odniesieniu do badań dynamicznych nośności pali wierconych, na podstawie około 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 Eurokodu 7.

LITERATURA

- [1] *Barends F.B.J.*: Stress Wave Theory to Piles. Balkema, 4th International Conference, Rotterdam, 1993
- [2] *Chiesura G.*: Some dynamic parameters of drilled piles under low- and high-energy tests. 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. Wisła – Ustroń, WPPK 2005
- [5] *Holeyman A.E.*: Technology of pile dynamic testing. Rotterdam, Balkema 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 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, France, 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, 395–409
- [10] *Rausche F., Goble G.G., Likins G.E.*: Dynamic determination of pile capacity. J.Geot. Env. Div. ASCE 111, 1985, 367–383



- [11] *Tejchman A., Gwizdala K.*: Zwiększanie nośności pali wierconych. XLVII Konf. Nauk. KILiW PAN i KN PZITB „Krynica 2001”. Opole-Krynica, 16–21 wrzesień, 2001, t. 3, 299–306
- [12] *Tejchman A., Gwizdala K., Brzozowski T., Blockus M., Słabek A.*: Dynamiczne badania nośności pali wierconych. XIII KKMGiF Gliwice – Szczyrk, 11-13 czerwca 2003, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2003, Budownictwo z. 97, 2003, 279–294
- [13] PN-EN 1997 (2004): Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne
- [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. Germany, September 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)