

Magdalena Kreczmar¹, Jerzy Sękowski²

BADANIA MODELOWE PALI OBCIĄŻONYCH SIŁĄ POZIOMĄ

Wprowadzenie

Podstawową metodą projektowania pali są próbne obciążenia statyczne [1]. Uznaje się je za najdokładniejszą metodę pomiaru nośności pali obciążonych siłą pionową. Pomiar osiadań pala pozwala wyznaczyć zarówno graniczne (zależne od gruntu), jak i względne (zależne od materiału pala) dopuszczalne pionowe obciążenie.

W przypadku pali obciążonych siłą poziomą pomiar przemieszczeń pala w poziomie działania obciążenia informuje tylko o bocznej nośności granicznej pala. Na podstawie badań nie można określić dopuszczalnej względnej nośności bocznej pala. Związane jest to z trudnością doprowadzenia obciążenia do siły, powodującej złamanie pala.

W literaturze istnieje wiele metod obliczania pali obciążonych siłą poziomą [2]. Uzyskane według tych propozycji wyniki są niejednokrotnie rozbieżne [3]. Zasady projektowania pali pod obciążeniem bocznym nie są jednoznaczne [4, 5]. Uzasadnione jest więc podejmowanie badań i analiz zmierzających do bardziej szczegółowego rozpoznania tego problemu.

1. Badania modelowe

Celem badań modelowych była obserwacja zachowania się pala o różnej sztywności, zagłębionego w gruncie, podczas obciążania rosnącą siłą poziomą, łącznie z pomiarem przemieszczeń jego głowicy. Wykonano je w Laboratorium Katedry Geotechniki i Dróg Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej.

¹ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: magdalena.kreczmar@polsl.pl

² Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: Jerzy.Sekowski@polsl.pl

1.1. Stanowisko i materiały do badań

Badania modelowe wykonano w skrzyni o wymiarach 1 x 1 x 1 m. Ściany oraz podstawę skrzyni wykonano ze szkła akrylowego o grubości 2 cm. Sztwność skrzyni zapewniły stalowe kątowniki (L50 x 50 x 5 cm), stężone symetrycznie na jej wysokości stalowymi kształtownikami.

Podłoże gruntowe zamodelowano w postaci dwóch warstw. Dolną warstwę (nośną) o miąższości 40 cm stanowił równoziarnisty żwir (Z), natomiast górną warstwę (słabszą) o miąższości 50 cm stanowił równoziarnisty piasek średni (Ps).

Pale do badań modelowych o wymiarach 4 cm x 4 cm x 90 cm wykonano z zaprawy posadzkowej M-20, odpowiadającej parametrom wytrzymałościowym betonu C12/15. Wykorzystano do tego celu drewnianą formę, której podstawa miała wymiary 95 cm x 60 cm x 1 cm. Wydzielono na niej 10 pól, każde o szerokości 4 cm, oddzielonych pionowymi drewnianymi ściankami grubości 1 cm i wysokości 4 cm. Podobnymi ściankami zamknięto formę z pozostałych stron. W trzech polach, centralnie w osi podłużnej, umieszczono zbrojenie z prętów gładkich ϕ 4 mm, w kolejnych trzech z prętów gładkich ϕ 10 mm, pozostałe pola były bez zbrojenia.

Tak przygotowana forma została zalana zaprawą. Równolegle przygotowano próbki o wymiarach 4 x 4 x 16 cm do sprawdzenia parametrów wytrzymałościowych zaprawy. Pale i wspomniane próbki przez okres 28 dni pielęgnowano, przechowując je w pomieszczeniu laboratoryjnym w stabilnych warunkach wilgotnościowo-temperaturowych. Po 28 dniach formę rozmontowano. Pale opisano jak na rysunku 1.



Rys. 1. Pale przygotowane do badań modelowych

W tabeli 1 zestawiono natomiast wyniki badań wytrzymałościowych przeprowadzonych na beleczkach w maszynie wytrzymałościowej (trzech na zginanie i sześciu na ściskanie).

