

Kazimierz GWIZDAŁA, Marcin BLOCKUS

Katedra Geotechniki i Geologii Stosowanej
Politechnika Gdańska

WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO METODĄ DYNAMICZNEJ WYMIANY (DR) DLA POSADOWIENIA OBIEKTÓW TERMINALU KONTENEROWEGO

Streszczenie. W referacie omówiono metody wzmocnienia odkształcalnego podłoża dla posadowienia placów składowych oraz obiektów na terenie terminalu kontenerowego. Zastosowano wielkośrednicowe kolumny żwirowe $\phi=2,2\text{m}$, wykonane metodą Dynamicznej Wymiany oraz kolumny z tłuczni kamiennego $\phi=0,8\text{m}$, wykonane metodą wibrowymiany. Przedstawiono wyniki próbných obciążeń statycznych wybranych elementów wzmocnienia oraz ocenę modułów odkształceń dla kolumn pojedynczych, grupy kolumn oraz wzmocnionego podłoża rodzimego.

IMPROVEMENT OF A SUBSOIL BY DYNAMIC REPLACEMENT METHOD FOR FOUNDATION OF CONTAINER TERMINAL STRUCTURES

Summary. In the paper the method of improvement of deformable subsoil under stacking yards and other structures located in the area of container terminal is presented. In the method large diameter gravel columns $\phi=2.2\text{m}$ made by dynamic replacement (DR) as well as stone columns $\phi=0.8\text{ m}$ performed by vibro-replacement techniques were applied. Some results of static load tests for chosen improvement elements together with evaluation of deformation moduli for individual columns, groups of columns and improved mineral subsoil are presented.

1. Wstęp

Posadowienie budynków, zbiorników, nasypów, placów składowych, parkingów itd. na gruntach słabonośnych o dużej odkształcalności jest obecnie bardzo częste. Dodatkowym utrudnieniem są grunty uwarstwione o silnie różniących się modułach odkształcenia, np. miękkoplastyczne namuły, torfy – średnio zagęszczone i zagęszczone piaski lub żwiry.

W przypadku obciążeń działających na znacznych powierzchniach najczęściej dążymy do wzmocnienia całej objętości gruntu w odróżnieniu od lokalnego wzmocnienia, np. za pomocą pali pod stopą fundamentową. W każdym przypadku powinno to być rozwiązanie poprawne technicznie oraz ekonomiczne. W takiej sytuacji jednym z najważniejszych parametrów projektowania są moduły odkształcenia, a decydujący staje się stan graniczny użytkowalności.

Należy w tym miejscu podkreślić, że **Jubilat, prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański** w swojej bogatej działalności inżynierskiej wielokrotnie stosował bardzo ciekawe rozwiązania wzmocnienia podłoża za pomocą różnego rodzaju kolumn.

Wzmocnienie podłoża poprzez kolumny (wykonane różnymi technikami), z materiałów o dużym kącie tarcia wewnętrznego, stanowi rodzaj zbrojenia gruntu i częściowej, wgłębnej wymiany oraz przyspiesza rozpraszanie ciśnienia wody w porach gruntu rodzimego. W konsekwencji, mamy do czynienia z podłożem o nowych, lepszych parametrach geotechnicznych, które znacznie się poprawiają w czasie (budowy i eksploatacji obiektu).

Odnosząc się do wielu doświadczeń **Jubilata** w tego rodzaju rozwiązaniach, przedstawiono poniżej przykładowe wyniki badań dla posadowienia obiektów terminalu kontenerowego w Elblągu.

2. Charakterystyka obiektu

W skład zrealizowanego terminalu kontenerowego Portu Morskiego w Elblągu wchodzi plac składowy, budynek socjalny i budynek magazynowy. Omawiany obszar znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie wiaduktu kolejowego i trasy kolejowej, magazynów hurtowych i portu jachtowego.

Powierzchnia terminalu przeznaczona jest do składowania i transportu ciężkich kontenerów. Na etapie realizacji nie wydzielono na jej powierzchni obszarów dróg i placów składowych o zróżnicowanym obciążeniu użytkowym. Zatem, cały obszar został zaprojektowany na jednakowe obciążenie użytkowe 50 kPa, takim samym obciążeniem objęto także użytkowe części budynków magazynowych, socjalnych i wiat obsługi technicznej.

