Dr hab. inż. Kazimierz GWIZDAŁA, prof. PG, *kgwiz@pg.gda.pl*
Politechnika Gdańska
Mgr inż. Wojciech CIEŚLAK, *cieslak@ingeo.com.pl*
INGEO Sp. z o.o.

DYNAMICZNE BADANIA JAKOŚCI WYKONANIA FUNDAMENTÓW PALOWYCH, CHARAKTERYSTYKA I BADANIA MODELOWE.

LOW STRAIN INTEGRITY TESTS OF THE QUALITY OF PILING FOUNDATIONS INSTALLATION – DESCRIPTION AND MODEL TESTS

Streszczenie: Omówiono nieniszczące badania jakości i długości pali za pomocą metody SIT (Sonic Integrity Testing). Przedstawiono wyniki badań modelowych i terenowych dla pali prefabrykowanych o długości 3,5m. W badaniach uwzględniono planowe, częściowe uszkodzenia pobocznicy pala. Na podstawie wyników badań sformułowano zalety i ograniczenia metody SIT.

Abstrakt: In the paper the non-destructive tests of the quality and length of the piles using SIT (Sonic Integrity Testing) method are discussed. The results of model and field tests for 3.5 m long pre-cast piles are presented. In order to verify efficiency of the method, the shaft of some piles was being partly damaged prior to tests made. Based on test results the advantages and shortcoming of the method presented are discussed.

1. Zastosowanie metod nieniszczących w kontroli jakości pali

Rozwój techniki pozwala na stosowanie w praktyce coraz to nowszych technik kontroli jakości. Należy zaznaczyć, że wymagane wysokie standardy wykonawstwa i powszechna kontrola jakości jest wdrażana we wszystkich sektorach przemysłu.
Wraz z nowymi technologiami przyspieszającymi postęp prac, istnieje ryzyko wykonania pali nie spełniających założeń projektowych. Wykonawcy często zaniżając koszty, dopuszczają się uchybień w technologii palowania. Z uwagi na tempo prowadzonych prac, wynikające z krótkich terminów, o wiele łatwiej popełnić błędy, których naprawienie w okresie późniejszym może być bardzo kosztowne, natomiast ich nie wykrycie może być katastrofalne w skutkach.
Do momentu pojawienia się technik umożliwiających pomiar długości pali jedyną metodą oceny jakości było próbne obciążenie statyczne. Z założenia badanie takie wykonuje się na niewielkiej liczbie pali, a zatem prawdopodobieństwo wykrycia pala uszkodzonego jest znikome.

Do tej pory opracowano szereg metod nieniszczących, służących do oceny długości i ciągłości pali, Gwizdała [4]. Badania te można podzielić na 7 podstawowych grup :

- Testy akustyczne
- Testy radiometryczne

- Testy geosejsmiczne
- Metody sejsmiczne niskoenergetyczne wykorzystujące zjawisko odbicia fali naprężeń
- Metody sejsmiczne wysokoenergetyczne oparte na badaniu fal naprężeń
- Metody wibracyjne
- Metody elektryczne

Każda z metod badawczych posiada zalety, ograniczenia i wady. W niniejszej publikacji autorzy skupili się na metodzie niskoenergetycznej, która służy przede wszystkim do kontroli jakości pali na placu budowy. Zarówno pale prefabrykowane wbijane jak i pale formowane w gruncie wymagają sprawdzenia poprawności wykonania. Szybkie wykrycie wady może uchronić konstrukcję przed katastrofą a inwestora przed kosztowną naprawą wadliwego fundamentu w późniejszym okresie budowy lub eksploatacji budowli.

Niskoenergetyczne badania jakości pozwalają na szybkie przebadanie wszystkich pali wchodzących w skład konstrukcji fundamentu w krótkim okresie czasu. W przypadku innych znanych badań, np.: ultradźwiękowych, wiąże się to ze specjalnym przygotowaniem trzonu pala i zamontowaniem rurek stanowiących otwory badawcze. Z uwagi na koszty takiej operacji niemożliwe jest przebadanie wszystkich pali.