TABELA 1

Wyniki badań wytrzymałościowych

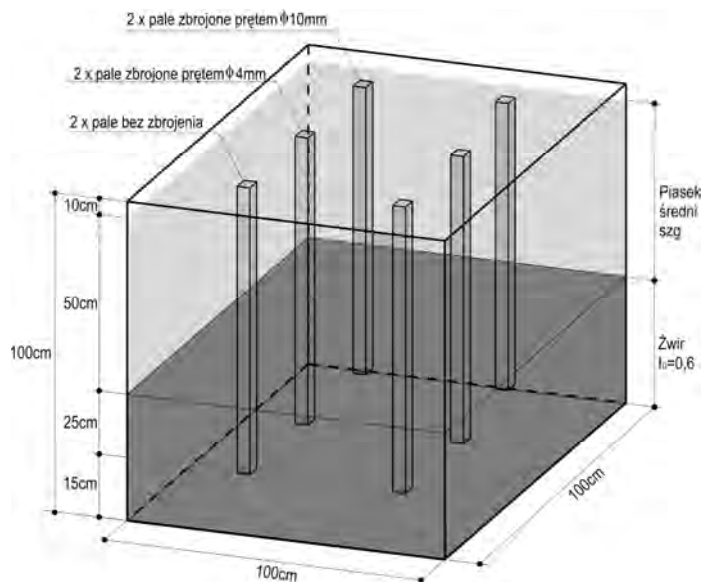
Nr próbki	Termin badania (dni)	Siła łamiąca P_z [kN]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]		Siła niszcząca [kN]		Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
			Rzgi	Rzg	P1	P2	R1s	R2s	Rs
1	28	1,64	3,86		23,13	20,44	14,46	12,77	
2	28	1,92	4,52	4,38	29,12	30,30	18,19	18,96	17,92
3	28	2,03	4,77		35,42	33,70	22,13	21,06	

1.2. Przygotowanie stanowiska do badań

Skrzynia od dołu została wypełniona żwirem o miąższości 40 cm. Żwir usypywany był warstwami po 5 cm. Każda warstwa została zagęszczona jednokrotnie ręcznym ubijakiem o masie 0,5 kg, opuszczanym swobodnie z wysokości 10 cm - miejsce obok miejsca. Po uformowaniu pierwszych 15 cm żwiru ułożono geowłókninę separacyjną, na której „oparto” podstawy 6 pali. Pale zostały umieszczone w skrzyni w dwóch rzędach, w rozstawie (w osiach) co 24 cm.

Pionowość i odpowiedni rozstaw poszczególnych pali zapewniała drewniana konstrukcja wsporcza zamocowana do ścianek skrzyni. Kolejne 25 cm żwiru uformowano zgodnie z podaną powyżej procedurą. Na warstwie żwiru ponownie ułożono geowłókninę, a na niej układano warstwami o miąższości 5 cm piasek średni, zagęszczanymi w podobny sposób jak podścielający go żwir. Łączna miąższość piasku wynosiła 50 cm.

Tak przygotowany model podłoża z umieszczonymi w nim palami schematycznie przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Stanowisko badawcze - aksonometria

W celu określenia stanu zagęszczenia piasku wykonano 9 sondowań statycznych sondą lekką Hanson 5 (rys. 3) z końcówką o przekroju 1 cm^2 na głębokość 40 cm.

Uśrednione opory stożka (q^{sr}) w przelocie: $0 \div 10 \text{ cm}$; $10 \div 20 \text{ cm}$; $20 \div 30 \text{ cm}$ i $30 \div 40 \text{ cm}$ wynosiły odpowiednio: 29; 171; 360; 508. Wartości do dalszych obliczeń ($q^{\text{sr}*}$) uzyskujemy przemnażając wartość uśrednioną (q^{sr}) przez współczynnik 0,01 - (dla końcówki o powierzchni 1 cm^2). Wykorzystując propozycję zależności stopnia zagęszczenia (I_D) od wspomnianego oporu (q^{sr}), podaną dla suchego piasku średniego przez Soczawę [6] w postaci: $I_D = 0,174 \ln q^{\text{sr}*} + 0,518$, określono zagęszczenie piasku w skrzyni dla wymienionych przelotów warstwy piasku jak niżej:

Określono zagęszczenie piasku w skrzyni dla wymienionych przelotów warstwy piasku: $I_D = 0,3$; $I_D = 0,61$; $I_D = 0,71$; $I_D = 0,80$.

