XXIV awarie budowlane
XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

Dr hab. inż. KAZIMIERZ GWIZDAŁA, *prof. PG, kgwiz@pg.gda.pl*
Dr inż. TADEUSZ BRZOZOWSKI, *tbrzo@pg.gda.pl*
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska,
Katedra Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego

WYKORZYSTANIE BADAŃ DYNAMICZNYCH PALI W PROCESIE ODBIORU ROBÓT FUNDAMENTOWYCH

DYNAMIC TESTS OF PILES IN ACCEPTANCE PROCESS OF FOUNDATIONS WORKS

Streszczenie W ostatnim dziesięcioleciu, badania dynamiczne wykonywane w kraju rozszerzono o testy bazujące na pomiarze fali naprężeń w palu. Możliwość diagnozowania długości dużej liczby pali w krótkim czasie jak również możliwość zbadania nośności kilku pali tego samego dnia pozwoliły skrócić czas odbioru robót fundamentowych. Badania dynamiczne nie mogą zastąpić jednak próbnych obciążeń statycznych a badania długości i ciągłości pali nie zastąpią metryk wykonania pali.

Abstract In the recent decade, dynamic tests carried out in Poland were extended by the tests based on the measuring of stress wave in pile. Possibility of decreasing the execution time for pile length tests as well as for the bearing capacity tests let to reduces significantly the acceptance process of foundation works. However, the dynamic tests should not replace the static load tests of piles and the integrity tests should not replace the certificates of piles.

1. Wstęp

Od kilkudziesięciu lat wykorzystywane były w Polsce najprostsze badania dynamiczne pali opierające się na wzorach dynamicznych służących do określania nośności pali. Od około dziesięciu lat zapoczątkowano w kraju badania dynamiczne bazujące na pomiarze fali naprężeń w palu. Ze względu na brak formalnych zapisów w Polskiej Normie, odnośnie stosowania takich badań, opierano się na normach amerykańskich i wytycznych niemieckich. Obecnie, obok Eurokodu 7, zapis o możliwości stosowania badań dynamicznych pali znalazł się już w dwóch normach krajowych dotyczących wykonawstwa pali.

Stosowane obecnie metody badań dynamicznych można podzielić na:
- bazujące na wzorach dynamicznych do określania nośności pali,
- wykorzystujące pomiar fali naprężeń w palu:
  - niskoodkształceniowe (*low strain*) do badania długości i ciągłości pali,
  - wysokoodkształceniowe (*high strain*) do badania nośności pali,
- kinetyczne – badania dynamiczne o wydłużonym czasie działania (*rapid load test*) do badania nośności pali.

W kolejnych punktach referatu krótko scharakteryzowane zostaną poszczególne metody badań oraz ocena ich jakości i przydatności w procesie odbioru robót fundamentowych.

2. Zastosowanie wzorów dynamicznych

Wzory dynamiczne były najbardziej rozwijane w XIX i XX wieku. Obecnie, stosuje się w Polsce zaledwie kilka z kilkudziesięciu formuł zaproponowanych przez badaczy (np. wzór Delmaga lub wzór duński Sörensena-Hansena).

Formuła większości wzorów dynamicznych opiera się na zasadzie zachowania energii. Nośność pala oblicza się wykorzystując dane o wbijanym palu, znając energię wbijania oraz wpęd pala od jednego uderzenia młota. Z powyższego wynika, że wzory takie stosowane mogą być dla pali prefabrykowanych (drewnianych, żelbetowych oraz rurowych) oraz pali wykonywanych w gruncie poprzez wbijanie rury stalowej odzyskiwanej po zabetonowaniu trzonu pala (np. pale Franki, Vibro-Fundex, Vibrex).

Jak dowodzą badania i analizy (np. [2, 13]), za pomocą wzorów dynamicznych w zasadzie niemożliwa jest predykcja nośności pali. Wartości nośności otrzymywane ze wzorów mogą być obarczone dużym błędem. Powodem dużych niedokładności wzorów dynamicznych są najczęściej trudności w oszacowaniu strat energii mechanicznej związanych na przykład ze zużyciem młota lub nierównomiernością jego spadu. Większość autorów zaleca dzielić wartości otrzymane przez współczynnik bezpieczeństwa równy zazwyczaj od 1,5 do 3,0. Zdarzają się również wzory w których zalecany współczynnik bezpieczeństwa wynosi nawet 10 [2].

