

# Badania dynamiczne pali

T. Brzozowski, M. Blockus

Katedra Geotechniki Politechniki Gdańskiej; tbrzo@pg.gda.pl, mblock@pg.gda.pl

## 1. WSTĘP

W ciągu ostatnich 25 lat nastąpił niezwykle szybki rozwój technik badań dynamicznych pali. Pierwsze próby analizy teoretycznej zjawisk dynamicznych związanych z procesem wbijania pali podjęto na początku XIX w. za pomocą wzorów dynamicznych. Pełniejszą matematyczną interpretację zjawisk dynamicznych z wykorzystaniem mechaniki falowej przedstawiono w latach 30-tych XX wieku (Isaac, 1931). Pierwsze prace związane z rozwiązaniem numerycznym analizowanego zagadnienia przedstawiono dopiero w latach 60-tych ubiegłego wieku (Smith, 1960). Dopiero na początku lat 80-tych XX wieku, w wyniku zastosowania nowoczesnego sprzętu pomiarowego, opartego na mikrokomputerach, metody badawcze oparte na modelach matematycznych doczekały się nowych zaawansowanych rozwiązań.

Aktualnie na świecie dużo więcej uwagi poświęca się praktycznej stronie testów dynamicznych, po to aby jakość badania dorównywała opracowanym modelom matematycznym. Dlatego w ostatnich latach zintensyfikowano prace związane z ulepszaniem sprzętu pomiarowego i doskonaleniem metod interpretacji wyników badań. Ponadto, szczególnym zagadnieniem poddanym powszechnej dyskusji pozostaje kwestia standaryzacji sprzętu i techniki pomiarowej oraz interpretacji wyników badań dynamicznych.

Termin „badania dynamiczne pali” stosowany jest do wszelkich technik badawczych wykorzystujących efekty fizyczne związane z dynamiką tj. generowaniem naprężeń wewnątrz pala, na pobocznicy lub głowicy, wykorzystując do tego spadającą masę, lub nadając mu przyspieszenie w jakikolwiek inny sposób.

Metody badań dynamicznych podzielić można w następujący sposób:

1. Wzory dynamiczne – opracowane dla różnych technologii wbijania oraz warunków lokalnych.
2. Niskonaprężeniowe – do sprawdzania długości i ciągłości pali:
  - a) uderzeniowe (intensywnie rozwijane),
    - Sonic Integrity Testing (SIT),
    - Pile Integrity Testing (PIT),
  - b) ultradźwiękowe – prześwietlenia akustyczne, testy jedno- lub wielootworowe,
  - c) wibracyjne (obecnie niewykorzystywane).
3. Wysokonaprężeniowe – do sprawdzania nośności pali:
  - a) uderzeniowe (intensywnie rozwijane),
    - Dynamic Load Testing (DLT),
    - Pile Driving Analysis (PDA),
  - b) wibracyjne (obecnie niewykorzystywane).
4. Wysokonaprężeniowe kinetyczne – do sprawdzania nośności pali:
  - a) o przedłużonym czasie uderzenia (intensywnie rozwijane):
    - STATNAMIC – obciążenie za pomocą ładunku wybuchowego,
    - DYNATEST – obciążenie tłumione.

Zespół Badawczy pod kierunkiem prof. Andrzeja Tejchmana wykorzystuje do badań aparaturę holenderskiej firmy TNO Building and Construction Research będący własnością przedsiębiorstwa Hydrobudowa Gdańsk S.A. Ponieważ powyższy sprzęt umożliwia wykonywanie badań długości i ciągłości (SIT) oraz nośności pali (DLT, PDA) w niniejszym referacie przedstawiono doświadczenia Zespołu z badań przeprowadzonych powyższymi metodami.

W referacie obok krótkiej charakterystyki wybranych badań dynamicznych (2a i 3a – patrz powyżej) wraz z przykładami testów wykonanych przez Zespół Badawczy szczególną uwagę skupiono na technicznych aspektach przygotowania i wykonywania badań.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE

Młot lub inny ciężar uderzający w głowicę pala generuje w nim falę naprężeń przemieszczającą się w jego trzonie. Wszelkie nieciągłości i oddziaływanie gruntu otaczającego pal generują powstanie fal poruszających się w kierunku przeciwnym do fali wywołującej.

Teoretyczne próby rozwiązań opisujących powyższe zjawisko w układzie trójwymiarowym (Liao, Roesset, 1996) udowodniły iż założenie upraszczające schemat do zjawiska jednowymiarowego (liniowego) jest w praktyce całkowicie uzasadnione.

W jednowymiarowej teorii falowej rozpatruje się przypadek cylindrycznego pręta, nie poddanego oddziaływaniu gruntu ani żadnym zewnętrznym oporom. Do celów praktycznych wykorzystuje się schemat *Młot-Pal-Grunt* umożliwiający przeprowadzenie obliczeń dla większości badań dynamicznych. W takim przypadku równanie jednowymiarowej teorii falowej należy uzupełnić o człony uwzględniające charakterystykę mechaniczną gruntu:

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

gdzie:

$$c \text{ – prędkość propagacji fali naprężeń, } c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

$$Z \text{ – oporność mechaniczna, } Z = \frac{E \cdot A}{c} = A \sqrt{E \cdot \rho},$$

$$E \text{ – moduł sprężystości materiału pala, } (E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \sigma = \frac{F}{A}, \varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x})$$

$F$  – siła osiowa działająca na pal,

$\rho$  – gęstość materiału pala,

$u$  – przemieszczenie,

$x$  – współrzędna w liniowym układzie odniesienia,

$t$  – czas,

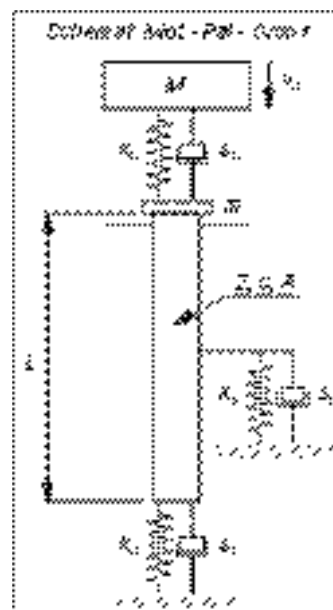
$A$  – powierzchnia przekroju pala,

$M$  – masa młota (masa uderzająca),

$m$  – masa podbębniaka,

$k$  – współczynniki sprężystości ( $k_C, k_S, k_B$ ),

$s$  – współczynniki tłumienia ( $s_C, s_S, s_B$ ).



Powyższe równanie składa się z 4 członów reprezentujących przyspieszenie (bezwładność), odkształcenie, opory gruntu i prędkość (tłumienie). W metodach wysokoenergetycznych wszystkie składowe powyższego równania mają istotny wpływ w opisywaniu zjawiska, natomiast w badaniach kinetycznych oddziaływanie składowej opisującej przyspieszenie jest znikome. W technikach niskoenergetycznych, w pewnych warunkach opory i tłumienie gruntu mogą mieć znaczenie dla wyniku obliczeń, chodzi tu głównie o pale zagłębione w gruntach bardzo spoistych oraz pale o stosunkowo dużej smukłości ( $L/D > 30$ ). Składnik dotyczący przyspieszenia i prędkości jest całkowicie pomijany dla obciążeń statycznych. W takim przypadku zależność redukuje się do równania opisującego obciążenie statyczne (Karkee, 1999). Porównanie wpływu poszczególnych składowych równania różniczkowego opisującego przemieszczenia pala  $u$  w metodach dynamicznych zestawiono w Tablicy 1.