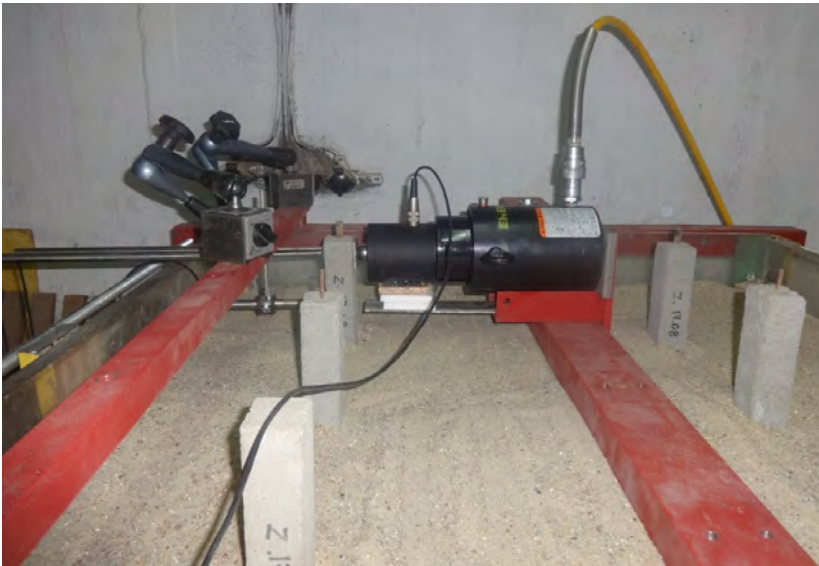
Tym samym piasek średni, z wyjątkiem pierwszych 10 centymetrów, był w obrębie pozostałej warstwy w stanie średnio zagęszczonym i zagęszczonym.



Rys. 3. Sonda statyczna HANSON 5

Po usunięciu drewnianej konstrukcji wsporczej do stalowej ramy usztywniającej górną część skrzyni zostały przymocowane: stalowa konstrukcja i stalowy kątownik służące odpowiednio do: zamocowania siłownika z siłomierzem oraz czujników indukcyjnych, rejestrujących przemieszczenie badanego pala. Przemieszczenie badanego pala rejestrowano w trzech punktach. Dwa czujniki zostały przyłożone do głowicy pala na tej samej wysokości co przyłożona siła - w rozstawie 3 cm (jako wynik przyjęto wartość średnią z obydwu czujników). Trzeci czujnik został umieszczony 10 cm niżej (rys. 4). Stalowy kątownik z czujnikami zamocowano poza zasięgiem oddziaływania obciążanego pala. Obciążenie zrealizowano

za pomocą siłownika hydraulicznego. Pomiar siły, jaka została przyłożona do pala, realizowany był za pomocą siłomierza, podłączonego do komputera.



Rys. 4. Układ obciążający (siłownik i siłomierz) oraz czujniki do pomiaru przemieszczeń pala

1.3. Metodyka badań

Wstępnie zdecydowano się na jednakowy dla wszystkich pali program badań, przewidując, zgodnie z [7], przykładanie obciążenia poziomego w 10 krokach, co 0,15 kN, do wartości $H = 1,5$ kN (150% obciążenia dopuszczalnego). Podstawą przyjęcia wartości siły dopuszczalnej na poziomie 1 kN były wstępne obliczenia numeryczne (w programie Zsoil) przeprowadzone przez autorów dla pala zbrojonego prętem $\phi 10$ mm w piasku o $I_D = 0,3$. Podczas prowadzonych badań stosowano jednak kroki co 0,1 kN. Zdecydowały o tym wyraźnie mniejsze wartości obciążeń granicznych pali zbrojonych prętem $\phi 4$ mm, od którego rozpoczęto badanie.