Inną przyczyną mało wiarygodnych wyników otrzymywanych ze wzorów jest podatność niektórych gruntów na upłynnianie w czasie wbijania. Dzieje się tak na przykład dla nawodnionych równoziarnistych piasków drobnych. Podczas wbijania notuje się nieproporcjonalnie duże wpędy. Zastosowanie wzorów dynamicznych prowadzi w takim przypadku do nawet kilkukrotnego zaniżenia nośności pali. Po zakończeniu wbijania upłynnienie szybko zanika, a próbne obciążenia statyczne wykazują wystarczającą nośność pali [13]. W takich przypadkach współczynnik cechowania zależy również od wpędu pala [15].

Zgodnie z powyższym, wyniki analiz wykonywanych za pomocą wzorów dynamicznych powinny być korelowane wynikami próbnych obciążeń statycznych. Wyjątkiem jest wbijanie pali w terenie, w którym podobne analizy zostały już wcześniej wykonane i dysponujemy odpowiednimi współczynnikami skalowania. Jako przykład można przedstawić rejon Portu Północnego w Gdańsku dla którego opracowano specjalną wersję wzoru Delmaga [14].

3. Dynamiczne badania długości i ciągłości pali

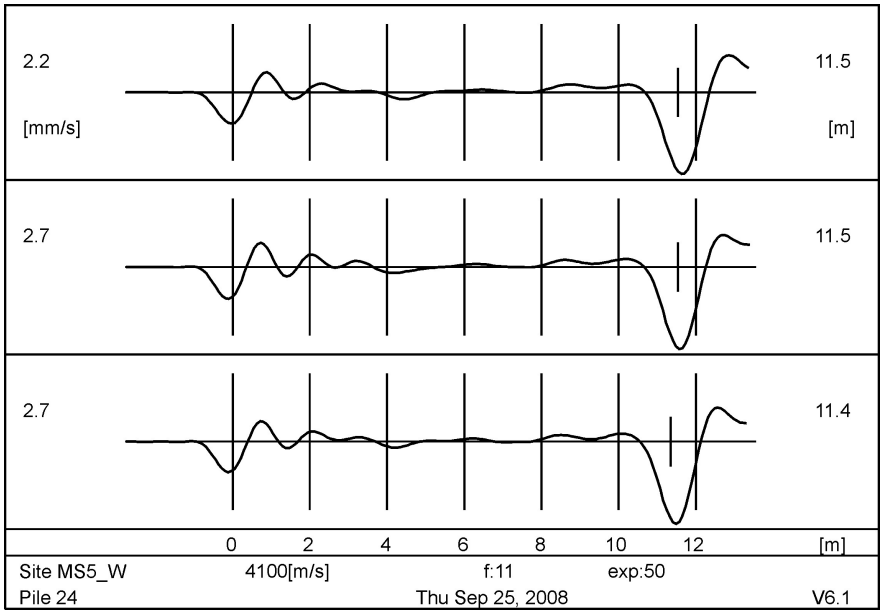
Badania polegają na pomiarze i analizie fali naprężeń przemieszczającej się w palu pod wpływem uderzenia specjalnym młotkiem w głowicę badanego pala (rys. 1). Fala mierzona jest za pomocą akcelerometru przyłożonego do głowicy pala. Przykładowe dane rejestrowane w czasie badań przedstawiono na rys. 2. Najczęściej spotykany sprzęt do niskoodkształceniowych badań długości i ciągłości pali to amerykański PIT (*Pile Integrity Tester*) holenderski SIT (*Sonic Integrity Tester*) jak również angielski PET (*Pile Echo Tester*).

Na rysunku 3 przedstawiono reflektogram ilustrujący zasadę interpretacji wyników badania typu *low strain*. Przewężenie średnicy pala objawia się odbiciami pojawiającymi się na wykresie prędkości fali.

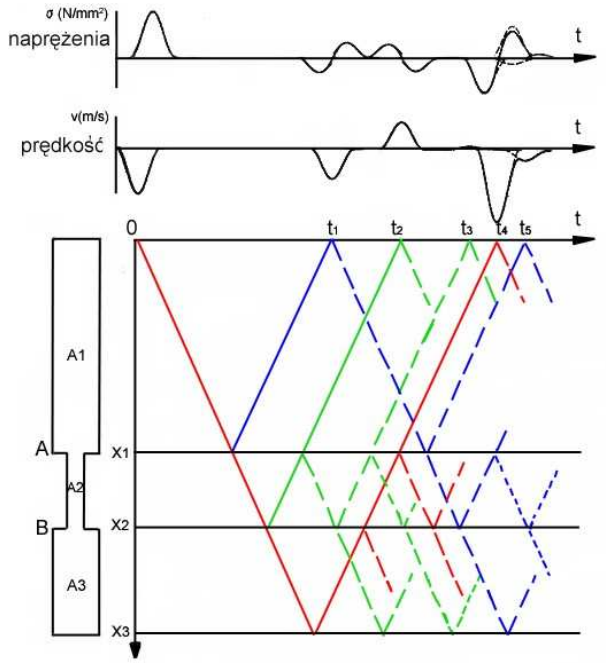
Zazwyczaj badania niskoodkształceniowe nazywane są badaniami *ciągłości i długości* pali. Szereg testów (np. [4], [8]) wskazuje jednak, że nieciągłości wykrywane są dopiero gdy brakuje 60÷75% nominalnego przekroju pala. Przykładowe wyniki takich badań przedstawiono na rys. 4 i w tablicy 1.

