

# Kontrola jakości - metody badań pali fundamentowych

**W praktyce krajowej wykonywane są powszechnie trzy rodzaje badań pali: obciążenia statyczne, dynamiczne i badania ciągłości. Celem tych badań może być: wyznaczenie danych do projektu palowania, weryfikacja założeń przyjętych w projekcie, określenie przemieszczeń pala w zakresie obciążeń użytkowych, sprawdzenie jakości (ciągłości) pala.**

## Wstęp

Podstawowym badaniem jest obciążenie statyczne wykonywane najczęściej zgodnie z normą [1]. Badania dynamiczne wykonuje się najpowszechniej na palach prefabrykowanych wbijanych, ze względu na łatwość wykorzystania sprzętu. Badanie ciągłości, ze względu na swoją prostotę i szybkość wykonania umożliwia sprawdzenie nawet wszystkich pali w obiekcie.

Przydatności poszczególnych badań zamieszczono w tablicy 1 zgodnie z normą [2], uzupełniając ją o porównanie parametrów mierzonych w trakcie badania i będących jego wynikiem.

Tablica 1. Zastosowanie poszczególnych metod badań pali

Rodzaj badania	Zastosowanie			Mierzone wielkości	Wyniki badań	Potrzebne dodatkowe konstrukcje
	Określenie nośności pala	Określenie przemieszczeń	Jakość konstrukcji (ciągłość)			
Obciążenie statyczne	tak	tak	czasem możliwe (po interpretacji)	obciążenie i przemieszczenie głowicy pala	obciążenie i przemieszczenie głowicy pala (interpretacja nośności)	konstrukcja oporowa, siłowniki hydrauliczne, balast lub pale kotwiące
				odkształcenia trzonu na różnych głębokościach	rozkład oporów na pobocznicę i podstawie pala	rurki osadzone przed zabetonowaniem pala
Badanie dynamiczne	tak (po interpretacji)	możliwe (po interpretacji)	tak (po interpretacji)	przyspieszenia i odkształcenia głowicy pala w wyniku uderzenia	nośność, rozkład obciążeń na podstawę i pobocznicę, ekwiwalentne krzywe obciążenie-osiadanie	bijak
Badanie ciągłości	nie	nie	tak (po interpretacji)	czas powrotu fali do głowicy pala	długość pala, pęknięcia, zmiany przekroju	
				zmiany prędkości fali między rurkami kontrolnymi w trzonie	defekty materiału pala	rurki osadzone przed zabetonowaniem pala

## Badania statyczne

Obciążenie statyczne jest najbardziej miarodajną metodą oceny zachowania się pala pod obciążeniem.

Wynika to z faktu, że w czasie badania mierzymy bezpośrednio zależność osiadania od obciążeń oraz nośność graniczną, czyli wartości, które są potrzebne projektantowi. Polega ono na wywieraniu na głowicę pala obciążenia z jednoczesnym pomiarem przemieszczeń (pionowych lub poziomych) głowicy.



### Wciskanie pala

Obciążenie przykładane jest stopniami, a siła na każdym stopniu utrzymywana jest do czasu stabilizacji przemieszczeń, za którą przyjmuje się przyrost przemieszczeń mniejszy niż 5 mm w ciągu dwóch kolejnych 10 min.

Efektom próbnego obciążenia jest krzywa obciążenie-osiadanie pala. W wyniku graficznego różniczkowania powstałej krzywej tworzy się wykres pomocniczy  $dQ/ds$ , z którego wyznacza się obciążenie, jakie można dopuścić na pal.

Wyinterpretowana z wykresów nośność pala nie zależy od jego osiadań, a jedynie od kształtu wykresu.

Warunek stanu granicznego nośności ma postać:

$$Q_r \leq k \cdot N_c^\circ$$

gdzie:

$Q_r$  - obciążenie obliczeniowe na pal

$k$  - współczynnik korekcyjny zależny od kształtu wykresu pomocniczego (przyjmuje wartości 0,8-1,0)

$N_c^\circ$  - obciążenie, które można dopuścić na pal (zależne od kształtu wykresu pomocniczego).

Z krzywej obciążenie-osiadanie można bezpośrednio określić dopuszczalne obciążenia ze względu na osiadania.

Badanie statyczne na wciskanie wymaga wykonania konstrukcji oporowej do przekazywania siły na pale kotwiące.

Przy większych siłach, kiedy brakuje nośności pali wyciąganych, konieczne może być wspomaganie się balastem (fot. 1).