Badanie jakości metodą niskoenergetyczną znajduje zastosowanie w wielu krajach świata jako forma procesu kontroli jakości. W Polsce do tej pory najczęściej praktykowaną formą sprawdzenia jakości wykonywanych fundamentów palowych jest próbne obciążenie statyczne. Inwestorzy i projektanci posiadają w związku z tym ograniczoną możliwość kontrolowania wykonawców ponieważ testy tego typu wykonuje się na niewielkiej liczbie pali. Opisywana metoda „młotkowa” stosunkowo dokładnie określa czy wykonane pale faktycznie odpowiadają długością wymogom projektowym oraz wykrywa ewentualne pęknięcia i znaczące przewężenia średnicy pala.

2. Podstawy teoretyczne metod niskoenergetycznych SIT i PIT

Metoda SIT – Sonic Integrity Testing została opracowana przez instytut TNO (Holandia). Metoda PIT (Pile Integrity Testing) została opracowana niezależnie na podstawie tych samych założeń teoretycznych w Stanach Zjednoczonych przez komitet ASTM. Obie metody zalicza się do grupy niskoenergetycznych metod sejsmicznych – tak zwanych metod młotkowych. Uderzając w głowicę pala za pomocą odpowiedniego młotka generujemy falę naprężeń przemieszczających się w trzonie pala. Następnie za pomocą czujników przyłożonych do głowicy pala (akcelerometrów) rejestrowane są odbicia fali przemieszczającej się na długości pala. Podstawy teoretyczne omówiono między innymi w pracy, Gwizdała [4].

Podłużna fala naprężeń, wzbudzona za pomocą uderzenia młotkiem, przemieszcza się do podstawy pala. Napotykając na nagłe zmiany w przekroju pala, pęknięcia, poszerzenia, inkluzje gruntu, zostaje częściowo odbita i po czasie t zarejestrowana za pomocą aparatury pomiarowej umocowanej na głowicy pala.

Odległość L pomiędzy głowicą pala a źródłem zakłócenia propagacji fali opisana jest następującym wzorem:

$$2 \cdot L = t \cdot c_l \tag{1}$$

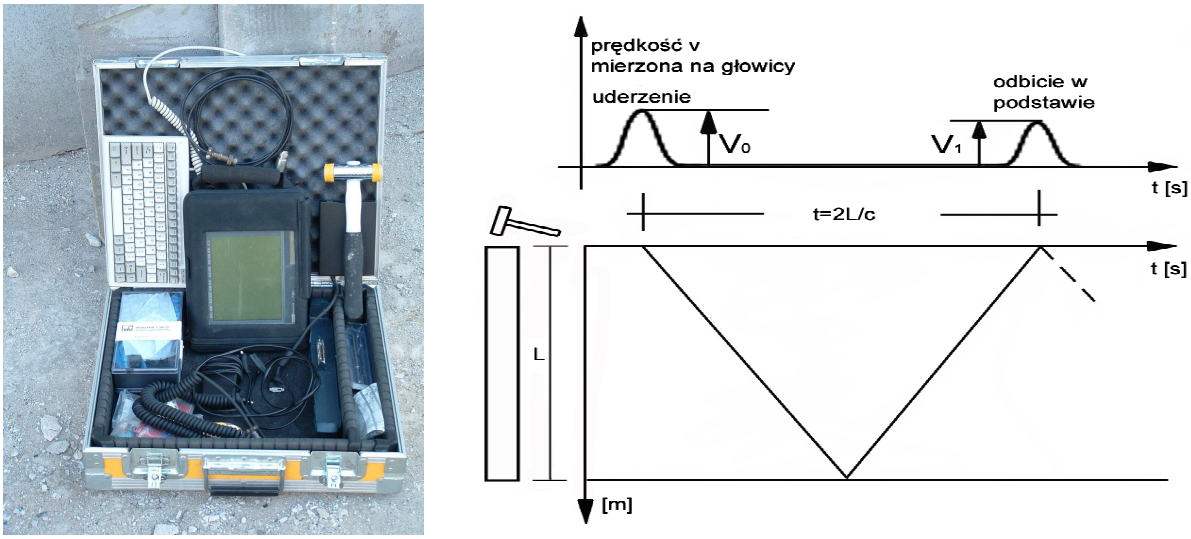
gdzie:

t – czas opóźnienia odbitego sygnału

L - długość pobocznicy pala

c_l – prędkość podłużna fali naprężeń (zależna od materiału z jakiego wykonano pal)

Fala przemieszczając się wzdłuż trzonu pala po pewnym czasie dociera do podstawy gdzie zostaje odbita. Po czasie t dociera do głowicy przebywając odległość 2L. Zarejestrowany za pomocą akcelerometru sygnał umożliwia oszacowanie długości badanego pala (rys.1).