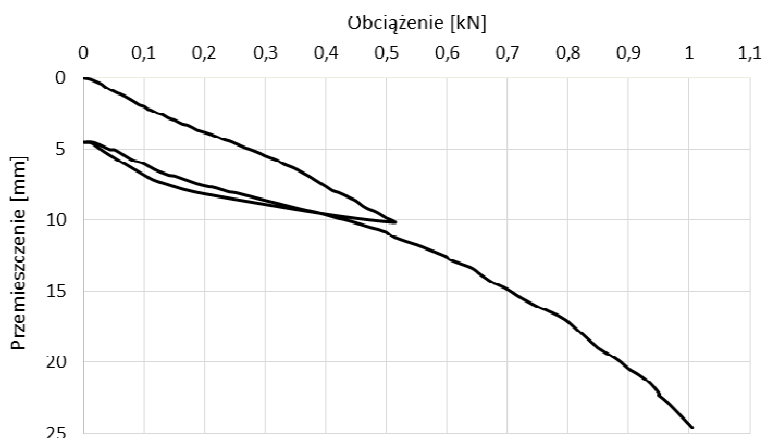
W pierwszej kolejności obciążano pal zbrojony prętem $\phi 4$ mm do uzyskania przemieszczenia $y = 10$ mm, po czym pal odciążono i obciążono powtórnie, stosując podobne kroki. Warunkiem przyłożenia kolejnego kroku obciążenia/odciążenia była umowna stabilizacja przemieszczenia $\Delta y \leq 0,05$ mm w okresie 10 minut. Obciążanie pala zakończono po wyczerpaniu jego nośności. Taki sposób obciążenia zrealizowany został także w odniesieniu do pala zbrojonego prętem $\phi 10$ mm. Przykładanie obciążenia przerwano po uzyskaniu wartości siły poziomej 1 kN ze względu na oznaki wyczerpania nośności pala (przyrost przemieszczeń poziomych bez przyrostu siły obciążającej).

W przypadku pala niezbrojonego nie udało się osiągnąć przemieszczenia poziomego na poziomie $y = 10$ mm, gdyż wcześniej pal uległ złamaniu.

2. Wyniki badań i ich analiza

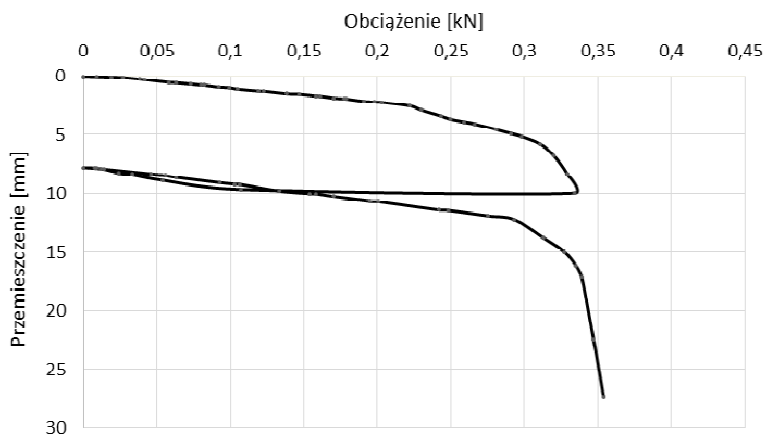
Przeprowadzono trzy serie badań. W każdej z nich zbadano dwa pale, odpowiednio: I seria - pale zbrojone prętem ϕ 4 mm, II seria - pale zbrojone prętem ϕ 10 mm oraz III seria - pale bez zbrojenia. Na rysunkach 5-7 przedstawiono uśrednione wykresy zależności: „siła - przemieszczenie głowicy pala” w miejscu przyłożenia siły poziomej dla każdej serii.

Pal zbrojony prętem ϕ 10 mm osiągnął przemieszczenie (10 mm) przy obciążeniu 0,5 kN (rys. 5). Następnie pal odciążono i ponownie obciążono do wartości siły 1 kN, uzyskując przemieszczenie 24,6 mm.



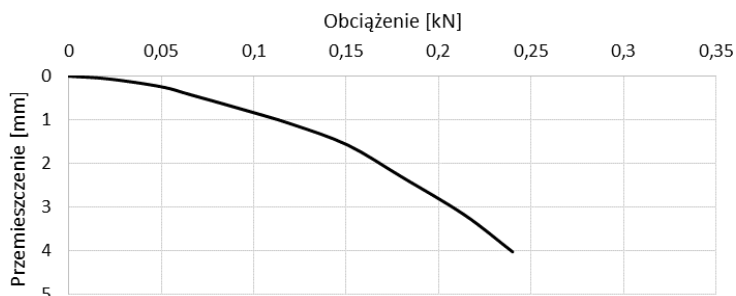
Rys. 5. Obciążenie - przemieszczenie, pal zbrojony prętem ϕ 10 mm

Pal zbrojony prętem ϕ 4 mm osiągnął dopuszczalne przemieszczenie (10 mm) przy obciążeniu 0,33 kN (rys. 6). Następnie pal odciążono i ponownie obciążono do wartości siły 0,36 kN, uzyskując przemieszczenie równe 22,4 mm.