Fot. 1. Konstrukcja jednego z największych w Polsce próbnych obciążeń o sile ok. 14 000 kN na budowie mostu Świętokrzyskiego w Warszawie

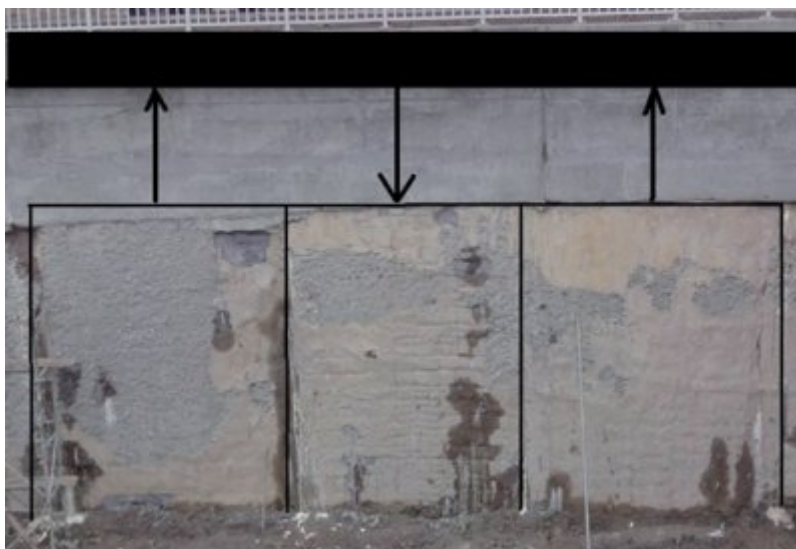
Wykonanie próbnych obciążeń konstrukcji ze ścian szczelinowych jest trudniejsze niż typowych pali. Relatywnie najprostsze jest w przypadku próbnych obciążeń na wciskanie baret stanowiących fundament głęboki, gdyż mają one większe nośności niż typowe pale wielkośrednicowe i konieczne jest przyłożenie większego obciążenia. W fundamencie, w którym jest wiele baret zwykle udaje się znaleźć odpowiednią liczbę baret kotwiących oraz wykonać odpowiednią konstrukcję oporową. W przypadku niewystarczającej siły kotwiącej można używać dodatkowego balastu z wykorzystaniem zbiorników na zawieszinę, które znajdują się na budowie w czasie ich wykonywania (fot. 2).



Fot. 2. Konstrukcja z wykorzystaniem zbiorników balastowych

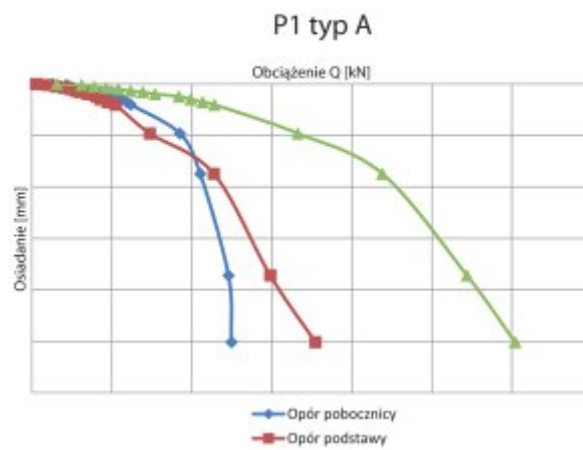
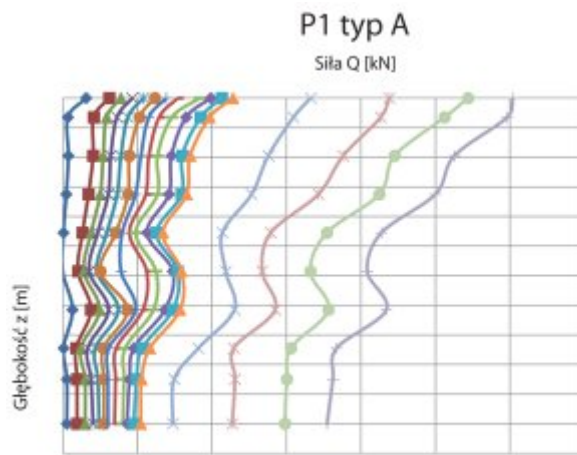
Sytuacja jest dużo trudniejsza w przypadku baret fundamentu zespolonego np. wysokich wieżowców. Przyjmowane do analiz statycznych podatności baret przewidują nośność graniczną takich elementów w granicach 20 000-30 000 kN. Próbné obciążenie powinno być zaprogramowane do siły odpowiednio zwiększonej. Takie wartości przekraczają dotychczasowe polskie doświadczenia, a wykonanie próbnego obciążenia jest bardzo trudne. Jest ono możliwe do realizacji tylko w szczególnych przypadkach, kiedy układ baret w fundamencie pozwala na wykonanie odpowiedniej konstrukcji oporowej. Z kolei próbné obciążenia w granicach dotychczasowych doświadczeń i możliwości (kilkanaście tysięcy kN) jest niesatysfakcjonujące dla projektanta. Dlatego w takich konstrukcjach fundamenty projektuje się na podstawie porównywalnych