Rys 1 – sprzęt pomiarowy, wynik badania jakości pala niskoenergetyczną metodą sejsmiczną – schemat teoretyczny.

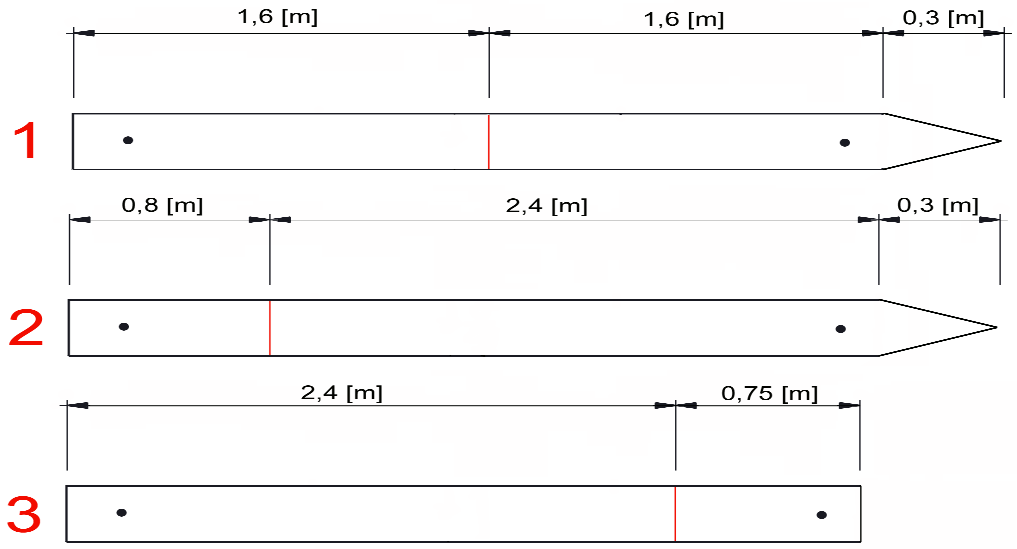
3. Doświadczenia Polskie, badania w Politechnice Gdańskiej

W Polsce metoda niskoenergetyczna nie jest powszechnie stosowana. Główną przyczyną jest brak wystarczających informacji na ten temat w literaturze i w obowiązujących normach. Sytuacja powyższa powoduje, że dostęp do sprzętu pomiarowego i stosowanie metody ogranicza się do kilku ośrodków w Polsce. Jednym z nich jest Katedra Geotechniki i Geologii Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Opisane poniżej badania terenowe i badania modelowe na palach prefabrykowanych zostały przeprowadzone przez studentów Politechniki Gdańskiej w ramach pracy doktorskiej i magisterskiej pod kierownictwem Kazimierza Gwizdały.