Tablica 1. Porównanie wpływu poszczególnych składowych równania różniczkowego opisującego przemieszczenia pala  $u$  w metodach dynamicznych

$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \frac{k(x)}{AE} u(x,t) + \frac{s(x)}{AE} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0$				
Metody badania	Składowe równania			
	Przyspieszenie (bezwładność)	Odkształcenie	Opory gruntu, sztywność	Prędkość, tłumienie
Niskonaprężeniowe	Istotny	Istotny	Relatywnie mały	Relatywnie mały
Wysokonaprężeniowe	Istotny	Istotny	Istotny	Istotny
Kinetyczne	Mały	Istotny	Istotny	Relatywnie mały
Statyczne	$\approx 0$	Istotny	Istotny	$\approx 0$

Równanie opisujące zmiany przemieszczenia pala w funkcji czasu  $t$  można rozwiązać wykorzystując powszechnie znane techniki numeryczne umożliwiające uwzględnienie warunków brzegowych tj. metody elementów lub różnic skończonych (Goble, 1975; Sakai, 1988) oraz metody analityczne oparte na przekształceniach całkowych (Randolph, 1990; Warrington, 1997).

Rozkład oporów na pobocznicy jest najczęściej zależny od głębokości, rodzaju oraz stanu gruntu. Opór ten wzbudzany jest przez krótkotrwały impuls siły. Uderzenie wywołuje falę ściskającą o określonej długości i kształcie. Porównanie długości fali wymuszającej w stosunku do długości pala może być użyte jako kryterium klasyfikujące rodzaj badania dynamicznego.

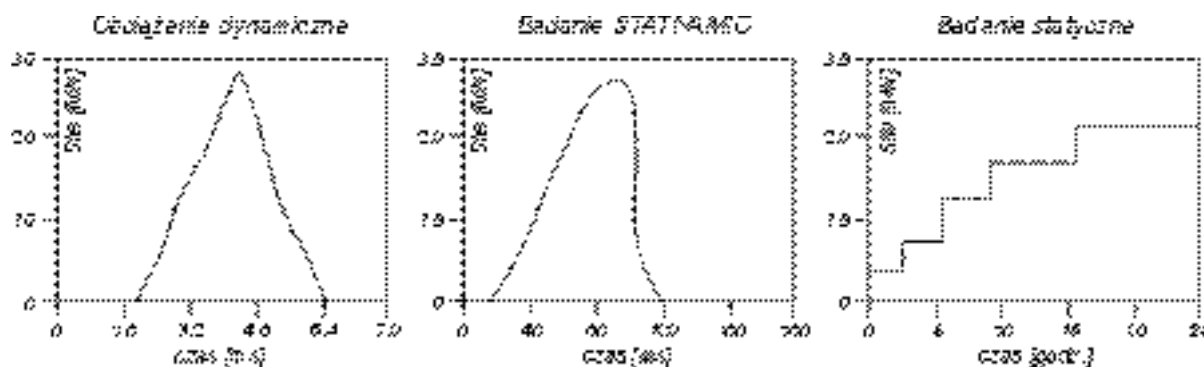
Tablica 2 zawiera zestawienie kluczowych parametrów charakteryzujących poszczególne metody testowania pali. Istotnym wskaźnikiem umożliwiającym identyfikację badania jest względna długość fali  $\lambda$  określona jako stosunek długości fali do podwójnej długości pala ( $2L$ ).

Analizując dane dotyczące względnej długości fali  $\lambda$ , określić można rodzaj badania. I tak o testach niskonaprężeniowych możemy mówić w przypadku względnej długości fali  $\lambda = 0,1$ , testy wysokoenergetyczne nośności pala wymagają wzbudzenia fali o względnej długości  $\lambda = 1$ . Należy zaznaczyć, że w obu przypadkach istnieją ograniczenia co do maksymalnej długości pali poddanych tym badaniom. Impulsy wzbudzające, trwające odpowiednio długo stosowane są w badaniach Dynatest (Gonin, 1984), Statnamic (Birmingham, 1989; Middendorp, Birmingham, Kuiper, 1992) oraz pseudostatycznych (Schellingerhout, Revoorte, 1996) charakteryzują się względną długością fali  $\lambda = 10$ .

Istotnym parametrem mającym kluczowe znaczenie w interpretacji poszczególnych badań jest również czas przyłożenia obciążenia (rys. 1).

Tablica 2. Zestawienie kluczowych parametrów charakteryzujących poszczególne metody testowania pali (Holeyman, 1992)

Parametry	Metody niskonaprężeniowe	Metody wysokonaprężeniowe	Metody kinetyczne	Obciążenia statyczne
Masa reakcyjna	0,5 ÷ 5 kg	2000 ÷ 10000 kg	2000 ÷ 5000kg	–
Maksymalne odkształcenia	0,002 ÷ 0,01‰	0,5 ÷ 1‰	1‰	1‰
Maksymalna siła	2 ÷ 20 kN	2000 ÷ 10000 kN	2000 ÷ 10000 kN	2000 ÷ 10000 kN
Czas trwania impulsu	0,5 ÷ 2 ms	5 ÷ 20 ms	50 ÷ 200 ms	10 <sup>6</sup> ms
Przyspieszenie pala	50 g	500 g	0,5 ÷ 1 g	10 <sup>-14</sup> g
Uzyskiwane przemieszczenia	<0,001mm	10 ÷ 30 mm	50 mm	> 20 mm
Względna długość fali $\lambda$	0,1	1	10	10 <sup>7</sup>



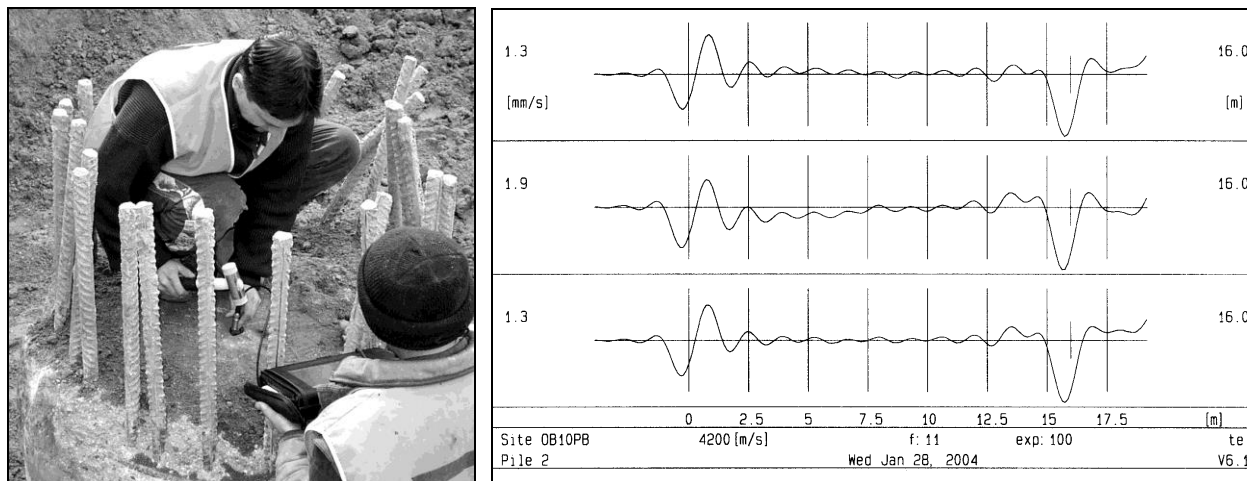
Rys. 1. Porównanie czasu przyłożenia obciążenia dla różnych metod badań (Bermingham Corp.)