doświadczeń, zachowując odpowiednie współczynniki bezpieczeństwa. Zagadnienie próbnych obciążeń znacząco się komplikuje jeśli mamy do czynienia z konstrukcją ciągłą w postaci ścian szczelinowych. Podstawowym problemem jest takie wyodrębnienie elementu badawczego, aby dobrze modelował pracę rzeczywistej konstrukcji. Samo wyodrębnienie sprawia, że model ten w czasie badania jest przybliżony. Generuje to też olbrzymie problemy dla wykonawcy ściany. Wymaga przygotowania elementu badawczego, przerwy między sąsiednimi elementami, czasu na związanie betonu, przeprowadzenie badania i powrót maszyny na wykonanie brakujących elementów. Te działania mogą spowodować opóźnienia w harmonogramie budowy, dlatego optymalizując kosztowo i czasowo wykonuje się niekiedy badania (autor zna je z relacji uczestników), w których sekcja ściany wciskana jest kotwiona do dwóch sąsiednich sekcji wyciąganych (fot. 3). Ze względu na przyleganie do sąsiedniego elementu kotwiącego trudno uznać takie badanie za miarodajne.

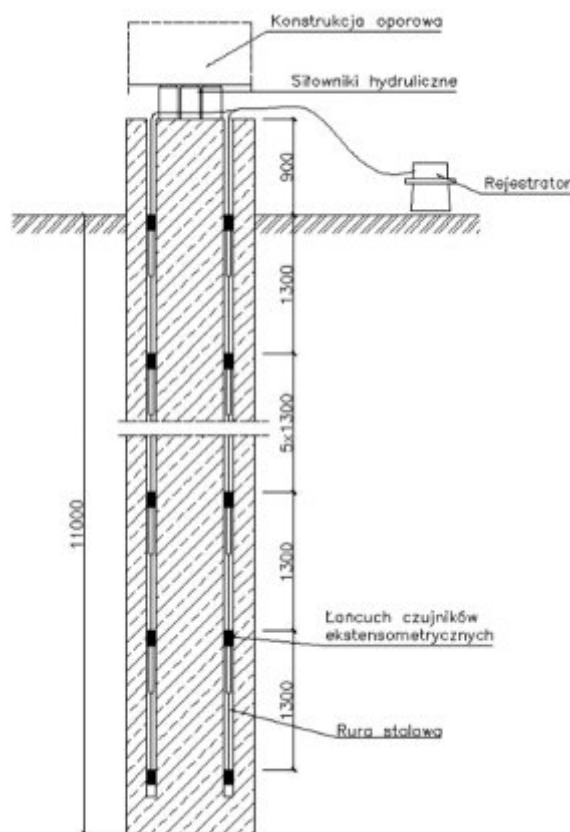


Fot. 3. Schemat badania na wciskanie sekcji ściany szczelinowej kotwionej do sąsiednich elementów

Coraz częściej przy okazji próbnych obciążeń na wciskanie wykonywane są pomiary rozkładu oporów pobocznic palu na różnych głębokościach oraz oporu podstawy. Wymaga to osadzenia w rurkach ekstensometrów, które mierzą odkształcenia pionowe trzonu betonowego palu na różnych głębokościach. Na podstawie znajomości charakterystyki modułu odkształcenia betonu możliwe jest obliczenie naprężeń oraz oporów podstawy i pobocznic na różnych głębokościach. Na rys. 1 pokazano rozkłady sił i oporów w palu, a na rys. 2 - schemat łańcucha ekstensometrycznego.