3.1 Badania modelowe – symulacja pęknięcia pala

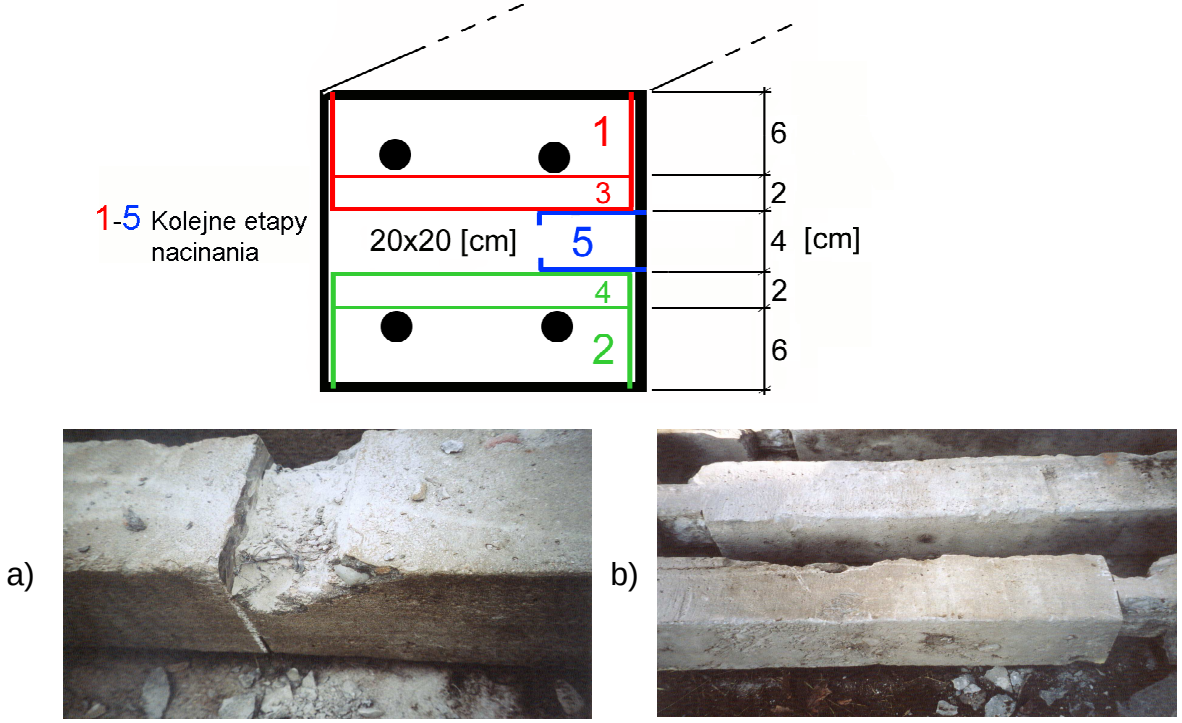
W Katedrze Geotechniki i Geologii Stosowanej, przeprowadzono między innymi badania modelowe mające na celu ocenę poprawności stosowania metod młotkowych w praktyce inżynierskiej.
Przeprowadzono szereg badań modelowych na palach prefabrykowanych, żelbetowych o przekroju 20x20 cm.
Podstawowym celem badania było potwierdzenie przydatności niskoenergetycznych metod dynamicznych do wykrywania pali uszkodzonych. Wykonano badania weryfikacyjne dotyczące możliwości oceny w zakresie identyfikacji pali pękniętych poprzecznie. Przeprowadzając badania na palach stopniowo nacinanych w odstępach co 5% powierzchni przekroju poprzecznego, można było ocenić minimalną procentową wartość utraty ciągłości, możliwą do wykrycia aparaturą pomiarową.
Kolejnym zadaniem było określenie maksymalnej nieciągłości, dla której oprócz wykrycia pęknięcia pala możliwe było także zlokalizowanie podstawy pala i oszacowanie jego długości.

Pale wraz z ostrzem były zbrojone 8 prętami ϕ 20 mm. Każdy z pali posiadał w odległości 20 cm od głowicy i 30 cm od ostrza pala otwór ułatwiający transport pala.
W przypadku pala nr 3, rys.2, skuto podstawę w celu zmiany warunków w ostrzu, płaska podstawa charakterystyczna dla pali duńskich. Ostatecznie pal nr 3 został skrócony w stosunku do pali 1 i 2 o 35 cm i jego długość wyniosła 3,15 m. Pozostałe pale nr 1 i 2 zachowały swoja pierwotną długość 3,5 m. Na palach wyznaczono miejsca, w których modelowano pęknięcie pala.



Rys. 2 Schemat stanowiska pomiarowego wraz z miejscami modelowanych nieciągłości.