Z powyższego powodu autorzy postulują aby odwrócić kolejność na badania *długości i ciągłości* pali ponieważ długość określana jest z większą dokładnością. Błąd określenia długości badanych pali wynosi zazwyczaj około ±10 cm.

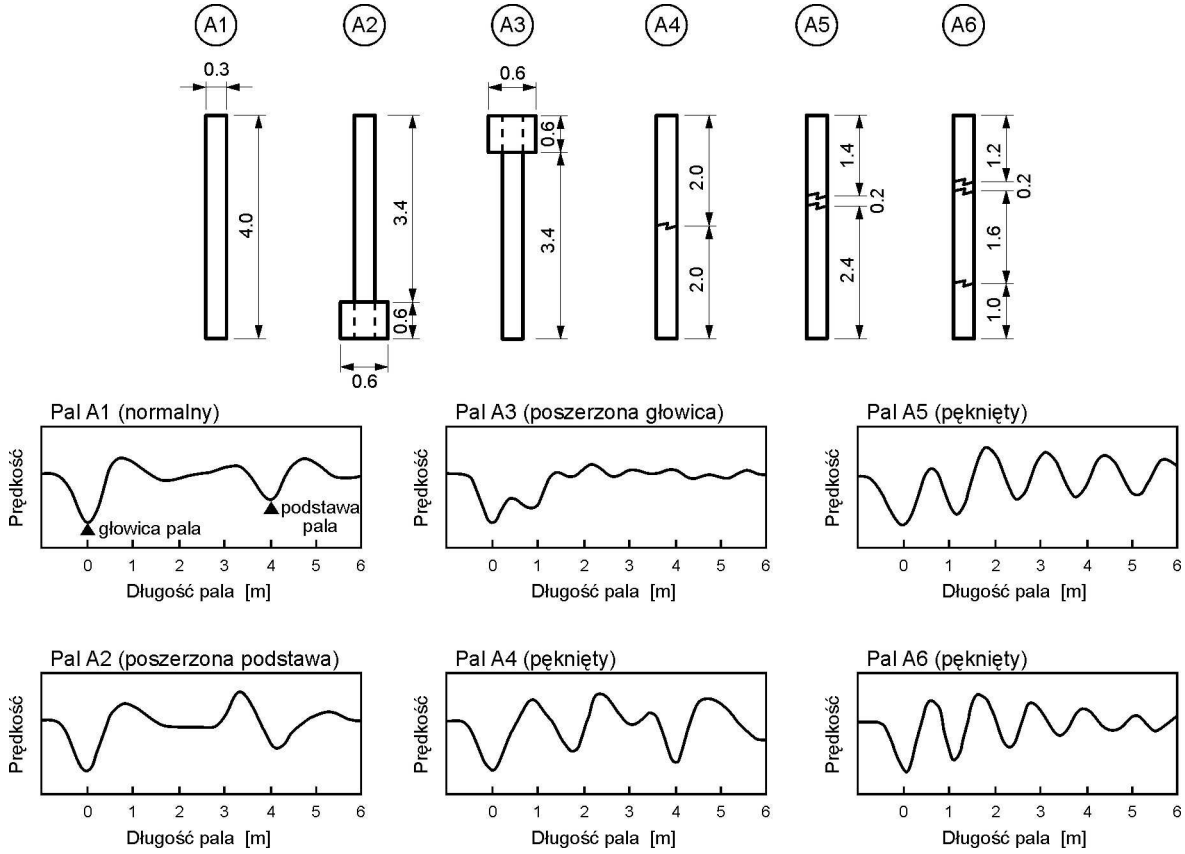
Rys. 1. Badanie długości i ciągłości pala wierconego ϕ 1500 mm