Rys. 1. Rozkład oporów podstawy i poboczniczy pala w czasie próbnego obciążenia [3]



Rys. 2. Schemat instalacji ekstensometrycznej [4]

### Wyciąganie pala

Obciążenie przykładane jest stopniami podobnie jak przy wciskaniu, a siła na każdym stopniu utrzymywana jest przez czas zależny od warunków gruntowych. Podstawą dalszej interpretacji jest maksymalna siła przyłożona na pal w czasie próbnego obciążenia.

Warunek stanu granicznego nośności wg normy [1] ma postać:

$$Q_r \leq 0,6 \cdot N_w$$

gdzie:

$Q_r$  - obciążenie obliczeniowe na pal

$N_w$  - graniczne obciążenie wyciągające pala, wynikające z próbnego obciążenia.

Badanie wymaga wykonania relatywnie prostszej konstrukcji oporowej (fot. 4). Siłę przykładaną do pala można przenieść na grunt lub na sąsiednie pale. Nie ma problemów z ich liczbą, ponieważ dwa sąsiednie pale na wciskanie będą miały dużo większą nośność niż ten, który jest badany na wyciąganie. Pomiary takie wykonuje się, np. w przypadku pali kotwiących, fundamentów słupów energetycznych, wysokich masztów itp.



Fot. 4. Stanowisko do próbnego obciążenia pala na wyciąganie

### Obciążenie boczne

Obciążenie przykładane jest do głowicy pala stopniami, a siła na każdym stopniu utrzymywana jest do czasu stabilizacji przemieszczeń. Warunek przemieszczeń bocznych wg normy [1] ma postać:

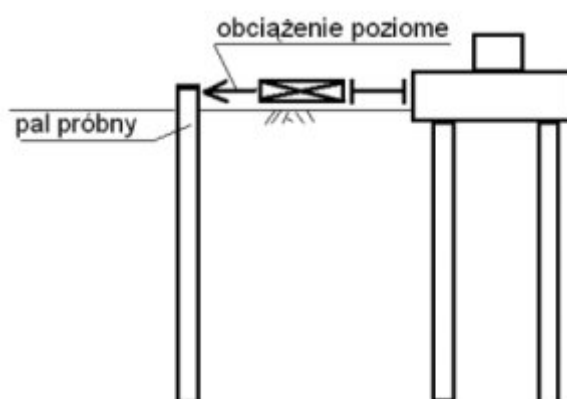
$$y_o \leq y_d$$

gdzie:

$y_o$  - przemieszczenie osi pala w poziomie terenu pod wpływem obciążenia

$y_d$  - dopuszczalne przemieszczenie boczne; jeśli nie zostało określone przez projektanta przyjmuje się 10 mm.

Badanie wykonuje się w przypadku konstrukcji obciążonych siłami poziomymi, np. ekrany akustyczne, słupy energetyczne, wiatraki, wysokie maszty. Konstrukcja do przeniesienia obciążenia jest relatywnie najprostsza. Siłownik hydrauliczny można rozeprzeć o sąsiedni pal. Możliwe jest ściąganie do siebie dwóch podobnych elementów. Ze względu na niewielkie siły do przeniesienia obciążenia mogą być wystarczające warstwy nawierzchni lub sprzęt budowlany (np. koparka). Na rys. 3 pokazano schemat próbnego obciążenia pala dodatkowego z wykorzystaniem fundamentu istniejącego, fot. 5 - przedstawia przykład badania pali ekranu przeciwhałasowego na skarpie, natomiast na fot. 6 widzimy badania porównawcze dwóch różnych pali.



Rys. 3. Schemat próbnego obciążenia na siły poziome



Fot. 5. Przykład próbnego obciążenia na siły poziome pali ekranów akustycznych



Fot. 6. Przykład badań porównawczych – próbné obciążenia na siły poziome dwóch różnych rodzajów pali

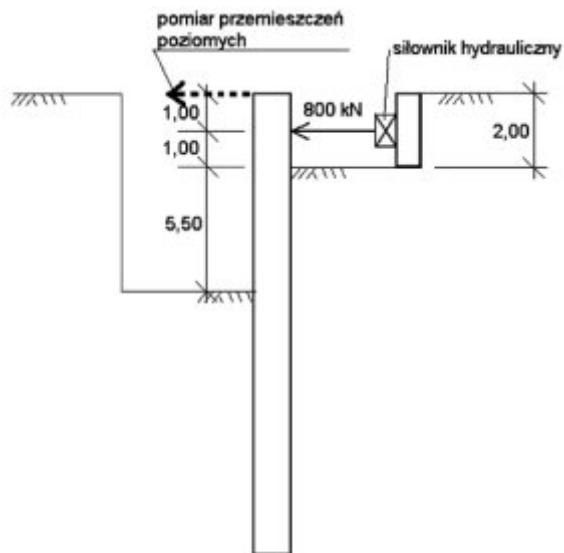
### **Obciążenie boczne odkopanych ścian oporowych**

Znacznie trudniejsze jest badanie poziome ścian oporowych, które wykonuje się czasami w przypadku konstrukcji ze ścian szczelinowych. Poniżej przedstawiono przykłady dwóch takich realizacji.