3. Warunki geotechniczne

Na obszarze objętym wzmocnieniem gruntu występują złożone warunki geotechniczne, stwarzające duże trudności dla posadowienia projektowanych obiektów. Warunki geotechniczne w podłożu zostały przedstawione w dokumentacji geotechnicznej oraz uzupełnione dodatkowymi sondowaniami metodą CPT, badaniami dylatometrycznymi (DMT) oraz badaniami presjometrycznymi (PMT).

Bezpośrednio pod powierzchnią terenu, do głębokości 0,7-1,3 m zalegają nasypy niekontrolowane mineralno-organiczne. Poniżej występują namuły pylaste miękkoplastyczne $I_L = 0,86$, o miąższości 1,6-2,5 m. Pod namułami znajdują się piaski drobne (z przewarstwieniami namułów) w stanie średnio zagęszczonym, $I_D = 0,43$, o miąższości 3,0-3,9 m. Ten generalny pakiet piaszczysty podścielony jest warstwą torfu/namułu o miąższości od 0,4-0,9 m. Poniżej występują grunty o średniej i dobrej nośności, odpowiednio: piasek drobny średnio zagęszczony o $I_D = 0,43$ i miąższości 1,8-3,7 m oraz poniżej piasek drobny zagęszczony o $I_D = 0,70$.

Woda gruntowa występuje na rzędnej około -0,65 m n.p.m. z wahaniami rzędu $\pm 0,5$ m. W trakcie wykonywania robót teren przeznaczony pod place składowe i objekty kubaturowe zniwelowano oraz wykonano platformę roboczą.

4. Dobór metody wzmocnienia gruntów

Oprócz uwarunkowań geotechnicznych w trakcie projektowania wzmocnienia gruntu konieczne okazało się uwzględnienie potencjalnego wpływu robót wzmocnieniowych na istniejące konstrukcje sąsiadujące z obszarem przewidywanych prac.

Od strony północno-wschodniej teren placów składowych graniczył bezpośrednio z czynnym mostem kolejowym, natomiast od strony północnej ograniczony był nowo wykonanym nabrzeżem płytowym posadowionym na palach CFA i ścianie szczelnej. Bliskie sąsiedztwo obiektów i istniejącego mostu spowodowało konieczność szczegółowego dostosowania technologii wzmocnienia podłoża do istniejących warunków.

Uwzględniając powyższe ograniczenia, w ramach robót wykonano następujące rodzaje wzmocnienia (projekt wzmocnienia opracowany został przez Freyssinet Polska):

1. Jako podstawową metodę wzmocnienia podłoża gruntowego zaproponowano metodę Wymiany Dynamicznej DR (Dynamic Replacement), polegającą na uformowaniu w gruncie wielkośrednicowych kolumn z kruszywa o bardzo dobrych parametrach nośnych i

drenujących, w postaci krępych słupów (kolumn) wymiany dynamicznej ze żwiru lub pospółki o średnicy od 2,0 m na dole do 2,2 m w głowicy, na rzędnej + 0.9 m n.p.m., długości 3 do 4 m z oparciem podstawy w średnio zagęszczonych piaskach drobnych, rozmieszczonych w rozstawie co 5,0 m w układzie trójkątnym. Po wykonaniu kolumn wykonano powierzchniowe dogęszczenie ubijakiem o powierzchni 1,7 m x 1,7 m.

2. W bezpośrednim sąsiedztwie istniejących obiektów: obiektu mostowego, pali fundamentowych nabrzeża wyznaczono pas bezpieczeństwa o szerokości:

- około 10 m wzdłuż wykonanych fundamentów palowych,
- około 15 m wzdłuż istniejącego obiektu mostowego.

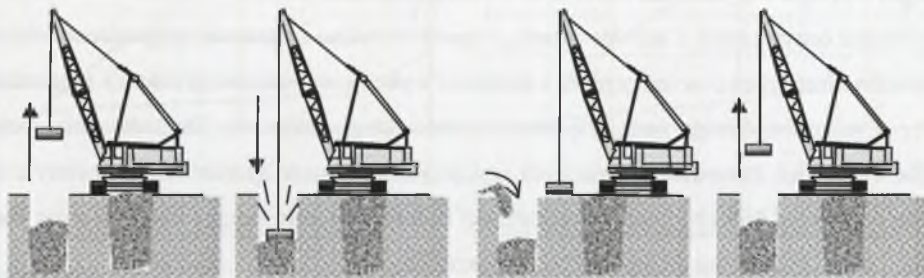
Na obszarze tym wykonano mniej inwazyjne wzmocnienie, kolumnami wykonanymi metodą wibrowymiany, kolumny z tłuczni kamiennego o średnicy 80 cm i długości 3 - 4 m rozmieszczone w siatce 2,5 x 2,5 m.

