

Bohdan ZADROGA

Katedra Geotechniki i Geologii Stosowanej
Politechnika Gdańska

WSPÓŁPRACA NAUKOWA KATEDR GEOTECHNIKI POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ I POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ Z ZAKRESU TERENOWYCH I LABORATORYJNYCH BADAŃ GRUNTÓW

Streszczenie. Scharakteryzowano zakres i metodykę terenowych i laboratoryjnych badań parametrów geotechnicznych gruntów niespoistych. Przedstawiono zależności empiryczne między tymi parametrami oraz możliwości ich wykorzystania przy obliczaniu nośności fundamentów bezpośrednich i na palach.

COOPERATION BETWEEN GEOTECHNICAL DEPARTMENTS OF SILESIAN AND GDAŃSK UNIVERSITIES OF TECHNOLOGY IN THE FIELD OF IN SITU AND LABORATORY TESTING

Summary. In the paper scope and methodology of in situ and laboratory common tests concerning geotechnical parameters of non-cohesive soils are described. Empirical relations between the parameters and its application for the calculations of bearing capacity of shallow and pile foundations are presented.

*Panu Profesorowi Maciejowi Gryczmańskiemu,
dzisiejszemu Jubilatowi oraz mojemu serdecznemu i wieloletniemu przyjacielowi,
zgodnie z sentencją łacińską: **Verba volant, scripta manent** – słowa ulatują, pismo pozostaje
niniejszy tekst pisany dotyczący naszej współpracy naukowej dedykuję*

1. Wstęp

Kompleksowa analiza stateczności fundamentów bezpośrednich i na palach wymaga połączenia w jednym procesie obliczeniowym analizy nośności oraz analizy odkształceń, przy jednoczesnym uwzględnieniu geometrycznej zmienności danego zagadnienia, zmian warun-

ków brzegowych w trakcie budowy, a także skomplikowanej interakcji elementów konstrukcyjnych obiektu z podłożem gruntowym.

Rozwijające się burzliwie w ostatnich latach analityczne, a szczególnie numeryczne metody obliczeń stateczności wymienionych fundamentów wymagają wiarygodnego określenia wielu parametrów geotechnicznych, niezbędnych do obliczeń nośności oraz osiadania fundamentów. Rodzaj i liczba tych parametrów zależą od przyjętych w obliczeniach kryteriów wytrzymałości gruntów na ścinanie.

W ostatnich 10 latach, w ramach współpracy naukowej pomiędzy Katedrą Geotechniki Politechniki Śląskiej, kierowanej przez dzisiejszego Jubilata, i Katedrą Geotechniki Politechniki Gdańskiej, zrealizowano wspólne badania terenowe i laboratoryjne, których celem było określenie wiarygodnych parametrów geotechnicznych gruntów niespoistych. Badania te wykonano w trakcie wspólnej realizacji dwóch Projektów Badawczych (Grantów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego) kierowanych przez autora niniejszego artykułu.

2. Terenowe badania gruntów

Badania terenowe wykonano za pomocą sond dynamicznych: średniej *SD-30* i ciężkiej *SD-50* skonstruowanych w Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej i spełniających techniczno-konstrukcyjne standardy międzynarodowe. Celem badań terenowych było przeanalizowanie trzech zagadnień praktycznych, obejmujących:

- A. Wycechowanie dwóch sond dynamicznych (średniej i ciężkiej) z uwzględnieniem: wpływu tarcia gruntu o żerdzie, rodzaju składu granulometrycznego gruntu, naprężeń pierwotnych w podłożu gruntowym, poziomu zwierciadła wody gruntowej i wykorzystania energii spadu młota. Określenie korelacji wyników sondowań sondą średnią i ciężką między sobą oraz z wynikami sondowań sondą dynamiczną lekką, bardzo ciężką i z sondą statyczną wciskaną.
- B. Opracowanie metodyki określania czterech wybranych parametrów geotechnicznych (I_D , ρ , ϕ , M_0) w zależności od liczby uderzeń młota (N_{10}).
- C. Opracowanie metodyki określania jednostkowego obliczeniowego oporu podłoża (q_f) pod fundamentem bezpośrednim oraz obliczeniowego oporu pod podstawą (q_r) i wzdłuż poboczniczy (r') pala w zależności od liczby uderzeń młota (N_{10}).

2.1. Zakres sondowań dynamicznych

W celu wycechowania obu sond dynamicznych i jak najszerszego porównania wyników badania terenowe przeprowadzono w gruntach niespoistych o różnym uziarnieniu i o różnym stopniu zagęszczenia, w miejscach w których wcześniej rozpoznano podłoże gruntowe za pomocą wierceń oraz sondowań dynamicznych sondą lekką *SD-10*, bardzo ciężką typu *Borros* lub sondą statyczną – wciskaną *SW*. Badania przeprowadzono w rejonie:

- Polski północnej (Gdańsk i okolice),
- Polski środkowej (Janki koło Warszawy),
- Polski południowej (Gliwice - Sośnica).