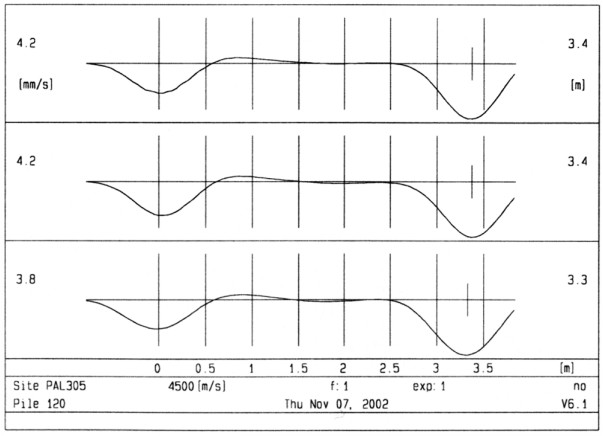
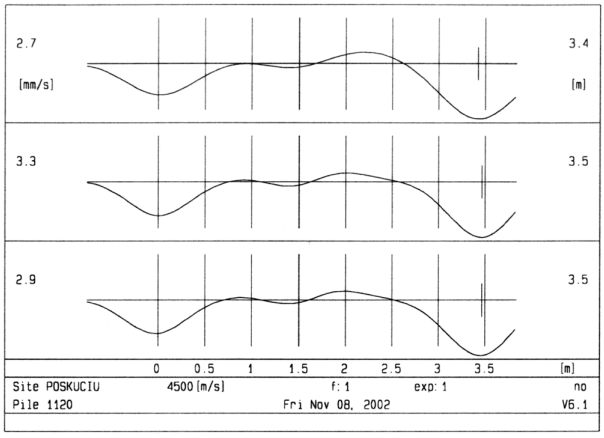
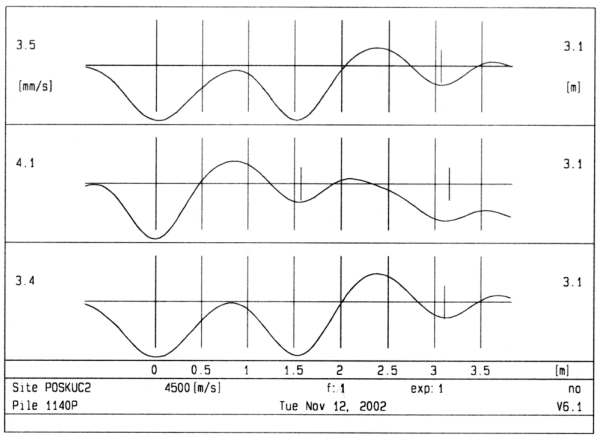
Każdy z pali nacinano wraz ze zbrojeniem stopniowo o 1 cm za pomocą szlifierki kątowej. Po osiągnięciu żądanej głębokości cięcia przeprowadzano badanie jakości metodą SIT. Proces nacinania pala można podzielić na 5 etapów. Zostały one zobrazowane na rysunku 3.



Rys. 3 Poszczególne etapy nacięć pali modelowych. a – pal nacięty w 60%, b – pale nacięte w 80 %

Początkowo każdy z pali nacinano co centymetr, aż do 6 cm w głąb co było równoznaczne z nieciągłością rzędu 30% powierzchni przekroju poprzecznego. Szerokość szczeliny wynosiła około 5 mm. Z przyczyn technicznych, kolejne nacięcia wykonano po obróceniu pala o 180°. W ten sposób uzyskano wcięcie 12 cm o szerokości 5mm co odpowiadało utracie ciągłości na powierzchni 60% przekroju poprzecznego. Następnym etapem było skucie trzonu pala w miejscu nacięcia w celu umożliwienia przeprowadzenia kolejnych nacięć (odpowiednio 3 i 4, rys. 3). W tym momencie szerokość szczeliny wynosiła około 10 cm. Po nacięciu pala z każdej strony o kolejne 2 cm (80% utrata ciągłości) , pal obrócono o 90° i wykonano cięcie nr 5 odpowiadające 90% utracie ciągłości pala. Szerokość szczeliny w tym przypadku wyniosła 5mm. Następnie pale przełamano i wykonano ostatnie pomiary odpowiadające całkowitej utracie ciągłości pobocznicy.

Tablica 1. Wyniki badania pala nr 1 dla nacięcia 10%, 60% i 70%.

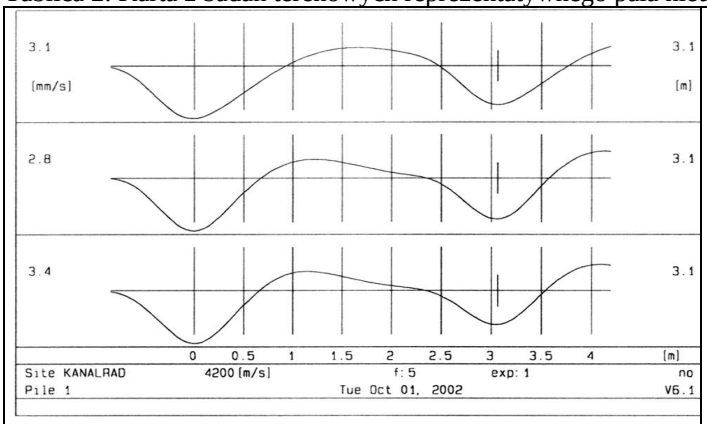
	Pal nacięty w 10 %. Nie można zlokalizować miejsca potencjalnego uszkodzenia pala. Wynik badania: Pal jest ciągły, L=3,4 m
	Pal nacięty w 60% Widać pierwsze wyraźne oznaki uszkodzenia pala. Zaczyna zarysowywać się odbicie fali naprężeń na głębokości pomiędzy 1,4 a 1,6 m. Można bez trudu zlokalizować 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.