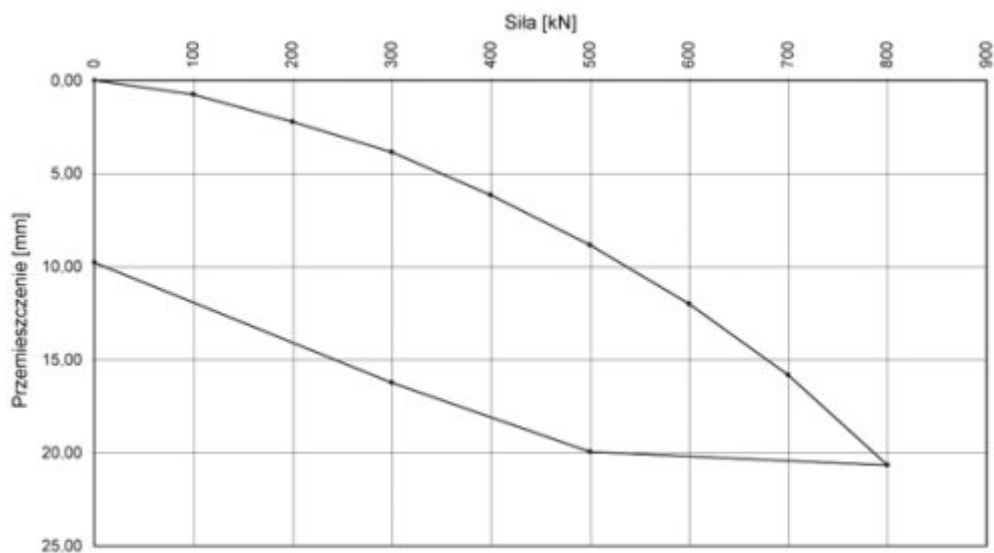
Podczas wykonywania ścian szczelinowych tunelu wraz z oporowymi Drogowej Trasy Średnicowej w Katowicach przeprowadzono 11 próbných obciążeń. Osiem badań dotyczyło ścian oporowych, które odkopano i obciążono siłą poziomą, dwa kolejne – na elementach wydzielonych z sekcji tunelu, obciążając je siłą pionową, a jedno – przykładając siłą pionową wykonano na fundamencie kładki dla pieszych. Były to pierwsze w Polsce badania w tej skali odkopanych ścian szczelinowych.

Próbné obciążenie siłą poziomą sekcji ścian oporowych przeprowadzono w dwóch etapach – najpierw odkopano ścianę do głębokości 7,5 m poniżej jej wierzchu i punktów pomiarowych (rys. 4).