Charakterystykę morfologiczną wymienionych rejonów sondowań dynamicznych i budowy podłoża gruntowego przedstawiono poniżej.

Gdańsk i okolice – teren badań stanowi fragment Tarasu Plejstocenijskiego w strefie kontaktu z Niziną Nadmorską, doliną Martwej Wisły i Żuławami Wiślanymi. W podłożu występują utwory czwartorzędowe akumulacji wodno-lodowcowej i morskiej. Są to głównie piaski drobne i średnie w stanie średniozagęszczonym i zagęszczonym. Lokalnie występują przewarstwienia piasków gliniastych namulów i torfów.

Janki koło Warszawy – teren badań stanowi część Niziny Warszawskiej. W podłożu występują głównie plejstocenijskie piaski drobne i średnie stadiału mazowiecko-podlaskiego w stanie zagęszczonym i średniozagęszczonym. Lokalnie występują przewarstwienia glin żwółowych.

Gliwice - Sośnica – teren badań stanowi fragment doliny rzeki Kłodnicy. W podłożu gruntowym zalegają utwory czwartorzędowe akumulacji wodno-lodowcowej. Są to głównie średnio zagęszczone piaski drobne i średnie.

Łącznie, w wymienionych rejonach Polski wykonano 296 sondowań dynamicznych o przelocie 2837,8 m.

2.2. Metodyka określania parametrów geotechnicznych

Metodyka ta, dostosowana do potrzeb praktyki inżynierskiej, polega ogólnie na kolejnym określeniu:

- stopnia zagęszczenia (jako tzw. parametru wiodącego) w zależności od liczby uderzeń młota $I_D = f(N_{10})$,

- wybranych parametrów geotechnicznych w zależności od wartości parametru wodącego $[\rho, \phi, M_0] = f(I_D)$, z wykorzystaniem zależności zawartych w normie [2],
- wybranych parametrów geotechnicznych w zależności od liczby uderzeń młota $[\rho, \phi, M_0] = f(N_{10})$.

W wyniku wycechowania obu sond dynamicznych uzyskano następujące zależności $I_D = f(N_{10})$ oraz współczynniki korelacji R :

- sonda dynamiczna średnia *SD-30*

$$I_D = 0,368 \log(N_{10}) + 0,223 \quad R = 0,830 \quad (1)$$

- sonda dynamiczna ciężka *SD-50*

$$I_D = 0,347 \log(N_{10}) + 0,293 \quad R = 0,810 \quad (2)$$

które są najbardziej wiarygodne dla liczby uderzeń młota sondy N_{10} w zakresie od 2 do 50.

Wykorzystując przedstawioną metodykę określania parametrów geotechnicznych, uzyskano następujące zależności $[\rho, \phi, M_0] = f(N_{10})$ dla wilgotnych piasków grubych i średnich (P_r, P_s) oraz dla wilgotnych piasków drobnych i pylistych (P_d, P_π):

- sonda dynamiczna średnia *SD-30*

- sonda dynamiczna ciężka *SD-50*

gęstość objętościowa ρ [g/cm³]

$$(P_r, P_s) \quad \rho = 0,054 \log(N_{10}) + 1,810 \quad \rho = 0,051 \log(N_{10}) + 1,820 \quad (3)$$

$$(P_d, P_\pi) \quad \rho = 0,081 \log(N_{10}) + 1,706 \quad \rho = 0,076 \log(N_{10}) + 1,721 \quad (4)$$

kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]

$$(P_r, P_s) \quad \phi = 2,286 \log(N_{10}) + 31,276 \quad \phi = 2,155 \log(N_{10}) + 31,711 \quad (5)$$

$$(P_d, P_\pi) \quad \phi = 1,813 \log(N_{10}) + 29,047 \quad \phi = 1,710 \log(N_{10}) + 29,392 \quad (6)$$

edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej M_0 [kPa]

$$(P_r, P_s) \quad M_0 = 56100 \log(N_{10}) + 53878 \quad M_0 = 57394 \log(N_{10}) + 62014 \quad (7)$$

$$(P_d, P_\pi) \quad M_0 = 38854 \log(N_{10}) + 33798 \quad M_0 = 40238 \log(N_{10}) + 39159 \quad (8)$$