### 3. BADANIA DŁUGOŚCI I CIĄGŁOŚCI PALI – SONIC INTEGRITY TESTING (SIT)

Młotek lub bijak uderzający w głowicę generuje falę naprężeń przemieszczającą się w trzonie pala. Kolejne fazy propagacji tej fali rejestrowane są za pomocą akcelerometru umieszczonego na głowicy pala (Holeyman 1992; Fleming, 1994; Liao, Roesset, 1997; Tejchman, 2000; Seitz, Schmidt, 2000; Blockus, 2001; Gwizdała, 2001, 2004). Podstawy teoretyczne metody opracowane zostały przez Instytut TNO (Holandia) i CETB (Francja).

Najbardziej znane niskonapężeniowe metody dynamiczne polegają na uderzeniu w głowicę pala specjalnym ręcznym młotkiem wraz z jednoczesnym rejestrowaniem przyspieszenia w głowicy. Podstawowym zadaniem testów niskonapężeniowych jest określenie długości i ciągłości pala. Badanie to pozwala również wykryć nieprawidłowości i uszkodzenia struktury pala, zastosowanie gorszego materiału w konstrukcji, powstanie pęknięć i przewężeń. Dodatkowo można określić także pewne relacje pomiędzy palem i otaczającym go gruntem. Jediną informacją jaką musimy posiadać aby przeprowadzić badanie są dane dotyczące materiału, z którego wykonano pal. Na tej podstawie możemy wstępnie określić prędkość rozchodzenia się fali w badanym palu. Przydatna jest również informacja o orientacyjnej długości pala (np. długość projektowana) – nie jest to jednak informacja konieczna.

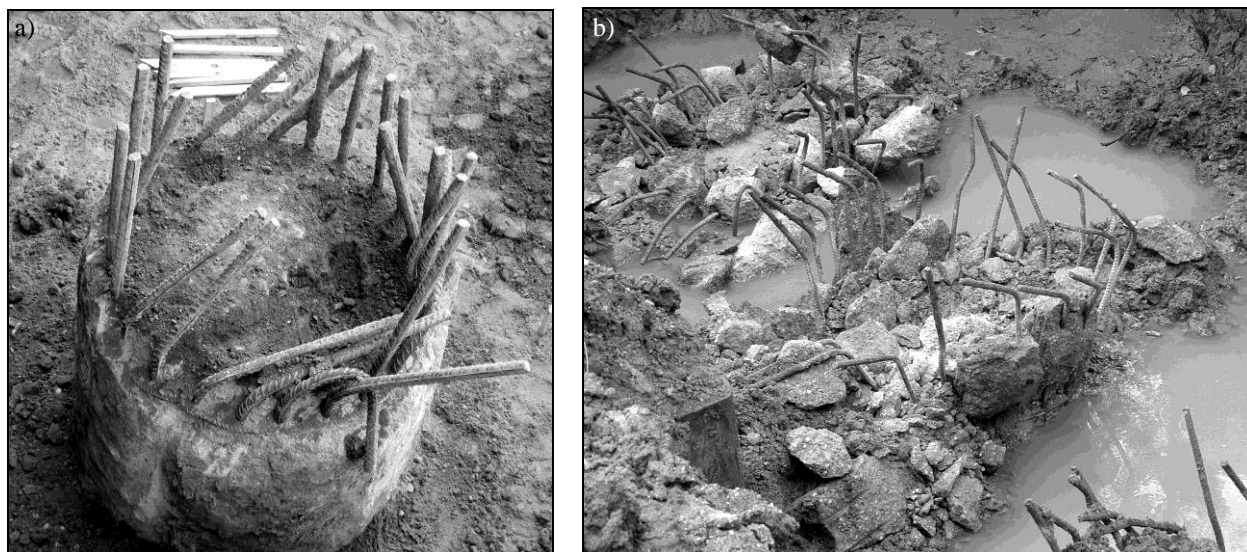
Sygnal mierzony akcelerometrem przesyłany jest poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy z systemem wzmacniaczy i filtrów w karcie PCMCIA podłączonej do komputera przemysłowego (rys. 2). W celu wykluczenia błędów w pomiarach badanie na jednym palu wykonuje się przynajmniej trzykrotnie. Badanie ciągłości jednego dobrze przygotowanego pala trwa około 5 minut.



Rys. 2. Przeprowadzanie badania ciągłości pala oraz wyniki badania w postaci trzech testów

Badanie ciągłości pala wykonane może być dopiero po osiągnięciu przez beton odpowiedniej wytrzymałości, nie wcześniej niż 14 dni od zabetonowania pala. Ma to bezpośredni związek z prędkością rozchodzenia się fali. W palu, którego beton jest niedojrzały propagacja fali naprężeń jest wolniejsza oraz rejestruje się bardzo zakłócone sygnały.

W celu prawidłowego wykonania badania konieczne jest odpowiednie przygotowanie głowicy pala. Do badania należy skuć głowicę do „zdrowego betonu” oraz wyrównać (lub wyszlifować) fragment wierzchniej części głowicy o powierzchni około  $20 \times 20$  cm zlokalizowany blisko osi pala. Głowice pali wytypowanych do badania powinny mieć taką samą średnicę jak trzon pala, nie powinny mieć zgrubień i ubytków a powierzchnia głowicy musi być sucha (rys. 3).



Rys. 3. Głowice pali do badania długości i ciągłości: a) dobrze przygotowane, b) źle przygotowane



#### 4. BADANIA DYNAMICZNE NOŚNOŚCI PALI – DYNAMIC LOAD TESTING (DLT)

Metody badań dynamicznych, początkowo stosowane tylko dla pali wbijanych, są wykorzystywane na świecie również dla pali wierconych. Metoda dynamicznego określania nośności pali w porównaniu do badań statycznych eliminuje konieczność montowania konstrukcji kotwiących lub balastowych oraz umożliwia przeprowadzenie w ciągu jednego dnia kilku badań nośności pali.

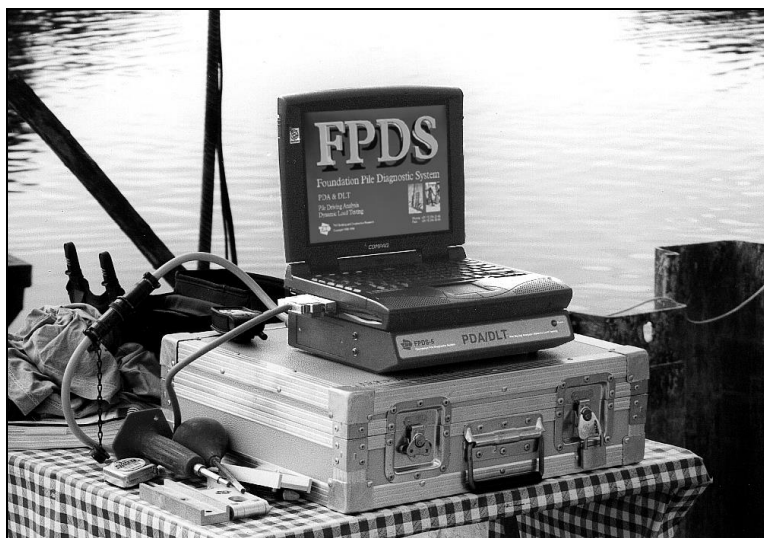
Metoda ta uznawana jest za porównywalną z badaniem statycznym umożliwiając ocenę nośności badanych pali. Potwierdza to szereg wykonanych na świecie porównań wyników uzyskanych z obu badań (Middendorp, Van Veele, 1986; Klingmüller, 1991; Geerling, Smits, 1992; Chiesura, 1998). W większości przypadków badań dynamicznych pali wykonywanych w gruncie na świecie zaleca się jednak wykonać jako korelacyjne przynajmniej jedno próbne obciążenie statyczne dla kilku przeprowadzonych prób dynamicznych (patrz również Eurocode 7).

