

PRACE ORYGINALNE

ORIGINAL PAPERS

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 60, 2013: 107–116

(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 60, 2013)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 60, 2013: 107–116

(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 60, 2013)

Łukasz ZAWADZKI, Mariusz LECH, Kazimierz GARBULEWSKI

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Wpływ stanu nasycenia podłoża gruntowego wodą na wyniki sondowań geotechnicznych

Influence of ground saturation degree on penetration tests results

Słowa kluczowe: Eurokod 7, badania terenowe, CPTU, grunty nienasycone

Key words: Eurocode 7, field testing, CPTU, unsaturated soils

Wprowadzenie

W Eurokodzie 7 (PN-EN 1997, 1 i 2), jak również w związanych z nim normach ISO (ISO 22476-1 i ISO 22476-12) przedstawiono metodykę badań terenowych, jednakże bez szczegółowych zasad interpretacji wyników, zwłaszcza brak jest wyczerpujących reguł interpretacji wyników dotyczących uwzględnienia stanu nasycenia ośrodka gruntowego wodą. Tylko w przypadku sondowań dynamicznych do określenia stopnia zagęszczenia gruntów w podłożu (I_D) zalecono stosować wzory zależnie od tego, czy wynik sondowań uzyskano powyżej, czy poniżej zwierciadła wody gruntowej. W interpretacji wyników innych ro-

dzajów sondowań stan nasycenia ośrodka gruntowego wodą jest uwzględniany w formie niejawnej, np. przy określaniu naprężeń efektywnych lub wartości wzbudzonej nadwyżki ciśnienia wody w porach powstałej podczas wciskania sondy (Δu). Parametry te, określane jedynie dla warunków występujących w czasie sondowania, nie uwzględniają zmian wilgotności gruntów i ich stanu nasycenia wodą w strefie niepełnego nasycenia, czyli powyżej zwierciadła wody gruntowej.

Celem niniejszego artykułu jest wykazanie, że stan nasycenia gruntów wodą ma wpływ na wartości parametrów pomierzonych podczas badań terenowych sondą CPTU, a tym samym na wartości parametrów obliczeniowych przyjmowanych w projektowaniu geotechnicznym. W artykule przedstawiono model strefy aktywnej w podłożu gruntowym, który powinien być uwzględniony w in-

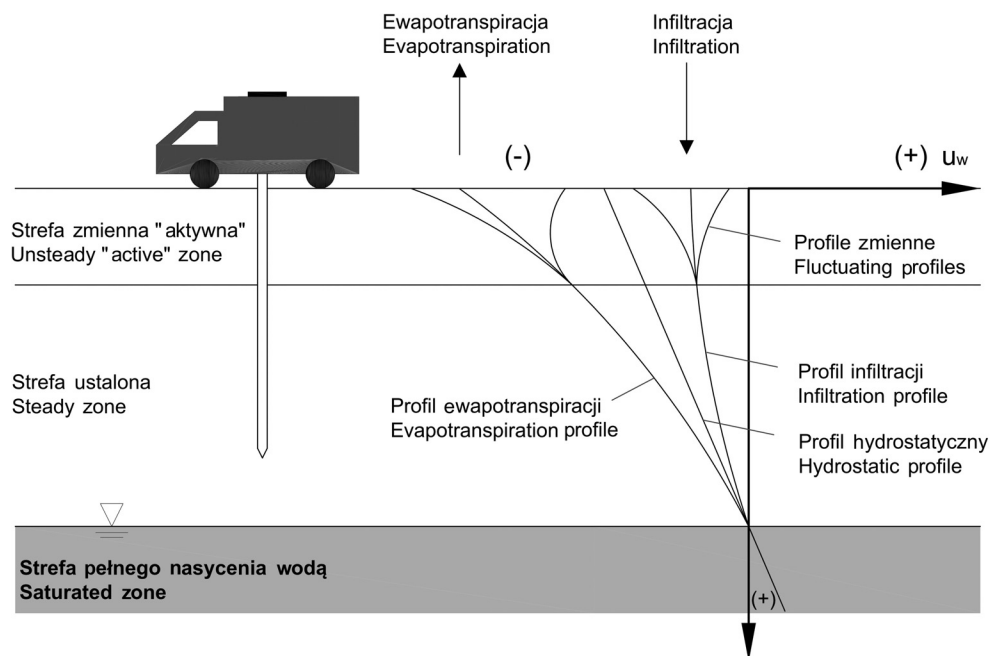
interpretacji wyników sondowań geotechnicznych. Ponadto podano analizę wpływu stanu nasycenia podłoża gruntowego wodą na wyniki sondowań, wykorzystując dane z literatury i badania własne.