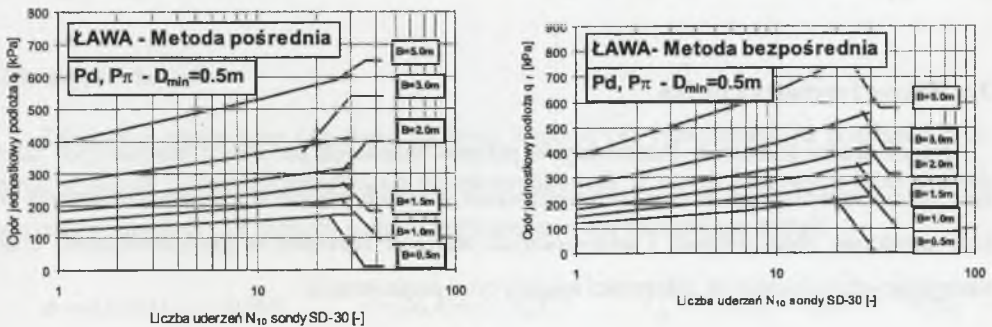
Obszerniejsze wyniki cechowania obu sond oraz określania parametrów geotechnicznych wraz z analizą zawarte są w pracy [1].

2.3. Ocena nośności fundamentów bezpośrednich i na palach

Na podstawie własnych zależności przedstawionych w punkcie 2.2 oraz wykorzystując normy [2, 3] opracowano liczne nomogramy, umożliwiające szybką inżynierską ocenę nośności fundamentów bezpośrednich i na palach, w zależności od liczby uderzeń młota N_{10} , dla sondy dynamicznej średniej $SD-30$ i ciężkiej $SD-50$.

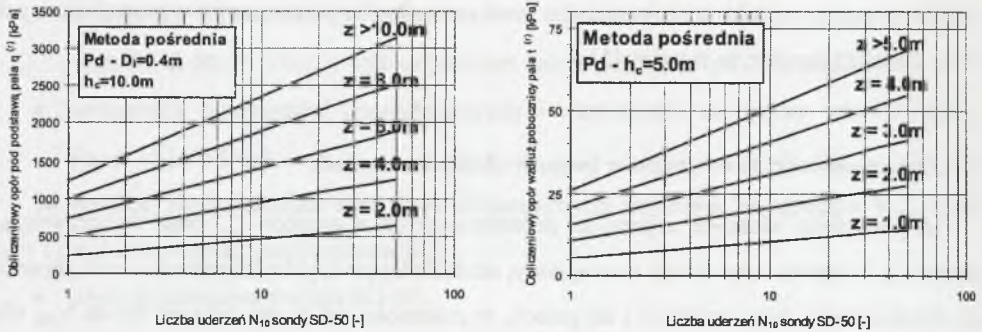
Ogólny tok postępowania jest następujący i może przebiegać dwojako:

- na podstawie liczby uderzeń młota N_{10} określa się stopień zagęszczenia I_D , wykorzystując zależności (1 i 2),
- dla fundamentów bezpośrednich, na podstawie znanego rodzaju i stopnia zagęszczenia I_D gruntu niespoistego lub na podstawie zależności (5, 6) określa się kąt tarcia wewnętrzznego, oblicza współczynniki nośności oraz jednostkowy obliczeniowy opór podłoża q_f według normy [2] lub na podstawie nomogramów $q_f = f(N_{10})$ przedstawionych przykładowo na rys. 1,
- dla fundamentów na palach, na podstawie znanego rodzaju i stopnia zagęszczenia I_D gruntu niespoistego, określa się z zależności $[q^{(r)}, t^{(r)}] = f(N_{10})$ przedstawionej w postaci nomogramów (rys. 2) jednostkową obliczeniową wytrzymałość gruntu pod podstawą $q^{(r)}$ i wzdłuż pobocznic pała $f^{(r)}$, a następnie oblicza nośność pała zgodnie z normą [3].



Rys. 1. Nomogramy zależności $q_f = f(N_{10})$ dla sondy dynamicznej średniej $SD-30$

Fig. 1. Nomograms of $q_f = f(N_{10})$ dependence for $SD-30$ medium dynamic penetrometer



Rys. 2. Nomogramy zależności $[q^{(r)}, t^{(r)}] = f(N_{10})$ dla sondy dynamicznej ciężkiej *SD-50*

Fig. 2. Nomograms of $[q^{(r)}, t^{(r)}] = f(N_{10})$ dependence for *SD-50* heavy dynamic penetrometer

Obszerniejsze zestawy nomogramów do obliczeń nośności fundamentów bezpośrednich i na palach (w tym dla pali nieujętych w normie [3]) zawarte są w pracy [1].

3. Laboratoryjne badania gruntów

W ostatnim dziesięcioleciu w Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej autor wraz z doktorantami wykonał wiele badań modelowych stateczności fundamentów bezpośrednich w złożonych układach obciążeń zewnętrznych (obciążenia statyczne lub cykliczne) oraz w złożonych warunkach gruntowych (podłoże poziome lub nachylone bez zbrojenia i zbrojone). Badania te wykonywano na piaskach średnich i grubych pochodzących ze złoża Rybaki koło Kościerzyny w województwie pomorskim. Obszar tego złoża stanowi niewielki wycinek płata sandrowego, zbudowanego głównie z utworów piaszczysto-żwirowych. Zalegające w złożu piaski są piaskami kwarcowymi, w których kwarc stanowi 95 % składu mineralicznego.