Rys. 2. Przykład danych rejestrowanych w czasie badań pala o długości L = 11,5 m



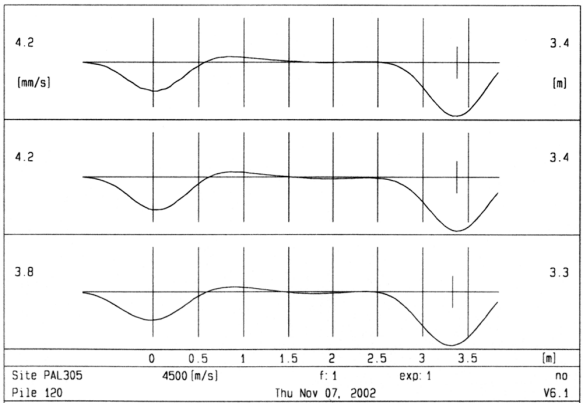
Rys. 3. Reflektogram dla pala z przewężeniem przekroju



Rys. 4. Wyniki badań pali o średnicy 300 mm, długości 4.0 m, zagłębionych w piasku [8]

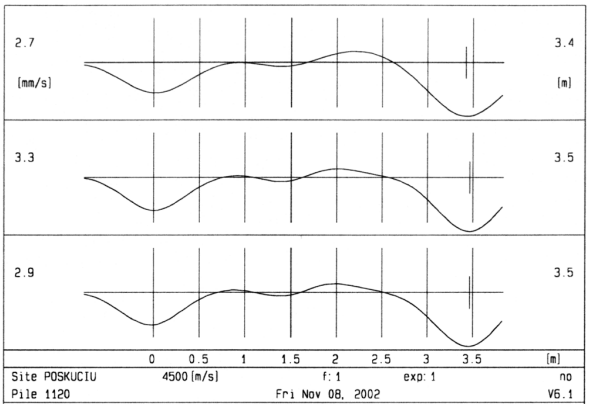
- pal A1, pal o stałym przekroju, bez uszkodzeń (normalny),
- pal A2, z powiększoną podstawą, bez uszkodzeń,
- pal A3, z powiększoną głowicą, bez uszkodzeń,
- pal A4, o stałym przekroju, szczelina (pęknięcie) 0,6 mm na 75% obwodu,
- pal A5, o stałym przekroju, szczeliny: 6,0 mm i 3,0 mm (patrząc od góry),
- pal A6, o stałym przekroju, szczeliny: 4,0 mm, 1,2 mm, 4,0 mm (patrząc od góry)

Tablica 1. Wyniki badania pala dla nacięcia 10%, 60% i 70% [4]



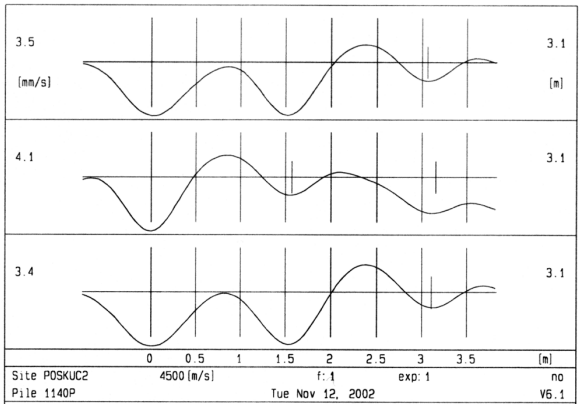
Pal nacięty w 10%.
Nie można zlokalizować miejsca potencjalnego uszkodzenia pala.

Wynik badania:
Pal jest ciągły, L=3,4 m



Pal nacięty w 60%
Widać pierwsze wyraźne oznaki uszkodzenia pala. Zaczyna zarysowywać się odbicie fali naprężeń na głębokości pomiędzy 1,4 a 1,6 m. Można bez trudu zlokalizować podstawę pala.

Wynik badania:
Pal jest uszkodzony, L=3,5 m



Pal nacięty w 70%
Widać wyraźne odbicie fali naprężeń na głębokości 1,6 m poniżej głowicy.

Wynik badania:
Pal pęknięty 1,6 m poniżej głowicy.
Nie można zlokalizować podstawy pala.

Przy nakładających się odbiciach fali od nierównomiernej pobocznicy błąd określenia długości może się zwiększyć nawet do ±50 cm. Jak przedstawiono na powyższych przykładach długość pali może być również niemożliwa do określenia. Oprócz przypadków pali zniszczonych dzieje się tak zazwyczaj wtedy gdy głowice pali są źle przygotowane do badania. Najbardziej charakterystyczny jest przypadek pali betonowanych w gruncie, które przed rozkuciem głowicy mają przekrój podobny do pala A3 na rys. 4. Parametrów ograniczających możliwość wykonania prawidłowego badania jest znacznie więcej. W celu zwiększenia dokładności badania należy komisyjnie wykonywać pale referencyjne o znanej długości.