3. Pod każdą ze stóp fundamentowych hali magazynowej wykonano podpory w postaci 4 kolumn ϕ 80 cm długości około 8 m, wykonanych z tłuczni kamiennego w technologii wibrowymiany.

W gruncie o dużej zawartości drobnych cząstek, glinach i iłach, a także w gruntach organicznych skuteczną metodą wzmocnienia podłoża gruntowego jest metoda Wymiany Dynamicznej. Zabieg ten pozwala zwiększyć wytrzymałość zarówno bardzo wilgotnych gruntów spolistych i słabych gruntów organicznych, a także wszelkich gruntów nasypowych, w tym nasypów niebudowlanych.

Dynamiczna Wymiana (DR) jest pochodną metody Dynamicznej Konsolidacji znanej na świecie jako „Metoda Menarda”. Technologia wymiany dynamicznej polega na wykonaniu we wzmacnianym gruncie wielkośrednicowych kolumn z materiału okrucowego. Kolumny (wymiany dynamicznej) formowane są poprzez ubijanie ciężarem od 120 kN do 300 kN, opuszczanym z wysokości 10-30 m. Rozpoczęcie procesu ubijania następuje na powierzchni terenu lub w płytkim wykopie, wypełnianym kruszywem mineralnym. Kolejne uderzenia wprowadzają materiał gruntu niespoistego. Dalsze fazy dosypywania kruszywa do wykopu i ubijania są powtarzane do momentu formowania kolumny do żądanej rzędnej. Przeprowadzone badania w skali naturalnej wykazały wysoką efektywność tej metody wzmocniania gruntu. Każdą decyzję dotyczącą zastosowania wymiany dynamicznej jako systemu posadowienia pośredniego poprzedza określenie parametrów uformowanych kolumn oraz otaczającego ich gruntu naturalnego. Na podstawie doświadczeń z projektów zrealizowanych na ca-

łym świecie zostały określone procedury obliczeniowe, pozwalające indywidualnie dla każdego przypadku zaprojektować wzmocnienie podłoża. Jak już wspomniano powyżej, część prac została wykonana w dobrze znanej w Polsce technologii wibrowymiany.



Rys. 1. Schemat technologii wykonania Dynamicznej Wymiany (materiały Freyssinet Polska)
Fig. 1. Dynamic Replacement, scheme of execution (by Freyssinet Polska)

5. Badania kontrolne

Badania kontrolne potwierdzające słuszność poczynionych założeń projektowych wykonano w 2 etapach. Pierwszy etap – badania wstępne zrealizowane przed przystąpieniem do zasadniczej fazy robót, oraz drugi etap – badania powykonawcze.

Badania wstępne wykonano na specjalnie przygotowanych poletkach próbnych. W omawianym wypadku wykonano dwa poletka próbne na obszarze, na którym zostało wcześniej wykonane sondowanie CPTU. Na każdym poletku wykonano po dwa testy presjometryczne: jeden przed wykonaniem kolumny, drugi w jej rdzeniu, po wykonaniu wzmocnienia.

Badania te miały na celu określenie ilości materiału i liczby uderzeń potrzebnych do uformowania kolumny do wymaganej głębokości – czyli głębokości zalegania gruntów nośnych przy założonym rozstawie kolumn i dobranym ciężarze bijaka.

W referacie przedstawiono 4 różne badania wzmocnionego podłoża:

1. pojedynczej kolumny $\phi=220$ cm,
2. kompleksowe obciążenie 4 kolumn ($4 \times \phi=80$ cm) przygotowanych pod stopę fundamentową hali magazynowej,
3. pojedynczej kolumny $\phi=80$ cm,
4. obciążenie gruntu pomiędzy kolumnami.