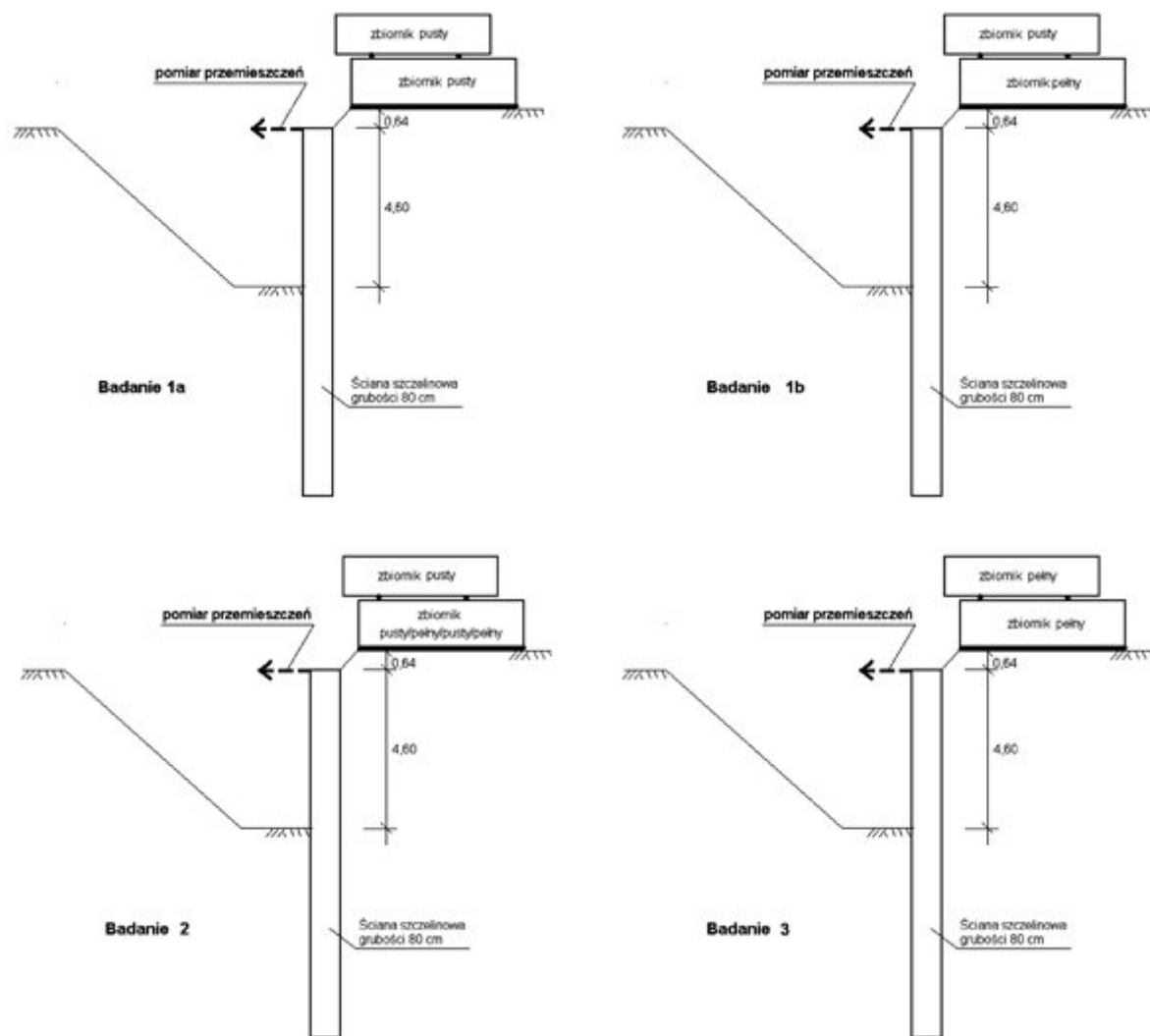
Rys. 4. Schemat konstrukcji obciążające



Rys. 5. Wykres przemieszczeń poziomych baryty w zależności od przyłożonej siły

W drugim etapie obciążenie wywierano siłownikiem hydraulicznym opartym o płytę oporową.

Korzystając ze zdobytych przy budowie DTŚ w Katowicach doświadczeń, przy kolejnym obiekcie zmieniono schemat badań. W trakcie przebudowy Ronda Mogilskiego w Krakowie konieczne było wykonanie badań nośności ściany szczelinowej. Ze względu na napięty harmonogram zdecydowano się na przygotowanie dodatkowego elementu badawczego, który nie kolidował z wykonywaniem robót. Element ten odwzorowywał najbardziej wyężony fragment ściany oporowej. Badanie przeprowadzono w trzech etapach. W części 1a ściana została jednostronnie odkopana do głębokości 4,60 m. Na naziemiu w czasie badania stały puste zbiorniki na zawieszinę bentonitową. Przed i po odkopaniu wykonano pomiary geodezyjne przemieszczeń poziomych wierzchu ściany w dwóch punktach. Dla uzyskania i pomierzenia ich pełnej stabilizacji odczytano pomiar końcowy po 16 h od zrobienia wykopu. Średnia wartość przemieszczenia górnej części ściany szczelinowej z pomiaru w dwóch punktach wyniosła 3,2 mm. Schematy badań pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Schematy poszczególnych badań

W części 1b dwa dolne zbiorniki zostały napełnione zawiesiną bentonitową, której gęstość, potrzebna do obliczenia przyłożonego nacisku, została zmierzona w laboratorium wykonawcy ściany. W trakcie napełniania zbiorników i całego badania prowadzono pomiary przemieszczeń poziomych wierzchu ściany, aż do ich stabilizacji w dwóch punktach za pomocą czujników zegarowych o dokładności odczytu 0,01 mm. Maksymalne przemieszczenie w etapie 1b wyniosło 0,57 mm.