Dynamiczne badanie nośności polega na wykorzystaniu zjawiska rozchodzenia się fali naprężeń w palu podczas jego wbijania (uderzenie młotem kafara) lub wywołanie fali naprężenia uderzeniem bijaka. W przypadku pala wykonywanego w gruncie badanie przeprowadza się po wykonaniu pala (zakończeniu okresu dojrzewania betonu).

Za pomocą odpowiednio zamontowanych czujników (rys. 4) następuje pomiar przyspieszenia i naprężeń w głowicy pala. Przenośny komputer (przy współpracy ze specjalnie zaprojektowanym wzmacniaczem i przetwornikiem sygnałów) rejestruje dane (rys. 5). Wielkości zarejestrowane podczas uderzenia oraz charakterystyka podłoża opracowana w oparciu o rozpoznane wcześniej warunki gruntowe umożliwiają opisanie modelu analitycznego układu *Młot-Pal-Grunt*, za pomocą którego określa się nośność pala oraz ekwiwalentną do statycznej, zależność obciążenie-osiadanie. Szczegółowy opis podstaw teoretycznych oraz metod badań dynamicznych przedstawiony jest między innymi w pracach: Barends, 1993; Holeyman, 1992; FPDS-User's Guide.



Rys. 4. Czujniki zamontowane na palu



Rys. 5. Komputer i wzmacniacz sygnałów

Głównym elementem służącym do wywoływania fali naprężeń w palu wierconym jest bijak o ciężarze równym minimum  $1 \div 2\%$  nośności pala. Wykonany jest on ze stali lub jednolitej bryły zbrojonego betonu w osłonie z rury stalowej (rys. 6). Bijak podnoszony jest za pomocą urządzenia zapewniającego swobodne jego uwalnianie. Pozwala to na bezwładne uderzenie w głowicę badanego pala. Prowadnica zamocowana do głowicy pala ma zapewnić centryczne uderzenie bijaka w pal. Swobodne zwolnienie bijaka można zrealizować poprzez:

- zastosowanie dźwigu lub pomocniczego żurawia wiertnicy, który ma możliwość swobodnego wyczepiania liny (rys. 6a, 6b),
- zastosowanie wibromłota do podnoszenia i opuszczania bijaka; w tym przypadku konieczne będzie wykonanie dodatkowego uchwytu zakończonego stalową płytą (rys. 6c, 6d, 6e).



Rys. 6. Dynamiczne badania nośności pali wierconych:

- a) pal  $\phi$  1500 mm, bijak o ciężarze 48,5 kN, dźwig z możliwością swobodnego wyczepiania liny,
- b) pal  $\phi$  1500 mm, bijak o ciężarze 67 kN, dźwig Sennebogen 665 z możliwością jak wyżej,
- c) pal  $\phi$  1200 mm, bijak o ciężarze 132 kN, wyczepianie liny wibromłotem,
- d) pal  $\phi$  1500 mm, bijak o ciężarze 67 kN, wyczepianie liny wibromłotem,
- e) pal  $\phi$  1200 mm, bijak o ciężarze 67 kN, wyczepianie liny wibromłotem.



## 5. MODELE ANALITYCZNE STOSOWANE W BADANIACH DYNAMICZNYCH PALI



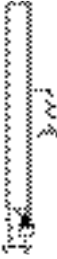


Interpretację wyników badań dynamicznych wykonuje się za pomocą programów komputerowych opracowanych przy założeniu kilku różnych modeli układu *Młot-Pal-Grunt*.

Analizy, w których oddziaływanie gruntu modelowane jest jedynie pod podstawą pala i ewentualnie w dodatkowym punkcie na jego pobocznicę gruntu nazywamy **metodami bezpośrednimi**. Najbardziej popularnymi z nich są: metoda CASE (opracowana w Case Institute of Technology: Rausche, Goble, 1970), metoda IMPEDANCE oraz holenderska metoda TNO (Technical Netherlands Organization). Testy bezpośrednie wykorzystywane mogą być jedynie dla pali o jednorodnym kształcie i strukturze. Metody te są szczególnie wrażliwe na nieprawidłowy dobór prędkości rozprzestrzeniania się fali naprężeń, stałych tłumienia i sprężystości gruntu. Błędny dobór tych parametrów powoduje uzyskanie niepoprawnych wyników testu.

Pale o niejednorodnym kształcie i strukturze a w szczególności w złożonych warunkach gruntowych powinny być analizowane **metodami pośrednimi** umożliwiającymi o wiele lepsze odwzorowanie zarówno charakterystyki mechanicznej pala jak i samego gruntu (tablica 3).

Pośrednie (rozszerzone) metody oceny nośności pali za pomocą modeli matematycznych i obliczeń iteracyjnych zostały rozwinięte w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku (metoda CAPWAP: Rausche, 1974). Holenderska metoda pośrednia zwana TNODLT (wykorzystywana do interpretacji przez Zespół Badawczy) została wprowadzona w latach osiemdziesiątych (Middendorp, Van Veele, 1986; Barends, 1993).

Tablica 3. Sposoby interpretacji wyników badania wysokonapężeniowego (FPDS, User's Guide)

Warunki rzeczywiste	Metody bezpośrednie			Metody pośrednie
	CASE	Impedance	TNO	TNODLT, CAPWAP
				