Metody niskoodkształceniowe używane do określania długości i ciągłości pali zostały powszechnie zaakceptowane jako badania sprawdzające poprawność wykonania pali. Nie powinny być jednak traktowane jako zastępujące metrykę wykonania pala.

Prostota wykonania badania może sugerować również, że badania takie może wykonać każdy. Nic bardziej mylnego – badania, a szczególnie ich interpretację powinien przeprowadzać doświadczony inżynier.

W ocenie końcowej należy uwzględnić wszystkie obserwacje w czasie wykonywania pali zanotowane w metrykach, obserwacje z komisyjnego wykonania pali referencyjnych, przekroje geotechniczne, itd.

4. Dynamiczne badania nośności pali

Wysokoodkształceniowe badania dynamiczne polegają podobnie jak badania niskoodkształceniowe, na wykorzystaniu zjawiska rozchodzenia się fali naprężeń w palu. Badanie przeprowadzane jest podczas wbijania pali (*PDA – Pile Driving Analysis*) lub w przypadku pali wykonywanych w gruncie po ich wykonaniu i uderzeniu we wzmocnioną głowicę młotem kafara lub innym ciężarem prowadzonym w prowadnicach (*DLT – Dynamic Load Test*).

a) b) c)

Rys. 5. Stanowiska do badań dynamicznych pali:
a) badanie PDA, pal prefabrykowany 400×400 mm, młot Delmag o ciężarze 30 kN,
b) badanie DLT, pal wiercony ϕ1500 mm, bijak o ciężarze 90 kN,
c) badanie DLT, czujnik przykręcony do głowicy pala

Rejestracji propagacji fali wywołanej uderzeniem bijaka w głowicę dokonuje się za pomocą czujników przyspieszenia i odkształcenia przykręconych do rodzimej, wyrównanej powierzchni pala po przeciwległych stronach w odległości około 1,5 średnicy pala 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 opisanie modelu *mot-pal-grunt* za pomocą którego określa się nośność pala oraz ekwiwalentną do statycznej, zależność obciążenie – osiadanie.

Szczegółowy opis metod badań dynamicznych oraz podstaw teoretycznych zaprezentowano między innymi w pracach [1], [3], [5], [6], [7], [9], [11], [12].

Głównym elementem stanowiska do badań dynamicznych nośności pali (DLT) służącym do wywołania fali naprężeń jest bijak (młot) o ciężarze minimum 1÷2% nośności pala, wykonany np. ze stali lub z jednolitej bryły mocno zbrojonego betonu w osłonie z rury stalowej wraz z prowadnicą (rys. 5). 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 pala i uderzenie w głowicę. Prowadnica zapewnia centryczne uderzenie bijaka w pal.

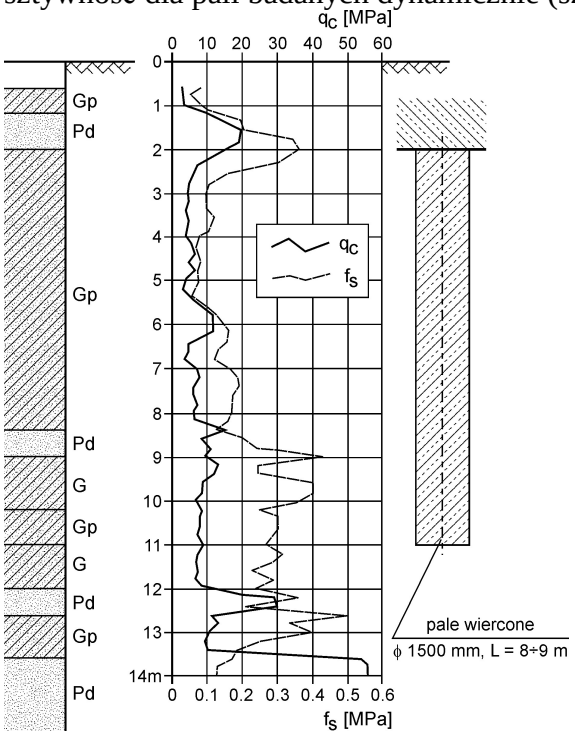
Badania wykorzystujące modele gruntu umożliwiające określenie jedynie całkowitych oporów występujących przy wbijaniu pala nazywa się *metodami bezpośrednimi*. Metody te polegają na obliczeniu nośności za pomocą gotowych wzorów, do których podstawia się wybrane wartości sił i prędkości pomierzone w czasie badań. Do obliczeń należy przyjąć również prędkości rozprzestrzeniania się fali naprężeń oraz współczynniki tłumienia gruntu. Błędny dobór tych parametrów powoduje uzyskanie niepoprawnych wyników. Najbardziej znanymi metodami bezpośrednimi są metoda *CASE* opracowana w *Case Institute of Technology* [11] oraz metoda TNO [9].