Model strefy aktywnej w interpretacji wyników sondowań

W obrębie strefy aeracji wyróżnić można strefę aktywną oraz strefę ustaloną. Strefą aktywną podłoża gruntowego nazywa się tę strefę gruntów, w której na ich właściwości i zachowanie mają wpływ czynniki zewnętrzne, w tym zwłaszcza oddziaływanie ciśnienia atmosferycznego powietrza

(u_a) oraz infiltracji i ewapotranspiracji (rys. 1). Strefą ustaloną natomiast jest strefa, będąca poza bezpośrednim oddziaływaniem czynników zewnętrznych, w której można uznać, że czynniki te nie mają znaczącego wpływu na właściwości i zachowanie się gruntów w podłożu (rys. 1).

Grunty w strefie aktywnej kontaktują się z powierzchnią terenu i w ich profilu występują sezonowe zmiany uwilgotnienia gruntów. W strefie aeracji pory wypełnione są zarówno wodą, jak i powietrzem, a więc jest to ośrodek trójfazowy składający się z fazy stałej (szkielet gruntowy), ciekłej (najczęściej woda) i gazowej (powietrze). W przypadku głębokich podłoża strefa niepełnego nasycenia gruntów może występować głębiej,



RYSUNEK 1. Rozkład zmian ciśnienia ssania w gruntach nienasyconych pod wpływem czynników atmosferycznych

FIGURE 1. Suction profiles in unsaturated soils under fluctuating atmospheric condition

nawet pod strefą aktywną; ze względu na większą odległość od powierzchni terenu czynniki zewnętrzne (atmosfera) nie mają w tej części podłoża dużego wpływu, przez co stan uwilgotnienia ulega nieznacznym i powolnym zmianom w czasie. Schemat zmian ciśnienia ssania w gruntach nienasyconych pod wpływem czynników atmosferycznych przedstawiono na rysunku 1.

Grunty nie w pełni nasycone wodą występują w podłożach budowli na całym świecie; na ich właściwości inżynierskie ma wpływ wiele czynników, m.in. rodzaj gruntu, jego struktura, zagęszczenie, wielkości porów oraz w dużej mierze siły ssania powstające w wyniku napięcia powierzchniowego wody oraz adhezji, które zależne są od wilgotności gruntu (Russel 2010).

Jako że na właściwości gruntów znajdujących się w stanie niepełnego nasycenia wpływa wiele czynników, rozpoznanie ich charakterystyk wymaga dokładnej i czasochłonnej analizy, a typowe badania terenowe, których interpretacja w głównej mierze przystosowana jest do gruntów znajdujących się w stanie pełnego nasycenia, mogą prowadzić do błędnego rozpoznania właściwości inżynierskich gruntów zalegających w podłożu.

Rozkład naprężenia w gruntach nienasyconych należy analizować na podstawie rozkładu w profilu podłoża ciśnienia ssania, zależnego od wielu czynników, m.in. rodzaju gruntów w podłożu, pokrycia terenu, głębokości zalegania zwierciadła wody gruntowej, zmiennych warunków przepływu wody itp. (Lu i Likos 2004), i powinien być wykorzystywany w interpretacji sondowań geotechnicznych. Strefa aktywna rozpoczyna się od

powierzchni terenu, wobec czego rozkład ciśnienia ssania w profilu podłoża podlega wpływowi zmian sezonowych i nie jest stały w czasie. Przykład zmiany składowych naprężeń w podłożu nasyconym i nienasyconym przedstawiono na rysunku 2.

Według Terzagiego (1923) wartość naprężenia efektywnego w gruntach poniżej zwierciadła wody gruntowej, czyli znajdujących się w stanie pełnego nasycenia wodą stanowi różnicę między naprężeniem całkowitym (σ) i ciśnieniem wody w porach (u_w):

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

Do określenia naprężenia efektywnego w strefie niepełnego nasycenia podłoża Bishop (1959) zaproponował modyfikację zależności przedstawionej przez Terzagiego:

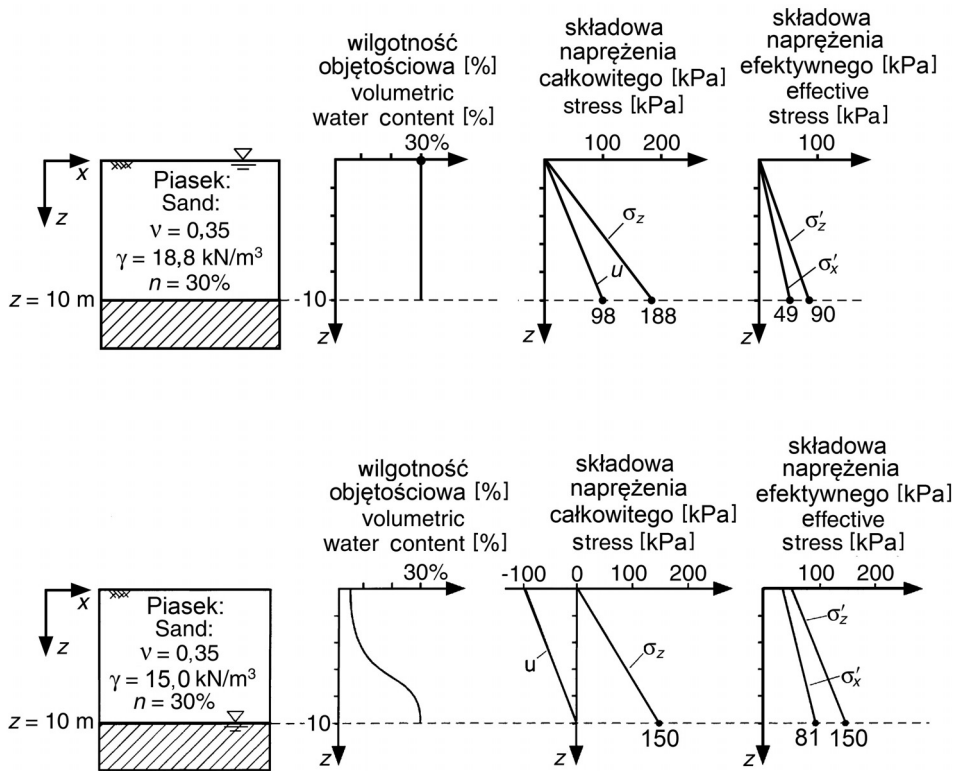
$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

gdzie:

χ – parametr naprężeń efektywnych zależny od stopnia nasycenia ośrodka gruntowego wodą, zawierający się w przedziale od 0 do 1,
 u_a , u_w – ciśnienie powietrza i wody w porach gruntowych.

Dla gruntów całkowicie suchych wartość $\chi = 0$, natomiast w sytuacji gdy pory gruntowe całkowicie wypełnione będą wodą $\chi = 1$.

Z analizy rozkładu naprężenia w strefie pełnego nasycenia porów gruntowych wodą widać, że gdy pory wypełnione są wodą, powstają siły ściskające, czego efektem jest zmniejszenie wartości składowych naprężeń efektywnego w podłożu. Natomiast w sytuacji gdy grunty nie są w pełni nasycone, występujące



RYSUNEK 2. Rozkład naprężenia w gruntach nasyconych i nienasyconych wodą: ν – współczynnik Poissona (Lu i Likos 2004)

FIGURE 2. Stress profiles in fully saturated and unsaturated soils: ν – Poisson's ratio (Lu and Likos 2004)

siły kapilarne powodują powstanie w podłożu negatywnego ciśnienia, co skutkuje powstaniem sił rozciągających i zwiększeniem wartości składowych naprężenia efektywnego. Efektem tego jest silniejsze przyleganie do siebie ziaren gruntów. W sytuacji gdy grunty są tylko częściowo wypełnione wodą, siły międzycząsteczkowe ulegają zwiększeniu w wyniku powstania na kontakcie powierzchni cząstek stałych i płynnych lub gazowych (powietrza) menisku, tworzącego pewnego rodzaju „most” między cząsteczkami, co powoduje powstanie sił dociskających

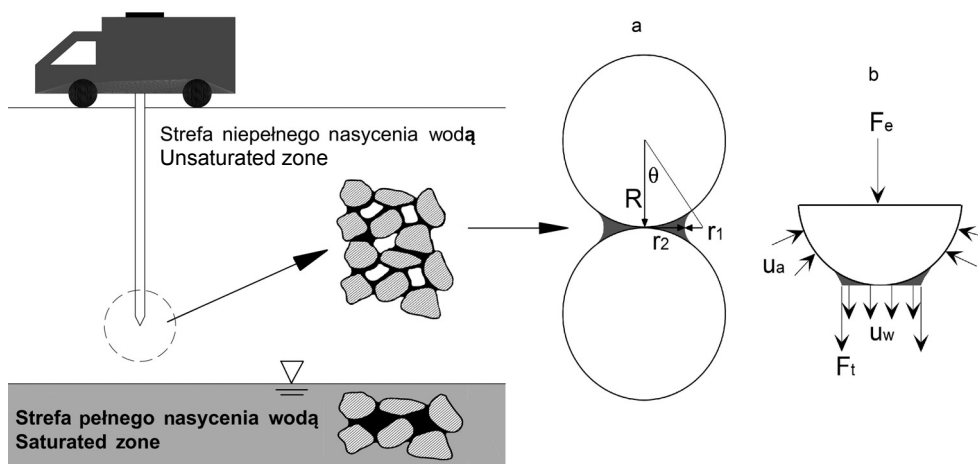
na powierzchni kontaktu dwóch cząstek (rys. 3).