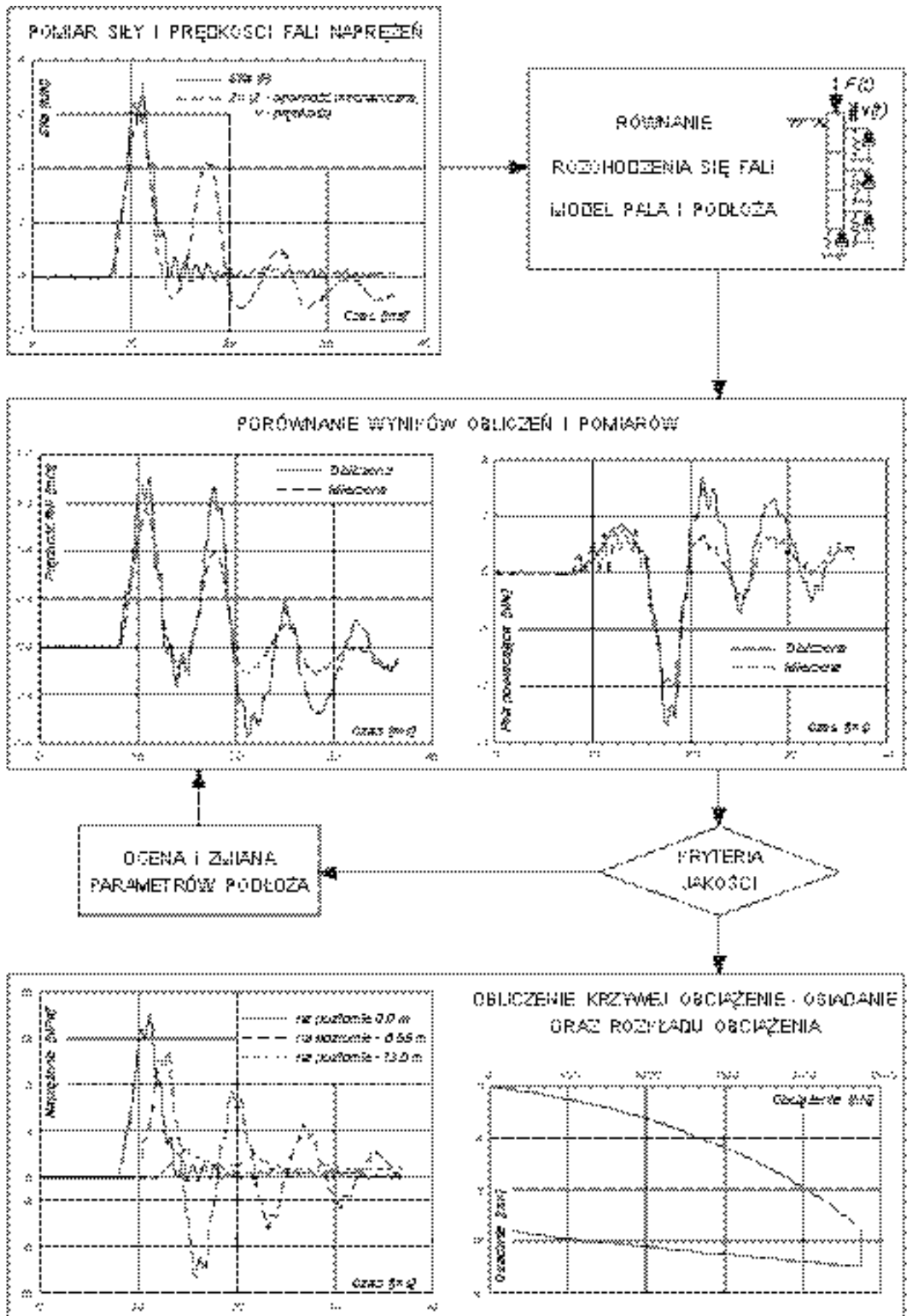
W metodach rozszerzonych, podobnie jak w metodach bezpośrednich, do analizy wykorzystuje się wykresy siły i prędkości w zależności od czasu, otrzymane na podstawie pomiaru przyspieszenia i naprężenia w głowicy badanego pala. Jednowymiarowa teoria falowa pozwala na ocenę oporu gruntu i obliczenie reakcji pala na uderzenie młota (lub bijaka).

Rozprzestrzenianie się fali naprężenia w palu i przekazanie energii do gruntu oparte są na modelu numerycznym, w którym opór gruntu podzielono na statyczny i dynamiczny. Do opisu oporu statycznego gruntu przyjęto model sprężysto-plastyczny natomiast opór dynamiczny reprezentuje lepki tłumik. Opór pobocznicę modelowany jest w punktach dyskretnych wzdłuż pobocznicę pala. Parametry modelu będące warunkami początkowymi są wstępnie przyjmowane na podstawie własności mechanicznych gruntu i pala.

Warunkiem granicznym numerycznego modelu układu pal-grunt jest prędkość w głowicy pala. W równaniach równowagi wykorzystuje się znajomość siły w głowicy pala. Przebieg zmienności tej siły w czasie odpowiada przebiegowi prędkości; dlatego mając zmierzoną jedną z tych wielkości można obliczyć drugą. Siła obliczona, zależna od parametrów oporu gruntu, może być porównana ze zmierzoną w czasie badania. Parametry modelu są dostosowywane w kolejnych iteracjach (rys. 7) aż do najlepszego możliwego dopasowania pomiędzy krzywymi siły: obliczoną i pomierzoną.

Analiza dynamiczna może być odwrócona przy wykorzystaniu pomiaru siły w głowicy pala jako warunku granicznego. Proces iteracyjny przeprowadza się wtedy do momentu jak najlepszego dopasowania krzywych prędkości (mierzonej i obliczonej).

Parametry oporu gruntu obliczone w powyższy sposób są reprezentatywne w odniesieniu do statycznego i dynamicznego zachowania się pala (Rausche, Goble, Likins, 1985). Wynikiem przedstawionej analizy jest rozkład oporów na pobocznicę i pod podstawą pala. Otrzymane statyczne parametry gruntu są następnie wykorzystane do obliczenia przebiegu statycznego obciążenia pala i skonstruowania krzywej obciążenie-osiadanie w głowicy pala. Jest to zależność ekwiwalentna do krzywej obciążenie-osiadanie otrzymanej z obciążenia statycznego.



Rys. 7. Generowanie modelu poprzez iteracyjne dopasowywanie sygnału



## 6. WARUNKI PRAWIDŁOWEGO WYKONANIA BADAŃ DYNAMICZNYCH NOŚNOŚCI PALI

W ciągu ostatnich kilku lat Zespół Badawczy wykonał kilkadziesiąt badań dynamicznych pali. Doświadczenie zdobyte w tym czasie pozwala na sformułowanie warunków dotyczących przygotowania i wykonania badań jakie muszą być spełnione aby badanie można było poprawnie przeprowadzić a następnie zinterpretować.

Badania powinny być przeprowadzone po osiągnięciu 28-dniowej wytrzymałości betonu pala, nie wcześniej jednak niż 14 dni od zabetonowania głowicy pala. W przypadku zastosowania dodatków przyspieszających wiązanie betonu okres ten może być skrócony. Nie należy jednak za bardzo skracać tego czasu gdyż może to spowodować pęknięcie głowicy w czasie badania (rys. 8).



Rys. 8. Pęknięcie głowicy pala w czasie badania dynamicznego

Głowicę pala do próbnego obciążenia należy wykonać w rurze osłonowej o średnicy równej średnicy badanego pala. Betonowanie głowicy należy wykonać najlepiej w tym samym czasie co betonowanie pala. W przypadku gdy betonowanie głowicy odbywa się po pewnym czasie od betonowania pala – przed betonowaniem głowicy wierzch pala należy skuć i starannie oczyścić. Wierzch głowicy musi być starannie wyrównany i wypoziomowany.

Najczęstszą przyczyną otrzymywania słabej jakości sygnałów (które mogą nie pozwolić na poprawne wykonanie interpretacji) jest źle wykonany styk głowicy pala z jego trzonem. Złe skucie trzonu pala przed zabetonowaniem głowicy lub słaba wytrzymałość betonu głowicy powodują, że fala naprężeń przechodząc przez ośrodek o zupełnie innej charakterystyce zostaje bardzo rozproszona. Podobny efekt powoduje nieprawidłowe zabetonowanie głowicy w postaci niejednorodnego betonu z kawernami i rysami skurczowymi. Na rysunku 9 przedstawiono dwa przypadki źle przygotowanych głowic do badań dynamicznych.



Rys. 9. Głowice pali źle przygotowane do badań dynamicznych

Jak już wcześniej wspomniano rejestracja propagacji fali wywołanej uderzeniem młota (bijaka) w głowicę pala odbywa się za pomocą dwóch czujników starannie przykręconych do wyrównanej (płaskiej) rodzimej, nienadbetonowanej powierzchni pala po przeciwległych stronach lica pala (rys. 4).