We wszystkich przypadkach, poza obciążeniem kolumny $\phi=80$ cm, do przekazywania obciążeń wykorzystano sztywną płytę żelbetową o wymiarach 1.8 m x 1.8 m. Kolumna $\phi=80$ cm obciążana była za pomocą sztywnej uźbrowanej płyty stalowej o średnicy 80 cm.

Stanowiska badawcze wykonano jako balastowe. Do obciążenia wykorzystano dźwig o ciężarze 650 kN, ustawiony centralnie nad płytą żelbetową, na płycie umieszczono cokół stalowy o średnicy 80 cm, będący podstawą pod siłownik. Płytę żelbetową ułożono we wcześniej wykonanym wykopie o wymiarach około 2 m x 2 m, głębokości 30 cm.

Dno wykopu oczyszczono z luźnego gruntu, wypoziomowano i starannie zagęszczono lekkim wibratorem. Przestrzeń pomiędzy płytą a ścianami wykopu wypełniono gruntem i zagęszczono. Przed najazdem dźwigu nad płytę zamontowano ramę pomiarową. Do zadawania obciążeń dla wszystkich stanowisk badawczych wykorzystano zestaw hydrauliczny, złożony z siłownika o nośności 600 kN. Do płyty żelbetowej (lub cokołu stalowego) z czterech stron podłączono czujniki zegarowe do pomiaru przemieszczeń.

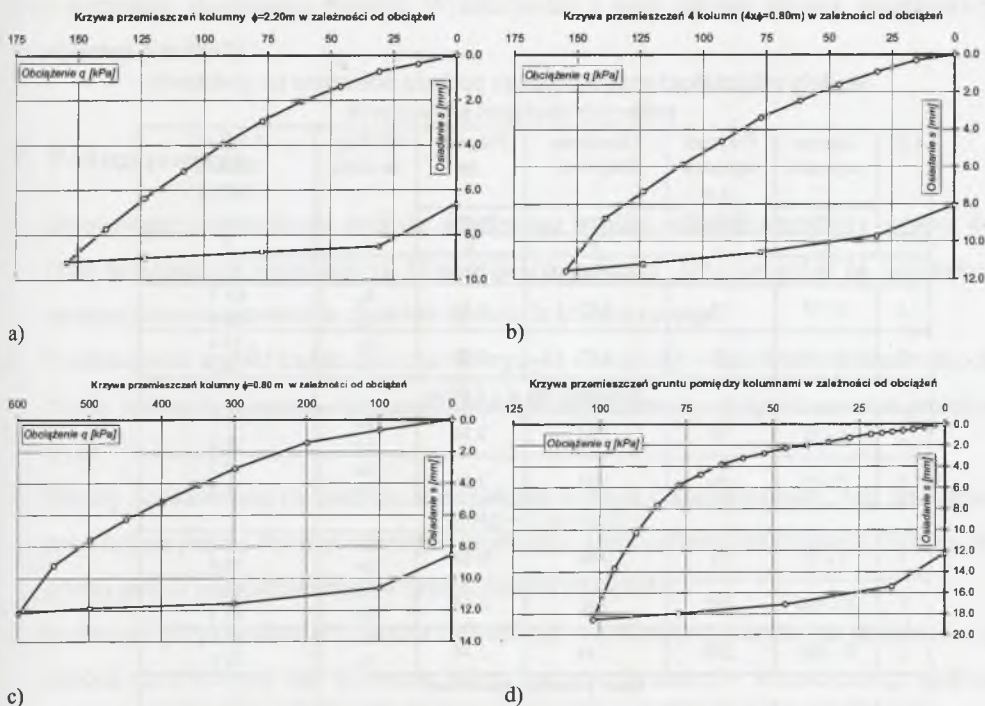
Wartość siły działającej na badane kolumny zwiększano stopniami ~ 50 kN, a w przypadku obciążenia gruntu stopniami po ~ 25 kN. Każdy stopień utrzymywano do czasu uzyskania umownej stabilizacji osiadania, tzn. gdy w ciągu 10 minut osiadanie nie przyrośnie więcej niż 0.05 mm w przypadku kolumn oraz 0.10 mm dla obciążenia gruntu. Pomiarów osiadań dokonywano przy każdym stopniu obciążenia w odstępach co 10 lub 20 minut. Po osiągnięciu obciążenia, przy którym nie wystąpiła stabilizacja osiadań, przystąpiono do stopniowego odciążenia. Po ustabilizowaniu się osiadań i końcowym odciążeniu pała pomierzono osiadania trwałe.