W części 2 element badawczy był obciążany cyklicznie. Zostało to zrealizowane przez napełnianie i opróżnianie zbiorników balastowych. Wykonano trzy cykle obciążenie/odciążenie. Napełniane i opróżniane zbiorniki wraz z nadkładem gruntu wywierały na naziemie nacisk 39,4-19,1 kPa. Maksymalne przemieszczenie w badaniu 2 wyniosło 0,28 mm.

W części 3 podjęto próbę przeciążenia ściany powodując naciski większe niż będą występować na jej naziemie. W pierwszym etapie zostały napełnione zawiesiną bentonitową dwa dolne zbiorniki, które wraz z nadkładem gruntu wywierały nacisk 39,4 kPa. Pozostawiono je na 10 hw celu oceny wpływu obciążeń długotrwałych. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 0,18 mm.

W drugim etapie badania zostały napełnione zawiesiną bentonitową dwa górne zbiorniki, które wraz z nadkładem gruntu wywierały na naziemie średni nacisk 57,5 kPa. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 1,28 mm, a po wypompowaniu zawiesiny ze zbiorników - 0,65 mm (przy nacisku 19,1 kPa).

Zalety badań statycznych:

- bezpośrednie określenie nośności granicznej lub częściej obciążenia maksymalnego
- bezpośredni pomiar przemieszczeń

- łatwa zgrubna ocena wyników w czasie badania
- warunki badania najlepiej odpowiadają rzeczywistej pracy konstrukcji.

Wady badań statycznych:

- czasochłonne przygotowania do badań
- relatywnie długi czas samego badania
- konieczność wykonania konstrukcji oporowej z zastosowaniem pali kotwiących lub balastu
  - wynikający z tego duży koszt badania
- niemożność wykonania w trudnych lokalizacjach (brak pali kotwiących, problemy z zastosowaniem balastu).

### **Badania dynamiczne**

Badania dynamiczne ze względu na łatwość przyłożenia obciążenia i dostępność sprzętu najczęściej wykonywane jest na palach prefabrykowanych. Zdecydowanie rzadziej obciążane są tą metodą pale większych średnic czy baret.

Badanie polega na uderzeniu w głowicę pala ciężkim bijakiem, który ma zwykle masę kilku ton. Rejestruje się wówczas przyspieszenia i odkształcenia w głowicy pala (fot. 7 i 8). W wyniku analizy równania różniczkowego opisującego przemieszczenia pala otrzymuje się (w zależności od przyjętej metody interpretacji) nośność graniczną, opory na pobocznicę i podstawie, rozkład oporów wzdłuż pobocznicę i skrócenie pala.



Fot. 7. Czujniki do pomiaru odkształceń i przyspieszeń w badaniu dynamicznym pala



Zalety badania:

- szybkość przeprowadzenia badania
- brak dużych dodatkowych konstrukcji, przygotowanie pala ogranicza się do przygotowania głowicy pala i urządzenia umożliwiającego uderzenie bijaka
  - wynikająca z tego niższa cena
- mniejsza uciążliwość dla prowadzonej budowy.

Wady badania:

- wynik badania zależy od wprowadzonych do obliczeń danych (materiałowe, geometryczne)
  - przeprowadzenie badań i ich interpretacja wymaga dużego doświadczenia i wiedzy
- interpretacja wyników badania jest czasochłonna i nie może zostać podana bezpośrednio po przeprowadzeniu badania
  - badanie jest trudno ocenialne przez osoby postronne (np. inspektora nadzoru).