Prawidłowe przyleganie czujników do pala zapewnia poprawną rejestrację sygnałów. W szczególnych przypadkach dopuszcza się mocowanie czujników na nadbetonowanej głowicy, jednak należy liczyć się wtedy z możliwością osłabienia sygnałów naprężeń.

Przed rozpoczęciem badania na podstawie prowadnicy należy ułożyć podkładki z suchego twardego drewna. Zapewniają one prawidłowe tłumienie uderzenia dynamicznego oraz równomierne przyłożenie obciążenia na całą powierzchnię głowicy. Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że najlepsze sygnały rejestruje się stosując na podkładkę drewno dębowe lub bukowe.

Dla każdego badanego pala wykonuje się serię uderzeń opuszczając bijak z różnych wysokości. Badanie rozpoczyna się od uderzenia z wysokości 0,5 lub 1,0 m a kończy na 3,0 do 3,5 m. W przypadku optymalnie dobranego ciężaru bijaka (w stosunku do nośności pala) najlepsze sygnały, przy jednoczesnym największym zmobilizowanym oporze gruntu uzyskuje się zazwyczaj dla uderzeń wykonanych z wysokości 1,5 do 2,5 m. Największym problemem jest takie ustawienie urządzenia zwalniającego aby bijak spadał idealnie pionowo i uderzał płasko w głowicę.

Kolejnym ważnym warunkiem determinującym prawidłowe przeprowadzenie badania jest temperatura otoczenia. Zgodnie ze specyfikacją techniczną urządzeń badania mogą być przeprowadzane w temperaturze otoczenia powyżej 5°C. Spowodowane jest to kilkoma czynnikami. Najważniejszym z nich jest konstrukcja czujników do pomiaru naprężeń oparta na tensometerach kalibrowanych w dodatniej temperaturze. Zakres pracy czujników tensometrycznych powoduje, że w niskich temperaturach uzyskuje się zakłócone sygnały, które później nie dają się interpretować. Istnieje również obawa, że w niskich temperaturach mogłoby nastąpić pęknięcie wykonanych z aluminium czujników z uwagi na zmniejszoną ich wytrzymałość.

Dodatkowo nasze doświadczenia w wykonywaniu badań dynamicznych wskazują, że temperatura otoczenia miała zawsze duży wpływ na jakość rejestrowanych sygnałów. Wiele badań wykonanych w temperaturze około 5°C charakteryzowało się sygnałami niskiej jakości, które powodowały duże problemy z interpretacją wyników, a co za tym idzie również z ich wiarygodnością.

## 7. PRZYKŁADY WYKONANYCH BADAŃ DYNAMICZNYCH

Poniżej zaprezentowano przykłady badań dynamicznych nośności pali wierconych dla dwóch wybranych obiektów.

Szerszy opis wykonanych badań oraz wyniki porównawcze prezentowano już między innymi w czasopiśmie Inżynieria i Budownictwo (Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T., Blockus M, 2002) oraz na XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania (Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T., Blockus M, Słabek A., 2003).

Przykład przedstawiony w punkcie 7.1 ilustruje pierwsze samodzielnie zrealizowane przez Zespół badania dynamiczne. Drugi przykład dotyczy jednego z ostatnich obiektów, na którym wykonano badania. Na obu obiektach wykonano po dwa obciążenia dynamiczne oraz po jednym statycznym.

### 7.1. Most przez rzekę Rurzycę koło Ognicy

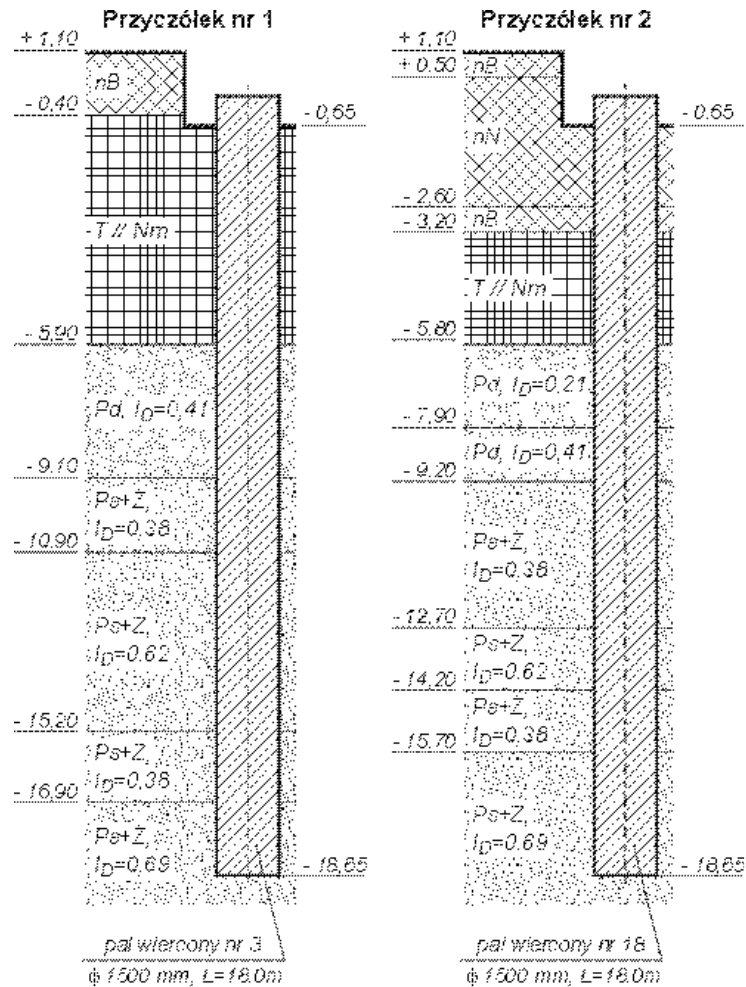
Obiekt wykonano w ramach modernizacji drogi krajowej nr 122 pomiędzy Ognicą a Krajnikiem Dolnym. Most zaprojektowano jako konstrukcję jednoprzęsłową opartą na dwóch przyczółkach posadowionych na palach wierconych  $\phi$  1500 mm, o długości 18,0 m. Pod każdą z podpór zastosowano po 10 pali z iniekcją pod podstawami według technologii opracowanej w Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej. Obciążenie obliczeniowe przekazywane na pojedynczy pal wynosi  $Q_r = 4073$  kN.

Most zlokalizowany jest w dolinie rzeki Rurzycy. Pod warstwą świeżych nasypów występują grunty organiczne w postaci torfów. Grunty te zalegają do głębokości około 6 ÷ 7 m ppt. Poniżej do głębokości około 10 m ppt. występują 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 średniozagęszczonym do zagęszczonego. Uproszczone profile geotechniczne dla obydwu podpór przedstawiono na rys. 10.