6. Charakterystyka i analiza wyników badań

Zakres obciążeń dla poszczególnych stanowisk badawczych (odpowiednio 1, 2, 3, 4 – patrz p. 5.) odniesiono do rzeczywistych obciążeń przewidywanych w trakcie eksploatacji obiektu. Przewidziano następujące zakresy obciążeń:

- docelowe obciążenie placów składowych kontenerami wyniesie 50 kPa,
- miąższość nasypów łącznie z nawierzchnią osiągnie wartość 1.1 m,
- naprężenie pionowe pod placami terminalu, w odniesieniu do roboczej rzędnej nasypu, wyniesie 74.2 kPa,
- naprężenia pionowe (średnie) w poziomie posadowienia fundamentów stopowych wynoszą około 80 kPa.

Wyniki badań w postaci zależności obciążenie-osiadanie, q [kPa] - s [mm] przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wyniki próbnych obciążeń: a) kolumna $\phi=2.20\text{ m}$, b) 4 kolumny ($4 \times \phi=0.80\text{ m}$), c) kolumna $\phi=0.8\text{ m}$, d) grunt pomiędzy kolumnami

Fig. 2. Static load test results, a) column $\phi=2.20\text{ m}$, b) 4 columns ($4 \times \phi=0.80\text{ m}$), c) column $\phi=0.8\text{ m}$, d) soil between columns

Uwzględniając zakres obciążeń dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych, w tabelicy 1 przedstawiono obliczone (na podstawie pomierzonych wartości osiadań) moduły podatności E_s , pierwotne moduły odkształcenia ogólnego E_0 oraz edometryczne moduły ścisłości M_0 . W obliczeniach wykorzystano klasyczne zależności w ramach rozwiązań teorii sprężystości. Przedstawione zależności odnoszą się do pojedynczych elementów, kolumn różnej średnicy, kompleksu 4 kolumn $\phi 80\text{ cm}$ oraz podłoża po wzmocnieniu pomiędzy kolumnami $\phi 220\text{ cm}$.

W pracach wzmocnieniowych tego typu dużą rolę odgrywa późniejsze obciążenie (przeciążenie) oraz czas. W rozważanym przypadku próbne obciążenie na kolumnie $\phi 220\text{ cm}$ i podłoża pomiędzy kolumnami wykonano w okresie około miesiąca od momentu wykonania robót wzmocnieniowych. W przypadku 4 kolumn $\phi 80\text{ cm}$ i pojedynczej kolumny $\phi 80\text{ cm}$ czas ten wyniósł około 2 miesięcy.

Tablica I

Moduły odkształceń wzmocnionego podłoża obliczone na podstawie próbnych obciążeń statycznych

Lp.	Zakres naprężeń	Przyrost naprężeń $\Delta\sigma$	Osiadanie końcowe	Przyrost Δs	Rodzaj modułu	Wielkość modułu [MPa]
	[kPa]	[kPa]	[mm]	[mm]		
1	2	3	4	5	6	7
Kolumna $\phi=2.20$ m						
1	0 - 75	75	2.82	2.82	E_s E_o	41.1 37.4
2	25 - 75	50	2.82	2.30	E_s E_o	27.4 24.9
Kolumny 4x $\phi=0.80$ m						
1	0 - 75	70	3.74	3.74	E_s E_o	31.0 28.2
2	25 - 75	50	3.74	2.96	E_s E_o	20.7 18.8
Kolumna $\phi=0.80$ m						
1	0 - 75	75	0.46	0.46	E_s E_o	103.0 93.8
2	0 - 100	100	0.66	0.66	E_s E_o	95.7 87.1
3	0 - 200	200	1.44	1.44	E_s E_o	87.8 79.9
Grunt pomiędzy kolumnami						
1	0 - 75	75	5.50	5.50	E_s E_o	21.1 19.2
2	25 - 75	50	5.50	4.38	E_s E_o	14.0 12.8

Należy zauważyć, że już na tym etapie prac wszystkie obciążenia wykazały nieduże osiadania dla zakresu obciążeń projektowych. Na podstawie wyników badań oraz opracowanych zależności obciążenie – osiadanie obliczono moduły odkształcenia, które mogą być wykorzystane do miarodajnej oceny osiadań i odkształceń placów składowych oraz realizowanych obiektów.