Modelowanie pęknięcia pala przebiegło zgodnie z założoną technologią i programem. Wykonano zakładane wcześniej badania. Średnią prędkość rozchodzenia się fali naprężeń w materiale pala przyjęto v=4500 m/s.
Przystępując do badań pali nacinanych, zakładano, że modelowane pęknięcia będą wykrywalne już po około 30 % utraty ciągłości pala. W warunkach badań okazało się ,że uszkodzenia tego typu są nie wykrywalne, a dopiero 60% utrata ciągłości powodowała wyraźne odbicie fali naprężeń w miejscu modelowanego pęknięcia. Uszkodzenie rzędu 60 % jest na tyle poważne, że dyskwalifikuje pal jako element konstrukcyjny. Można zatem przyjąć, że wykrycie uszkodzenia pala prefabrykowanego, lub pala wierconego z wyraźnym przewężeniem oznacza, że jest on uszkodzony w znacznym stopniu. Należy wtedy rozpatrzyć wykluczenie takiego pala z fundamentu konstrukcji.
Otrzymane rezultaty podczas badań modelowych wymagają wykonania kolejnych testów na palach odpowiednio dłuższych i otoczonych gruntem.

3.2 Badania terenowe

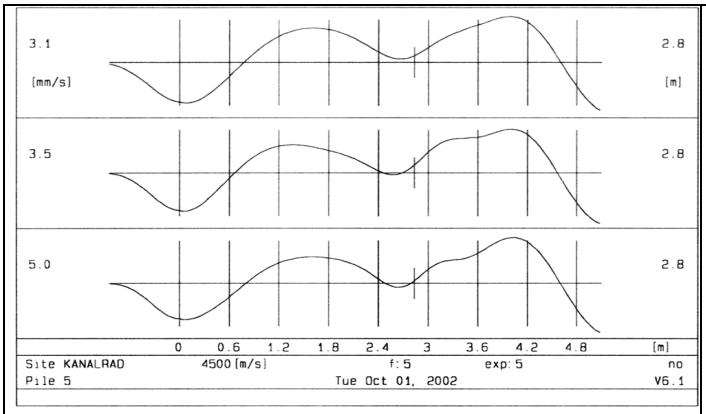
Badania terenowe przeprowadzono w kanale rzeki Radunia na odcinku pomiędzy Gdańskiem Święty Wojciech a Pruszczem Gdańskim. Pionowe ściany kanału od strony wału oraz wysoczyzny morenowej zostały obudowane za pomocą pali prefabrykowanych żelbetowych 20x20 cm o długości 3,5 m, podpierających dylinę żelbetową z płyt prefabrykowanych. Pale wystają ponad poziom terenu na wysokość około 1,2 m.
Każdy z 200 pali został poddany badaniu ciągłości metodą SIT. Do testów używano zestawu FPDS – SIT, firmy TNO. Aparatura pomiarowa składała się z komputera przemysłowego wraz z kartą PCMCiA połączoną z akcelerometrem.
Głowica każdego z pali została dokładnie oczyszczona. Następnie przeprowadzono pomiar ciągłości pala uderzając młotkiem w głowice w trzech różnych miejscach. Akcelerometr za każdym razem przykładano na środku głowicy. Dla każdego z pali uzyskano 3 niezależne wykresy prędkości w czasie. Na tej podstawie można było oszacować długość pala i ewentualne uszkodzenia. Poniżej przedstawiono karty badań 2 pali spośród 200 przebadanych.

Tablica 2: Karta z badań terenowych reprezentatywnego pala nieuszkodzonego:



Kanał Raduni – Pal nr 1

Pal nr 1 jest reprezentatywny dla większości badanych pali w kanale Raduni. Pal wystaje ponad poziom terenu około 1,2 m. Posiada nienaruszony trzon i w niewielkim stopniu skruszona głowicę. Na podstawie przeprowadzonego badania stwierdza się, że pal nie jest uszkodzony.