Pale w złożonych warunkach gruntowych powinny być analizowane *metodami pośrednimi* (zwane również rozszerzonymi), które poprzez iteracyjną analizę za pomocą modelu matematycznego umożliwiają o wiele lepsze odwzorowanie charakterystyki mechanicznej pala jak i samego gruntu. Metody pośrednie oceny nośności pali zostały rozwinięte już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku (metoda *CAPWAP – Case Pile Wave Analysis Program* [11]). Autorzy artykułu wykorzystują holenderską metodę pośrednia zwaną *TNODLT* [9].

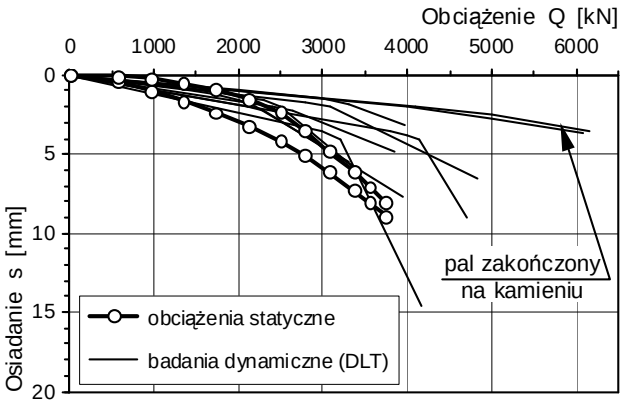
W metodach pośrednich wykorzystuje się wykresy siły i prędkości w zależności od czasu mierzone w głowicy badanego pala. Warunki początkowe modelu gruntu są przyjmowane na podstawie badań terenowych (najlepiej sondowania statycznego CPT, CPTU). Obliczony z modelu przebieg siły w czasie może być porównany ze zmierzonym w badaniu. Parametry gruntu i pala dostosowywane są w kolejnych iteracjach aż do najlepszego możliwego dopasowania pomiędzy krzywymi: obliczoną i pomierzoną.

Rezultatem procedury iteracyjnej jest krzywa obciążenie-osiadanie w głowicy badanego pala. Jest to zależność ekwiwalentna do krzywej obciążenie-osiadanie otrzymanej z obciążenia statycznego.

Przykładowe, porównawcze wyniki dwóch badań statycznych i dziesięciu badań dynamicznych dla pali o średnicy ϕ1500 mm przedstawiono na rys. 7. Pale o długości L = 8÷9 m zakończono w twardoplastycznych glinach piaszczystych (rys. 6). Porównanie krzywych otrzymanych z badań dynamicznych z krzywymi z obciążeń statycznych wykazuje większą sztywność dla pali badanych dynamicznie (szczególnie dla nośności granicznej).



Rys. 6. Warunki geotechniczne



Rys. 7. Krzywe obciążenie-osiadanie

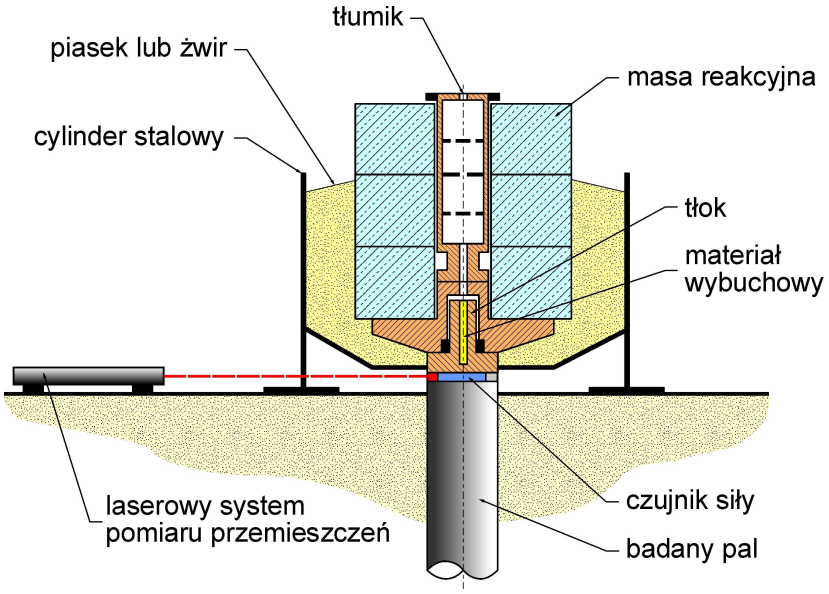
W zakresie obciążeń zbliżonych do wartości projektowych (2500÷3000 kN) osiadania wszystkich badanych pali wynoszą od 2 do 6 mm. Różne nachylenie krzywych z badań dynamicznych wynika głównie z różnego zagłębienia pali w warstwie nośnej. Dwie „najbardziej płaskie" krzywe otrzymano dla pali wykonanych w najlepszych warunkach gruntowych (jeden z pali został zakończony na kamieniu).