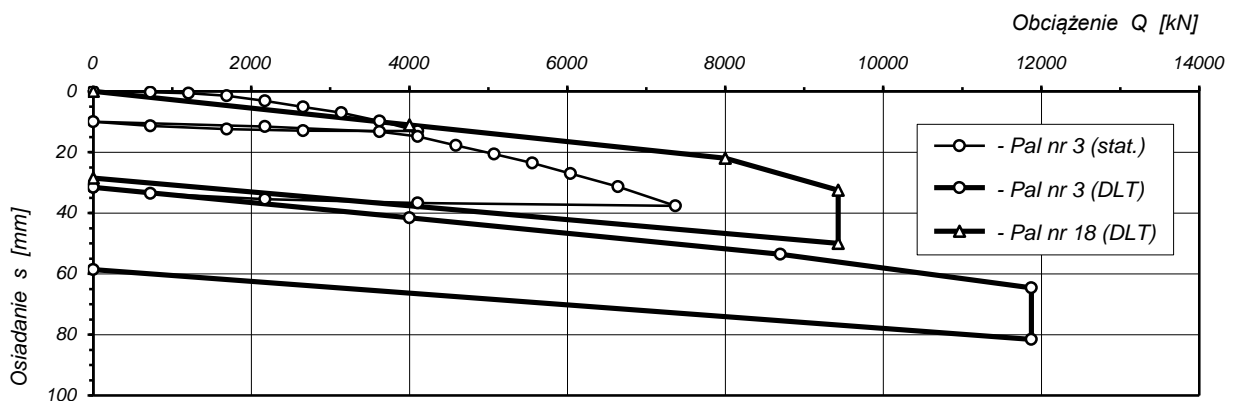
Na rozpatrywanym obiekcie jako pierwsze wykonano obciążenie statyczne pala nr 3 (przyczółek nr 1), następnie na tym samym palu jako korelacyjne przeprowadzono badanie dynamiczne. Jako ostatnie wykonano badanie dynamiczne pala nr 18 na przyczółku nr 2.

Wyniki badań pali w postaci krzywych obciążenie-osiadanie przedstawiono na rys. 11. Krzywą z badania dynamicznego dla pala nr 3 wrysowano poniżej krzywej z obciążenia statycznego traktując próbę dynamiczną jako kontynuację badań.

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



Rys. 10. Warunki geotechniczne. Most przez rzekę Rurzycę koło Ognicy



Rys. 11. Krzywe obciążenie-osiadanie. Most przez rzekę Rurzycę koło Ognicy

## 7.2. Wiadukt nad Autostradą A4

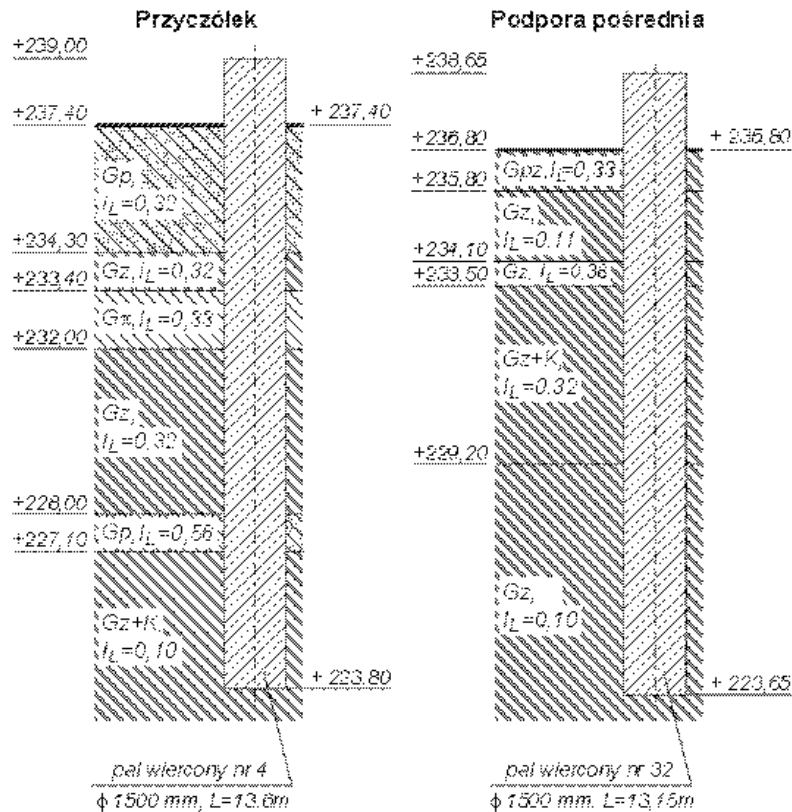
Obiekt zlokalizowany jest nad autostradą A4 na odcinku Kleszczów – Sońnica, km 298+200. Obiekt jest wiaduktem dwuprzęsłowym. Posadowienie podpór wiaduktu zaprojektowano na palach wierconych, wielkośrednicowych o średnicy  $\phi 1500$  mm i długości  $L = 14,0$  m. Pod przyczółkami zastosowano po jednym rzędzie 12 pali w rozstawie 3,0 m, a pod podporą pośrednią 24 pale w dwóch rzędach, w rozstawie 3,0 m w obu kierunkach. Przewidywane pionowe obciążenia obliczeniowe pojedynczego pała w przyczółkach i filarze wynoszą  $Q_r = 3805$  kN.



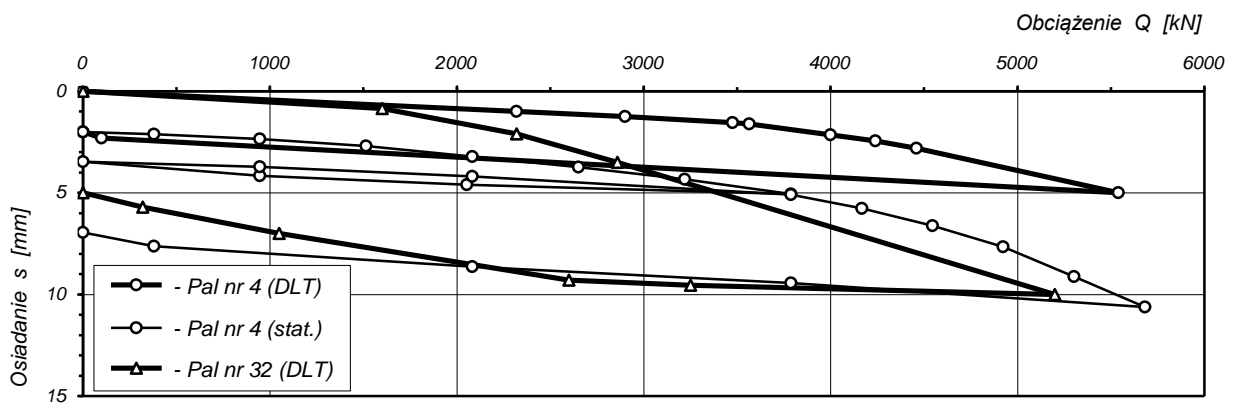
Podłoże gruntowe zbudowane jest głównie z gruntów spoistych. Od poziomu terenu do głębokości 10.0 ÷ 14.0 m występują gliny piaszczyste i gliny piaszczyste zwięzłe w stanie twardoplastycznym i lokalnie plastycznym. Poniżej stan glin przechodzi w półzwały. Występują również lokalne domieszki piasków średnich i żwirów. Grunty takie występują aż do podstaw pali i poniżej. Uproszczone profile geotechniczne dla obydwu podpór przedstawiono na rys. 12.

Na rozpatrywanym obiekcie jako pierwsze wykonano obciążenia dynamiczne obu pali a następnie jako korelacyjne badanie statyczne pala nr 4 (przyczółek).

Wyniki badań pali w postaci krzywych obciążenie-osiadanie przedstawiono na rys. 13. Krzywą z badania statycznego dla pala nr 4 wrysowano poniżej krzywej z obciążenia dynamicznego traktując próbę statyczną jako kontynuację badań.