Kanał Raduni – Pal nr 5

Pal nr 5 był palem, w którym wykryto uszkodzenie. Na wykresie widać wyraźne odbicie fali naprężeń około 2,65 m od głowicy pala. Prawdopodobnie pal nr 5 został uszkodzony podczas robót kafarowych. Jest to na pewno znaczące pęknięcie poprzeczne, prawdopodobnie występujące na całej powierzchni przekroju. Na podstawie przeprowadzonego badania stwierdza się, że pal jest uszkodzony w stopniu znaczącym 2,6-2,8 m poniżej głowicy. Nie możliwa jest lokalizacja podstawy pala.

Warto zwrócić uwagę, iż zlokalizowanie podstawy pala w tym wypadku jest bardzo trudne. Fala naprężeń napotykając na pękniecie około 2,7m. poniżej głowicy została odbita niemal w 100%. Biorąc pod uwagę wnioski płynące z badań modelowych dla pali nacinanych można stwierdzić, że pal ten jest bardzo mocno uszkodzony. Prawdopodobnie jest pęknięty na całej powierzchni przekroju a minimalną ciągłość widoczną w niewielkim stopniu na wykresie zapewniają pręty zbrojeniowe.
Ponadto podczas badań terenowych zauważono, że odpowiednie przeprowadzenie badania od strony czysto technicznej (mocowanie akcelerometru, uderzenie młotkiem) ma wpływ na poprawność otrzymanych wyników.

4. Zalety, Wady i ograniczenia metod niskoenergetycznych

- Podstawową zaletą metody niskoenergetycznej w badaniu ciągłości pali jest szybkość przeprowadzenia badania oraz jego niska cena.

- W przypadku badania pali wierconych i prefabrykowanych prawie zawsze można zarejestrować czas, po którym następuje odbicie fali, co oznacza, że można zlokalizować podstawę pala. Pozwala to skontrolować, czy pale wykonano o odpowiedniej długości.

- Podczas pomiaru otrzymujemy niezależne wykresy przebiegu fali w palu w czasie t, z których każdy odpowiada oddzielnemu uderzeniu młotka. Wyniki badania niezwłocznie są wyświetlane na ekranie komputera. W przypadku wyraźnych odstępstw w kształcie wykresu dla jednego z uderzeń, badanie można bez problemu powtórzyć i wyeliminować ewentualne niedociągnięcia.

- Istotnym ograniczeniem metody niskoenergetycznej jest niewykrywalność małych i średnich uszkodzeń. Z doświadczeń praktycznych wynika, że zmiany rzędu ± 25-30 %

pierwotnego przekroju nie są rejestrowane przez system pomiarowy. Podobne wnioski wyciągnięto po przeprowadzeniu badań laboratoryjnych w Politechnice Gdańskiej.

- Badania niskoenergetyczne powinny być wykonywane przez osoby posiadające odpowiednie przygotowanie i wiedzę z zakresu interpretacji wyników. Wynik badania w dużym stopniu zależy od poprawnego wprowadzenia danych dotyczących materiału z jakiego wykonano pal oraz umiejętnego przyłożenia czujnika i odpowiedniego uderzenia młotkiem.

5. Podsumowanie

Pomimo wymienionych w tekście ograniczeń, metoda niskoenergetyczna może i powinna stać się narzędziem do kontrolowania jakości prac palowych w zakresie podobnym jak to ma miejsce w Europie Zachodniej. W tym celu w przyszłości konieczne jest opracowanie polskich zaleceń dotyczących stosowania metod kontroli jakości w fundamentowaniu oraz wypracowanie polskich standardów wykonywania i interpretacji w oparciu o doświadczenia na świecie i o polskie doświadczenia naukowe z tej dziedziny.

Literatura

1. ASTM-D5882-00, 2000: Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles.
2. Blockus M., 2001: Analiza pracy pali w podłożu gruntowym na podstawie badań dynamicznych. Studium Doktoranckie przy Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej – Praca przejściowa. Opiekun naukowy, Kazimierz Gwizdała.
3. Cieślak W., 2003: Zastosowanie badań dynamicznych do oceny zachowania się pali w podłożu gruntowym, charakterystyka i badania modelowe. Praca magisterska pod kierunkiem Kazimierza Gwizdały, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003
4. Gwizdała K.,2004: Kontrola jakości pali i jakości robót palowych. Seminarium: Fundamenty palowe i specjalne. Instytut Dróg i Mostów PW, Instytut Budowy Dróg i Mostów, Warszawa, 2 marca 2004.
5. Holeyman A.E.,1992: Technology of pile dynamic testing, Santa Anna, Calif., USA.