3.1. Zakres i metodologia badań

Piasek średni Rybaki 3, traktowany w przeprowadzonych badaniach modelowych jako *tzw. piasek standardowy*, przebadano niezależnie w trzech laboratoriach geotechnicznych w celu uzyskania obiektywnych i wiarygodnych wartości parametrów geotechnicznych oraz następujących wzajemnych zależności między tymi parametrami:

$$\phi = f(I_D) \qquad \phi = f(\rho) \qquad \rho = f(I_D) \qquad (9)$$

niezbędnych do analitycznych i numerycznych obliczeń nośności i osiadania fundamentów bezpośrednich posadowionych na zboczu z niespoistego gruntu naturalnego i zbrojonego.

Badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych (ϕ i c) oraz parametrów ściśliwości (M_0 , E_0 , ν) przeprowadzono dla różnych stopni zagęszczenia I_D w następujących aparatach:

A. Laboratorium Katedry Geotechniki Politechniki Śląskiej:

- aparat bezpośredniego ścinania produkcji Zakładów Doświadczalnych Uniwersytetu Jagiellońskiego; wymiary próbek 6,0 x 6,0 x 6,5 cm,
- aparat trójosiowego ściskania produkcji Geoteko Serwis; średnica próbek 3,7 cm, wysokość próbek 7,6 cm,
- edometr klasyczny; średnica próbek 6,5 cm, wysokość próbek 2,0 cm.

B. Laboratorium Zakładu Geomechaniki IBW PAN w Gdańsku:

- aparat trójosiowego ściskania firmy GDS Instruments Limited; średnica próbek 3,7 cm, wysokość próbek 8,0 cm,
- zmodyfikowany edometr typu Bishopa z możliwością pomiaru naprężeń bocznych; średnica próbek 7,55 cm, wysokość próbek 4,05 cm.

C. Laboratorium Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej:

- aparat trójosiowego ściskania firmy Wykaham Farrance; średnica próbek 5,0 cm, wysokość próbek 10,0 cm,
- edometr klasyczny; średnica próbek 6,5 cm, wysokość próbek 2,0 cm.

Badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych przeprowadzono dla 26, a parametrów ściśliwości dla 19 różnych stopni zagęszczenia piasku Rybaki 3.

3.2. Wyniki badań

Zależności empiryczne określone ogólnym wzorem (9), opracowane na podstawie łącznych wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych w trzech krajowych laboratoriach geotechnicznych dla 26 różnych stopni zagęszczenia, mają następującą postać:

$$\phi = 8,4134I_D + 30,999 \quad \phi = 26,458\rho - 8,577 \quad I_D = 3,305\rho - 4,9677 \quad (10)$$

Szczegółowe zależności empiryczne uzyskane z badań w poszczególnych laboratoriach zawarte są w pracy [4]. Na podstawie porównania całości wyników badań laboratoryjnych

kąta tarcia wewnętrznego ϕ gruntu Rybaki 3, a więc parametru geotechnicznego, mającego decydujący wpływ na nośność podłoża gruntowego, można stwierdzić, że różnica między wartościami skrajnymi i wartością średnią tego kąta wynosi $\pm 2 \div 3 \%$ w zależności od stopnia zagęszczenia gruntu I_D .

4. Podsumowanie

Scharakteryzowane dwa różne sposoby określania parametrów geotechnicznych (badania terenowe lub badania laboratoryjne) niezbędnych do sprawdzania, zgodnie z normami [2, 3], stanu granicznego nośności podłoża i stanu granicznego użytkowania budowli oraz przedstawione liczne zależności empiryczne między tymi parametrami stanowią swoisty *bank informacji* i mogą być pomocne przy wykonywaniu obliczeń stateczności fundamentów bezpośrednich i na palach. Dla przypadków złożonych oraz przy wykonywaniu bardziej zaawansowanych obliczeń numerycznych celowe jest wykonywanie badań parametrów geotechnicznych w laboratoriach naukowych na różnych aparatach oraz o rozszerzonym zakresie.

Literatura

1. Giżyński T., Zadroga B.: Zastosowanie sondowań dynamicznych do oceny nośności niespoistego podłoża gruntowego obciążonego fundamentem bezpośrednim lub na palach. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 2/2001.
2. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienia bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie. Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa. Warszawa 1981.
3. PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów na palach. Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa. Warszawa 1983.
4. Zadroga B., Malesiński K., Binder K.: Badania i analiza parametrów geotechnicznych gruntów niespoistych stosowanych w badaniach modelowych. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 2/2006.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Sękowski, Prof. w Pol. Śl.