### Badania ciągłości

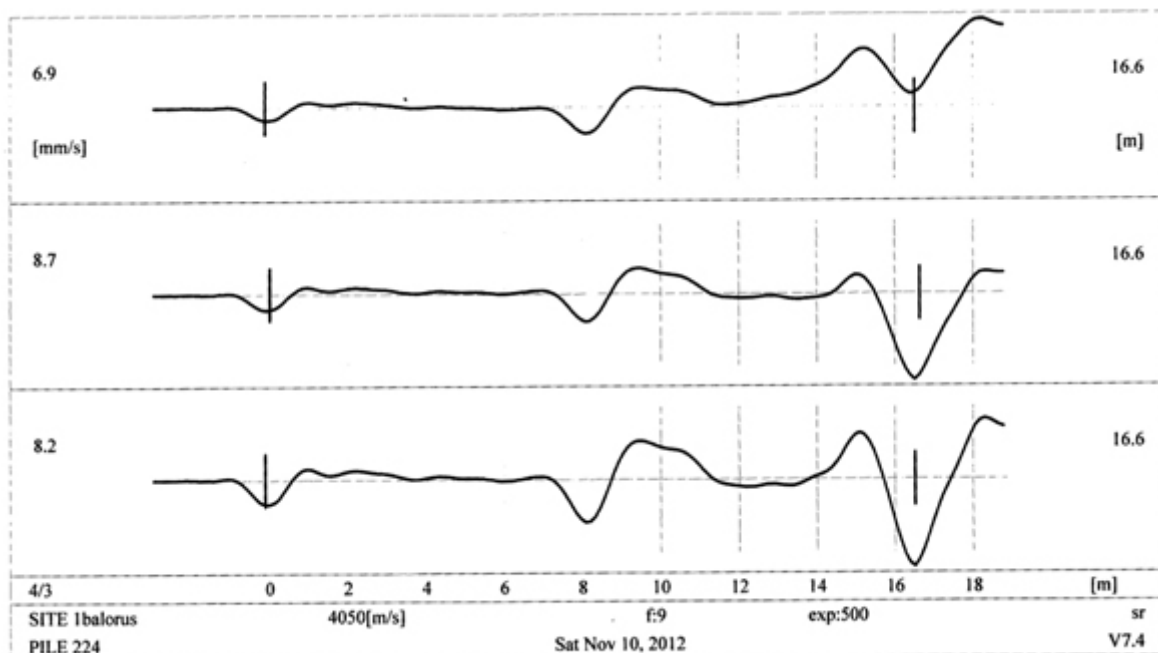
Badania ciągłością metodą oceny charakterystyk przebiegu fali (Sonic Echo Integrity Testing) wymaga tylko przygotowania głowicy i polega na uderzeniu w nią specjalnym młotkiem oraz zarejestrowanie efektów odbitej fali czujnikiem przyspieszeń zamocowanym do głowicy. Mierząc czas opóźnienia odbitego sygnału oraz znając prędkość rozchodzenia się fali możemy obliczyć długość pala. W przypadku zmian w jego przekroju (pogrubienia lub zwężenia) fala odbija się częściowo wcześniej, co znajduje odzwierciedlenie w rejestrowanych parametrach.

Prędkość rozchodzenia się fali zależy od materiału pala. Rozbieżności pomiędzy wprowadzonymi danymi a rzeczywistymi właściwościami skutkują analogicznymi błędami w ocenie jego długości.

Na fot. 9 pokazano urządzenie do badań ciągłości, a na rys. 7 - zarejestrowany wynik. Na wykresie widać, że pal ma długość 16,6 m, a w jego połowie można spodziewać się defektów.



Fot. 9. Urządzenie do badania ciągłości



Rys. 7. Wynik badania ciągłości [4]

Zalety badania:

- szybkość przeprowadzenia badania
- brak dodatkowych konstrukcji
- łatwość przeprowadzenia badania nawet na wszystkich palach danego fundamentu
  - wynikająca z tego niska cena
- łatwe powtórzenie badania w przypadku wadliwej rejestracji wyników.

Wady badania:

- wynik badania zależy od wprowadzonych danych materiału, z którego wykonany jest pał
- poprawna rejestracja danych zależy od umiejętnego przyłożenia czujnika i uderzenia młotkiem
  - przeprowadzenie badań i ich interpretacja wymaga dużego doświadczenia i wiedzy
  - badanie jest trudno oceniane przez osoby postronne (np. inspektora nadzoru)
  - bardzo trudno wykryć niewielkie defekty pała.

mgr inż. Piotr Rychlewski  
Instytut Badawczy Dróg i Mostów

#### Literatura

1. PN-B-02482:1983, Fundamenty budowlane – Nośność pali i fundamentów palowych
2. PN-EN 1536:2001, Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Pale wiercone
3. C. Szymankiewicz, *Poszerzenie podstaw pali metodą iniekcji strumieniowej*, Seminarium: Nowatorskie rozwiązania w mostownictwie i geoinżynierii, Warszawa, listopad 2012
4. Materiały z badań wykonanych przez Polowe Laboratorium Badań Pali IBDiM