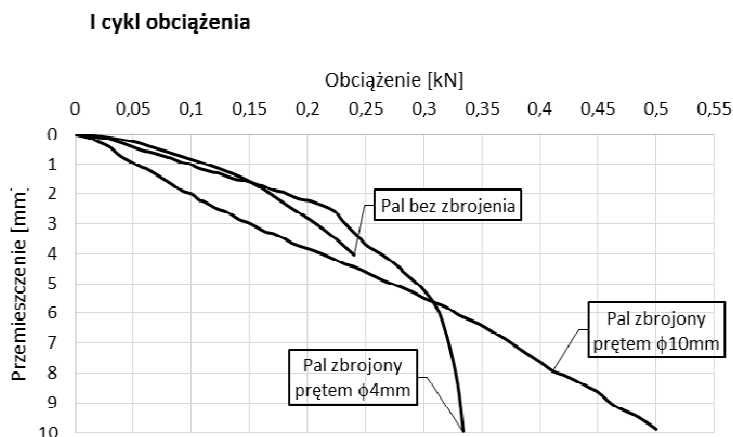
Rys. 6. Obciążenie - przemieszczenie, pal zbrojony prętem ϕ 4 mm

Pal bez zbrojenia nie osiągnął przemieszczenia 10 mm. Przy obciążeniu 0,24 kN pal uległ złamaniu, wykazując przemieszczenie głowicy 4 mm (rys. 7).



Rys. 7. Obciążenie - przemieszczenie, pal bez zbrojenia

Na rysunku 8 przedstawiono zależności „obciążenie - przemieszczenie poziome” pali dla pierwszego cyklu obciążenia: przemieszczeń o wartości $y = 10$ mm (dla pali zbrojonych), względnie do momentu zniszczenia (pal bez zbrojenia).

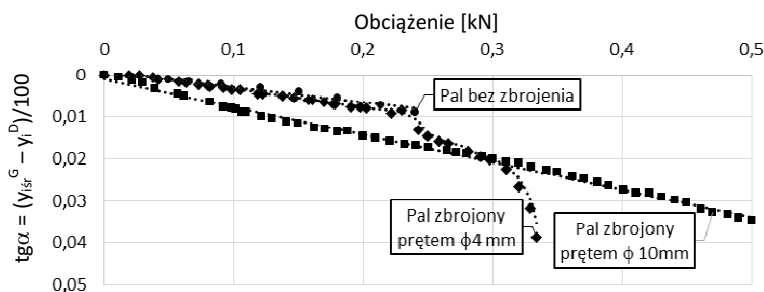


Rys. 8. Zestawienie wyników. Pierwszy cykl obciążenia

Na rysunku 9 przedstawiono natomiast wychylenia z pionu pali w funkcji przykładanego obciążenia w jego pierwszym cyklu (jak wyżej), mierzonego różnicą przemieszczeń w miejscu przyłożenia siły poziomej ($y_{i sr}^G$) i 10 cm niżej (y_i^D) przez zainstalowane czujniki do odległości czujników ($\text{tg}\alpha = (y_{i sr}^G - y_i^D)/100$).

Z analizy wyników (rys. 5-9) można wnioskować o innym zachowaniu każdego z pali pod obciążeniem siłą poziomą. Potwierdzeniem tego jest również wygląd pali i obraz ich zarysowań, stwierdzony po rozmontowaniu stanowiska.

W przypadku pali bez zbrojenia przemieszczenie głowicy w momencie złamania było niewielkie (ok. 4 mm). Bezpośrednią przyczyną zniszczenia pali było ich poziome zarysowanie, które wystąpiło w warstwie piasku w odległości 28 cm (pierwszy pal) i 33,5 cm (drugi z pali), licząc od miejsca przyłożonego obciążenia.



Rys. 9. Wychylenia pali w funkcji obciążenia

W przypadku pali zbrojonych prętem 4 mm zarysowania wystąpiły w dwóch przekrojach, pierwsze w odległości 14 cm i 18 cm (odpowiednio w pierwszym i w drugim z badanych pali). Drugie zarysowanie na wskroś w obydwu palach w odległości 27 cm, licząc od punktu przyłożenia siły poziomej. W następstwie wystąpienia wspomnianych zarysowań do współpracy w przenoszeniu obciążenia poziomego włączone zostało zbrojenie. Na fakt ten wskazuje zmiana nachylenia pala (rys. 9).