Rys. 12. Warunki geotechniczne. Wiadukt nad Autostradą A4



Rys. 13. Krzywe obciążenie-osiadanie. Wiadukt nad Autostradą A4

Porównanie krzywych obciążenie-osiadanie uzyskanych na podstawie badań dynamicznych z krzywą z próbnego obciążenia statycznego również wykazuje zgodność wartości osiadań uzyskanych z obu rodzajów badań dla obciążeń zbliżonych do wartości projektowych. W tym przypadku (odwrotnie niż dla pali wykonanych w Ognicy) jako pierwsze wykonano badania dynamiczne.

Przedstawione przykłady wyraźnie wskazują na pewną trudność w interpretacji badań w przypadku gdy na jednym palu wykonywane są zarówno badania statyczne jak i dynamiczne. Mimo dość wysokiej zgodności obu krzywych trudno jest jednoznacznie określić dla jakiej wartości osiadań należy rozpocząć wykres kolejnego badania przeprowadzonego na tym samym palu.

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

## 8. PODSUMOWANIE

Podstawową zaletą metod badań dynamicznych pali jest krótki czas potrzebny do przeprowadzenia badań, szczególnie w przypadku badań długości i ciągłości pali. W sprzyjających warunkach doświadczony inżynier może wykonać ponad kilkudziesiąt badań jednego dnia. W przypadku dynamicznych badań nośności pali udało się przeprowadzić nawet 6 badań jednego dnia.

Bardzo ważne, w stosunku do próbnego obciążenia statycznego, jest wyeliminowanie konieczności montażu urządzeń kotwiących oraz mniejszy koszt jednostkowy badania. Szczególne zalety badań dynamicznych docenić można również w przypadku, gdy warunki techniczne lub terenowe utrudniają przeprowadzenie próbnego obciążenia statycznego.

Aby w pełni wykorzystać zalety badań dynamicznych należy jednak przestrzegać ściśle warunków dotyczących przygotowania i wykonania badań, które omówiono szerzej w niniejszym referacie. Zgodnie z Eurocode 7, badania dynamiczne (DLT) należy kalibrować za pomocą próbnego obciążenia statycznego, traktowanego jako badanie korelacyjne, dla danego obszaru posadowienia.

Wykonanie większej liczby badań DLT pozwoli w przyszłości (zgodnie z Eurocode 7), na wprowadzenie odpowiednich współczynników bezpieczeństwa oraz lepsze wykorzystanie pali przy zachowaniu bezpieczeństwa konstrukcji.

Należy podkreślić, że w wielu krajach opracowano już normy, projekty norm lub zalecenia dotyczące zasad stosowania metody dynamicznej do określania nośności pali. Są to między innymi:

- prEN 1997-1. Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1 – General rules. Final draft, October 2001,
- ASTM, (2000): D 4945 – 00: Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles,
- German Society for Geotechniques (DGGT), 1998: Recommendations for Static and Dynamic Pile Test.

W nowej wersji polskiej normy palowej konieczne jest wprowadzenie dopuszczalności i zasad stosowania tego typu badań w praktyce (zobacz Eurocode 7, p. 7.5.3). Warto dodać, że obecnie na świecie wprowadzono już nową udoskonaloną metodę badania łączącego cechy obciążenia statycznego i badania dynamicznego znaną pod nazwą „STATNOMIC”. Opis tej metody w literaturze polskiej znaleźć można w pracach Tejchmana (2000) i Gwizdały (2001, 2004).

## LITERATURA

1. Barends F.B.J. (1993). Stress Wave Theory to Piles. Balkema, 4<sup>th</sup> International Conference, Rotterdam.
2. Blockus M. (2001). Analiza pracy pali w podłożu gruntowym na podstawie badań dynamicznych. Politechnika Gdańska, Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska. Praca przejściowa na studium doktoranckim (opiekun naukowy: K. Gwizdała), Gdańsk, lipiec 2001.
3. Chiesura G. (1998). Some dynamic parameters of drilled piles under low- and high-energy tests.
4. Geerling J., Smits, M.Th.J.H. (1992). Prediction of load displacements characteristics of piles from the results of dynamic/kinetic load test.
5. Gwizdała K. (2001). Badanie konstrukcji podziemnych in situ. WPPK, Ustroń 2001.
6. Gwizdała K. (2004). Kontrola nośności pali i jakości robót palowych. Seminarium „Fundamenty palowe i głębokie”. Warszawa, 2 marca 2004, s. 37-62.
7. Holeyman A.E. (1992). Technology of pile dynamic testing. Balkema, Rotterdam.

8. Isaac D.V. (1931). Reinforced Concrete Pile Formulae. Transaction of the Institution of Engineers, Australia, Vol. 12, s. 312-323.
9. Karkee M.B. (1999). Insight on pile behaviour from various loading test methods, Geotech 2000, Developments in Geotechnical Engineering, Bangkok, Thailand.
10. Klingmüller O. (1991). Dynamische Pfahlprüfung als Optimierungsproblem. Insitut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig.
11. Liao S.T., Roesset J.M. (1997). Dynamic response of intact piles to impulse loads, Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol.21, s. 255-275.
12. Middendorp P., Bermingham P., Kuiper B. (1992). Statnamic load testing of foundation piles. Proc. 4 th Int. Conf. App. of Stress wave Theory to piles, The Hague, Bakena, Rotterdam, s. 581-588.
13. Middendorp P., Van Veele A.F. (1986). Application of the characteristic stress wave method in offshore practice. Poceedings 3<sup>rd</sup> International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, France.
14. Randolph M.F. (1990). Analysis of the pile driving. Cevelopments in soil mechanics IV: Advanced geotechnical analysis. Elsevier Applied Science Publishers.
15. Rausche F. (1974). Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen. Baugrundtagung Frankfurt/Main – Höchst, s. 395-409.
16. Rausche F., Goble G.G. (1970). Pile load test by impact driving.
17. Rausche F., Goble G.G., Likins G.E. (1985). Dynamic detrmination of pile capacity. J.Geot. Env. Div. ASCE 111, s. 367-383.
18. Sakai, T. (1988). The wave equation for the pile analysis. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Application of Stress-Wave Theory to Pile. s.251-260.
19. Seitz J.M., Schmidt H.G. (2000). Bohrpfae. Ernst & Sohn, Berlin.
20. Schellingerhout A., Revoorte E. (1996). Pseudo static pile load tester. Proc. 4 th Int. Conf. App. of Stress wave Theory to piles, Orlando, Florida, s. 251-260
21. Smith E. A. L. (1960). Pile Driving Analysis by Wave Equation. J.Soil Mech. Fund. Div, ASCE 86, s. 412-413.
22. Tejchman A. (2000). Badania dynamiczne pali. Inżynieria Morska i Geotechnika. 6/2000.
23. Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T., Blockus M. (2002). Określanie nośności pali wierconych na podstawie badań dynamicznych. Inżynieria i Budownictwo, nr 12/2002, s. 678-682.
24. Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T., Blockus M., Słabek A. (2003). Dynamiczne badania nośności pali wierconych. Mat. XIII Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Gliwice – Szczyrk, 11-13 czerwca 2003. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 2003, Budownictwo z. 97, s.279-294.
25. Warrington D.C., Wynn R.H. (1997). Aplication of the closed form solution.
26. ASTM, 2000: D 4945-00: Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
27. German Society for Geotechniques (DGGT) 1998: Recommendations for Static and Dynamic Pile Test. Germany, June 1998.
28. Foundation Pile Diagnostic System – User’s Guide. TNO Building and Construction Research.
29. PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
30. prEN 1997-1. Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1 – General rules. Final draft, October 2001.