Dalsze prace budowlane, w tym wykonanie nasypu ponad istniejący poziom roboczy, przyczyniają się w tego rodzaju wzmocnieniu do konsolidacji podłoża, dalszego rozpraszania i wyrównania ciśnienia wody w porach gruntu oraz ogólnej stabilizacji wzmocnionego podłoża jako całości. Istota wzmocnienia poprawia parametry geotechniczne w czasie i związana jest ze wzrostem nośności podłoża oraz wartości modułów odkształcenia.

W pracach tego rodzaju ważna jest bieżąca kontrola parametrów wymiany dynamicznej, stanu zagęszczenia kolumn wielkośrednicowych, wzrostu parametrów w podłożu rodzimym oraz kontrolne pomiary rzeczywistych osiadań, ocena zmiany parametrów geotechnicznych w okresach krótkotrwałych tuż po wykonaniu wzmocnienia oraz dalszej perspektywie czasowej

przy normalnej eksploatacji obiektu. Wyniki badań z tego zakresu zostaną przedstawione w następnej publikacji.

7. Podsumowanie

1. Zastosowanie wzmocnienia podłoża gruntowego o dużej odkształcalności za pomocą kolumn wykonanych w technologii Wymiany Dynamicznej (DR) pozwoliło na racjonalne i ekonomiczne posadowienie obiektów terminalu kontenerowego.
2. Przedstawione wyniki badań oraz charakterystyki obciążenie – osiadanie uzyskane na podstawie próbnych obciążeń statycznych potwierdzają trafność przyjętych założeń projektowych.
3. Obiekty posadowione na podłożu słabonośnym o dużej odkształcalności, gdy obciążenie przykładane jest na dużej powierzchni, wymagają wzmocnienia odniesionego do całej objętości gruntu zaangażowanego w przyjmowaniu obciążeń.
4. Omówiona przykładowo w referacie technologia wzmocnienia pozwala na projektowanie metodą obserwacyjną oraz zapewnia dalszą poprawę parametrów wzmocnianego podłoża w przyszłości.

Literatura

1. Projekt Budowlany Wykonawczy, Uniwersalny Terminal Kontenerowy przy ulicy Radomskiej w Elblągu. BPBM Projmors, Gdańsk, październik 2002.
2. Projekt Wykonawczy, Wzmocnienia podłoża gruntowego – Wzmocnienie podłoża metodą Dynamicznej Wymiany i metodą kolumn tłuczniowych. Freyssinet Polska, listopad 2004.
3. Gwizdała K.: Opinia geotechniczna dotycząca wzmocnienia podłoża gruntowego na terenie rozbudowywanego Portu Morskiego w Elblągu. Gdańsk, listopad 2004.
4. Berger A., Saloni J., Gwizdała K.: Zasady wykonania poletek próbnych, kontroli bieżącej i badań odbiorczych – Załącznik do projektu wykonawczego, styczeń 2005.
5. Dembicki E., Odrobiński W., Zadroga B.: Próbné obciążenie gruntu dna morskiego w Porcie Północnym w Gdańsku. Archiwum Hydrotechniki, T. XXV, Gdańsk 1978.

6. Zadroga B.: Ustalenie miarodajnych modułów odkształcenia gruntu na podstawie badań wzajemnego oddziaływania budowli i podłoża gruntowego. Archiwum Hydrotechniki, T. XXIX, Gdańsk 1982.
7. Gwizdała K., Blockus M.: Opinia geotechniczna dotycząca oceny wzmocnienia podłoża gruntowego metodą Dynamicznej Wymiany oraz metodą Kolumn Tłuczniowych. Gdańsk, maj 2005.
8. Krajowe Doświadczenia Wzmacniania Podłoża – Gdańsk '92, KILiW PAN, Katedra Geotechniki Politechniki Gdańskiej, Oddział Gdański PKG, Gdańsk, 25-26 września 1992.
9. PN-83/B-0242, Fundamenty budowlane, Nośność pali i fundamentów pałowych.
10. PN/B-04452:2002, Geotechnika, Badania polowe.

Recenzent: Dr hab. inż. Jacek Pieczyrak, prof. w Pol. Śląskiej