Brak zapisu w polskiej normie palowej [15] o możliwości wykonywania dynamicznych badań nośności pali w początkowym okresie utrudniał wprowadzenie tych badań do Polski. Opierano się na normach i zaleceniach zagranicznych, np. [19] i [21]. Wprowadzanie norm europejskich, a szczególnie tłumaczenia norm wykonawczych dotyczących pali wierconych [17] i przemieszczeniowych [18] pozwoliło na szersze stosowanie tych badań w kraju.

Polska wersja Eurocode 7 [16] w punkcie 7.5.3 dopuszcza stosowanie badań dynamicznych nośności pali pod warunkiem przeprowadzenia odpowiednich badań podłoża oraz „skalibrowania" badań dynamicznych próbnymi obciążeniami statycznymi tego samego rodzaju pali, o podobnej długości i przekroju poprzecznym oraz w porównywalnych warunkach gruntowych.

Konieczność kalibrowania dynamicznych badań nośności jest szczególnie ważna, ponieważ w trakcie tych badań mamy do czynienia z dynamicznymi własnościami gruntów oraz wpływem wody gruntowej. Jak pokazuje przedstawiony wyżej przykład, krzywe z badań dynamicznych zazwyczaj charakteryzują się mniejszymi osiadaniami od krzywych z obciążeń statycznych. Podejmowane są próby dokładniejszego rozpoznania procesów zachodzących w podłożu podczas badań dynamicznych. Jednym z ważniejszych elementów jest poznanie zmian ciśnienia wody w porach gruntu w czasie badań. Realizuje się to poprzez instalowanie czujników ciśnienia w podstawach badanych pali [10].

Najbardziej rozwijanymi obecnie metodami badań dynamicznych są badania kinetyczne (*rapid test*), z których najpopularniejsze znane są pod nazwą *Statnamic* [5]. Umożliwiają one badanie pali osiowo wciskanych jak również pali pod obciążeniem poziomym. Procedura badań jest bardzo podobna do badań typu *high strain*. Obciążenie w takim badaniu jest jednak wywoływane przez kontrolowany ładunek wybuchowy (rys. 8). Odpowiednie kontrolowanie wybuchu umożliwia przedłużenie czasu trwania obciążenia. Trwa ono zazwyczaj kilka razy dłużej od badania wysokoodkształceniowego. Badania kinetyczne nie wymagają tak żmudnego procesu interpretacji jak wyżej opisane ponieważ krzywa obciążenie-osiadanie otrzymywana jest już w czasie badania.



Rys. 8. Schemat stanowiska do badania typu *Statnamic*

Wraz z rozwojem badań kinetycznych postępuje również ich proces normalizacji. Obecnie trwa przygotowanie międzynarodowej normy dotyczącej takich badań [22]. Niestety, głównie ze względu na duże koszty takich badań, nie były one dotychczas stosowane w Polsce.

Badania typu *Statnamic* mimo wielu zalet są jednak wciąż badaniami dynamicznymi, które podobnie jak badania *high strain* powinno się kalibrować obciążeniami statycznymi.

5. Podsumowanie

Coraz większe tempo robót budowlanych jak również realizacja prac fundamentowych w trudnych warunkach gruntowych i terenowych wymagają zastosowania nowoczesnych, szybkich oraz pewnych metod kontroli i odbioru robót.