W podobny sposób zachowywał się pal zbrojony prętem 10 mm. W tym jednak przypadku zarysowanie miało miejsce na głębokości 40 cm w obydwu przypadkach. Zarysowania badanych pali wystąpiły w warstwie piasku w górnej jej strefie. Zwraca uwagę niewielkie, trwałe wygięcie pali zbrojonych w ich górnej części (5÷10 mm).

Pale zbrojone prętem $\phi 10$ mm mogą przenieść znacznie większe obciążenie niż pale z pozostałych dwóch grup kosztem zwiększonego przemieszczenia poziomego głowicy. Wokół każdego z badanych pali obserwowano tworzenie się niewielkiego obniżenia piasku od strony przykładanego obciążenia i widocznego wypiętrzenia po stronie przeciwnej.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych rezultatów wynika, że zachowanie pala obciążonego siłą poziomą zależy od jego sztywności. Niezbrojony pal przenosi obciążenie praktycznie do momentu zarysowania i w konsekwencji kruchoego zniszczenia. W przypadku pali zbrojonych pojawiające się zarysowania „uaktywniają” zbrojenie, które w miarę rozwoju rysy zaczyna praktycznie pracować samodzielnie. Istotny przy tym pozostaje stopień zbrojenia. Przy niewielkim udziale zbrojenia (w badaniu ok. 0,8%) nośność pala wzrosła o ok. 50%, podczas gdy w palu o większym stopniu zbrojenia (ok. 4,9%) wyniosła ona ponad czterokrotnie. Taki obraz zachowania się pala pod obciążeniem poziomym ma miejsce dla mało odkształcalnej górnej warstwy podłoża. Zdaniem autorów, wyjaśnienia wymaga wpływ otoczenia pala (rodzaj i stan gruntu), jak również sposób jego zbrojenia na zachowanie pod obciążeniem poziomym. Wskazane byłoby ponadto dokładniejsze opróbowanie badanych pali (tensometry).

Przeprowadzone badania mają charakter wstępny i jakościowy. Nie udało się bowiem, pomimo starań autorów, zachować wszystkich warunków podobieństwa modelowego. Dla pełniejszej oceny zachowania się pali pod obciążeniem poziomym niezbędne są również analizy numeryczne i badania terenowe.

Literatura

- [1] PN-EN 1997-1:2008 - Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne - Część 1: Zasady ogólne.
- [2] Gwizdała K., Fundamenty palowe. Badania i zastosowania, tom 2, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [3] Gawlik M., Obliczanie pali obciążonych siłą poziomą - wybrane metody. Zarys wybranych zagadnień z inżynierii lądowej, Prace naukowe doktorantów, Praca zbiorowa pod red. J. Bzówki, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016, 85-92.
- [4] Węgrzyn M., Wyznaczenie nośności bocznej pali pojedynczych z wykorzystaniem obciążeń próbnych, Archiwum Hydrotechniki 1962, IX, 3, 315-413.
- [5] Wyjadłowski M., Probablistyczna ocena nośności bocznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych, Inżynieria i Budownictwo 2011, 1, 33-36.
- [6] Soczawa A., Zależność stopnia zagęszczenia piasku od oporu lekkiej sondy statycznej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1995, Budownictwo 80, 141-150.
- [7] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.

Streszczenie

W artykule przedstawiono stanowisko do badań modelowych pali obciążonych siłą poziomą oraz metodykę przeprowadzonych badań. Zasadniczymi elementami stanowiska była skrzynia o wymiarach 1 x 1 x 1 m, pale o wymiarach 4 x 4 x 90 cm oraz układ obciążający i pomiarowy. Zamieszczono wyniki badań dla trzech rodzajów pala: pala zbrojonego prętem ϕ 4 mm, pala zbrojonego prętem ϕ 10 mm oraz pala bez zbrojenia i je przeanalizowano.

Słowa kluczowe: pale fundamentowe, fundament, nośność

Model research on piles subjected to lateral load

Abstract

This paper presents results of model research on piles subjected to lateral load and methodology of this research. The essential elements of the test stand were: box with dimensions of 1 x 1 x 1 m, piles with dimensions 4 x 4 x 90 cm, loading and measuring system. The results of the test for three types of piles are shown and discussed (pile reinforced pile with ϕ 4 mm, pile reinforced with ϕ 10 mm, unreinforced pile).

Keywords: foundation piles, foundation, bearing capacity