Badania dynamiczne pali są jednym z nowoczesnych sposobów oceny długości, ciągłości oraz nośności i osiadań pali. Podstawową zaletą takich badań jest krótki czas ich realizacji. Bardzo znaczące, w stosunku do próbnego obciążenia statycznego, jest wyeliminowanie konieczności montażu urządzeń kotwiących lub balastu jak również mniejszy koszt jednostkowy całego badania. Niezaprzeczalną zaletą badań dynamicznych jest możliwość ich wykonania również w przypadku, gdy warunki terenowe na budowie utrudniają przeprowadzenie próbnego obciążenia statycznego, np. wiadukty, mosty, pale w głębokich wykopach, pale w konstrukcjach budownictwa wodnego i morskiego.

Nie wolno zapominać aby stosować badania dynamiczne zgodnie z zasadami sztuki inżynierskiej. Nie można na przykład zastępować metryk wykonania pali badaniami niskonaprężeniowymi.

Zgodnie z Eurokode 7 [16] badania dynamiczne (*DLT*) należy kalibrować za pomocą próbnego obciążenia statycznego, przyjmując je jako badanie korelacyjne dla danego obszaru geotechnicznego (na przykład na pięć wykonanych badań dynamicznych należy wykonać jedno obciążenie statyczne).

Sposób wyznaczenia nośności granicznej pali wciskanych na podstawie próbnych badań dynamicznych (p. 7.6.2.4 Eurocode 7 [16]) zależy głównie od rodzaju badań, sposobu ich interpretacji, liczby badań, wartości średnich i minimalnych nośności. Norma [16] dopuszcza również zastąpienie współczynników częściowych i korelacyjnych służących do określenia nośności podanych w tablicy A.11 poprzez współczynniki z załącznika krajowego.

Materiał badawczy, którym dysponują autorzy oraz własne analizy będą podstawą do skorygowania wspomnianych wyżej współczynników i opracowania własnych metod interpretacji z możliwością ich wykorzystania w załączniku krajowym do Eurokodu 7.

Literatura

1. Brzozowski T.: Badania dynamiczne nośności pali wierconych w świetle próbnych obciążeń statycznych. Problemy naukowo-badawcze budownictwa. t. 3, Białystok – Krynica 2007, 323–330.
2. Gwizdała K., Blockus M.: Kryteria doboru wzorów dynamicznych do analizy nośności pali w budownictwie hydrotechnicznym. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2008.
3. Gwizdała K., Brzozowski T.: Badania dynamiczne nośności pali. Górnictwo i Geoinżynieria, Zeszyt 2, 2008, 139–149.
4. Gwizdała K., Cieślak W.: Dynamiczne badania jakości wykonania fundamentów palowych, charakterystyka i badania modelowe. XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awaria Budowlane, Szczecin Międzyzdroje, 23–26 maja 2007, 413–420.

5. Gwizdała K.: Projektowanie fundamentów na palach. WPPK, Wisła-Ustroń, 2005.
6. Gwizdała, K., Tejchman, A., Blockus, M.: Kontrolne badania dynamiczne pali prefabrykowanych w czasie ich wykonawstwa. XXII Konferencja Naukowo-Techniczna, 17–20 maja, 2005, Szczecin-Międzyzdroje.
7. Holeyman A.E.: Technology of pile dynamic testing. Balkema, Rotterdam, 1992.
8. Ichimura Y., Sakamoto S., Ono H., Yamoda S.: A study on the applicability of integrity tests for damaged pils. DFI 98, Wiedeń, 1998.
9. 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.
10. Middendorp P.: Recent developments in dynamic pile testing. 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal, 8–10 September 2008, 33–38.
11. Rausche F., Goble G.G.: Pile load test by impact driving. 1970.
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, 2003, Budownictwo z. 97, s. 279–294.
13. Tejchman A., Gwizdała K., Kurałowicz Z., Brzozowski T., Krasiński A.: Dynamiczna i statyczna analiza nośności pali Vibro-Fundex. Inżynieria i Budownictwo, 8/1994.
14. Zadroga, B., Gwizdała, K.: Determination of bearing capacity of piles using modified Delmag dynamic formula. Proceedings, 4th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, September 21–24, 1992, The Hague, Netherlands.
15. PN-83/B-02482: Nośność pali i fundamentów palowych.
16. EN 1997 (2004). Eurocode 7. Geotechnical Design.
17. PN-EN 1536. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale wiercone.
18. PN-EN 12699. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe.
19. ASTM D4945-00: Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
20. ASTM D5882-00: Standard Test Method for Low-Strain Integrity Testing of Piles.
21. Recommendations by the Committee 2.1 of the DGGT for the impact testing of piles. Dynamic Pile Load Test. Draft. Germany, September 1997.
22. Testing of piles: rapid load testing. 6 November 2007 (draft standard).