Wartość sił kapilarnych powodujących dociskanie do siebie cząstek gruntu zależy od ciśnienia powietrza, ciśnienia wody w porach oraz napięcia powierzchniowego wody i może być wyrażona następującym wzorem (Lu i Likos 2004):

$$F_{\text{sum}} = u_a \pi R^2 - u_a \pi r_2^2 - T_s 2\pi r_2 + u_w \pi r_2^2 \quad (3)$$

gdzie:

F_{sum} – siły kapilarne powodujące dociskanie do siebie ziaren gruntu [N],



RYSUNEK 3. Dociskające działanie menisku wody w miejscu kontaktu dwóch cząstek: a – menisk łączący dwie kuliste cząsteczki, b – schemat sił międzycząsteczkowych (Lu i Likos 2004)
 FIGURE 3. Air-water-solid interaction for two spherical particles and water meniscus: a – meniscus connecting to solid particles, b – diagram of interparticle forces (Lu and Likos 2004)

R – promień ziarna [mm],
 r_2 – promień zgodnie z rysunkiem 3 [mm],
 T_s – napięcie powierzchniowe wody [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$].

Występowanie w szkielecie gruntowym dodatkowych naprężeń ściskających w przypadku niepełnego nasycenia porów gruntowych wodą wpływa na parametry sondowania: opór stożka (q_c) i opór tarcia na pobocznicy (f_s).

Wyniki sondowań z uwzględnieniem stanu nasycenia wodą ośrodka gruntowego w świetle literatury

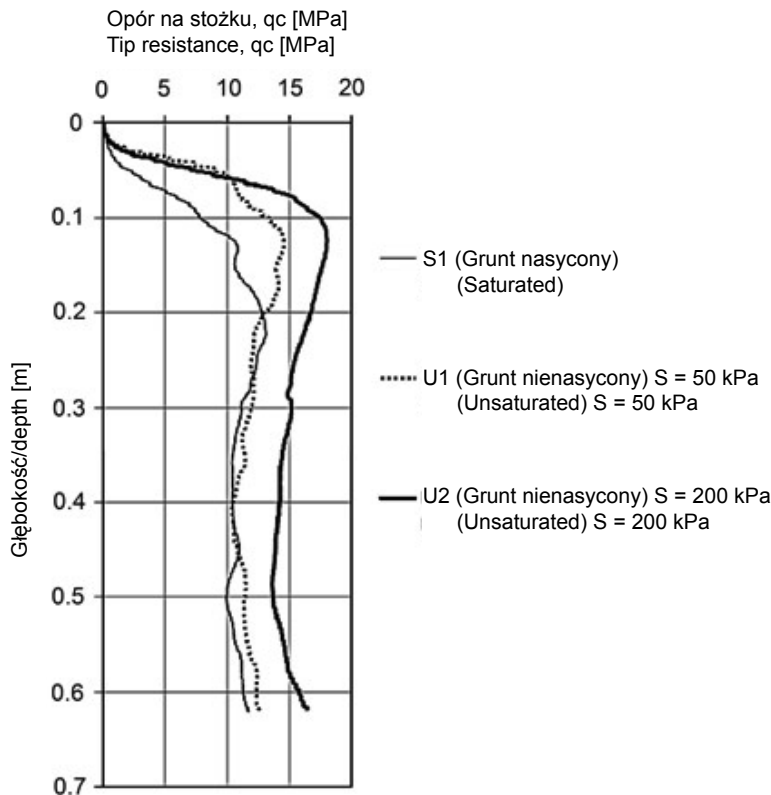
Lehane i inni (2004) przedstawili wyniki badań CPTU wykonane w piaskach w parku Shenton w zachodniej Australii. Sondowania wykonywane były w obszarze zadrzewionym oraz na terenie otwartym na koniec pory suchej i mo-

krej. Przeprowadzone badania wykazały, że w pobliżu drzew w sezonie suchym wartości oporu stożka oraz tarcia na pobocznicy uległy znaczącemu zwiększeniu w stosunku do wyników uzyskanych w porze mokrej. Wyniki badań wykonane na terenie otwartym nie wykazały większych zmian sezonowych. Wyniki sondowań przedstawiono na rysunku 4.

Pournaghiazar i inni (2010) przedstawili wyniki badań laboratoryjnych wykonanych w komorze kalibracyjnej w piaskach średnio zagęszczonych ($I_D = 61\%$). Komora kalibracyjna umożliwiała kontrolowanie pionowej oraz poziomej składowej naprężenia, a także zadawanie od góry ciśnienia powietrza i ciśnienia wody w porach poprzez porowate dyski umieszczone w dolnej części komory. Kontrolowanie ciśnienia powietrza oraz wody w porach umożliwiała zadanie odpowiedniej wartości podciśnień. Wszystkie próbki podczas badania zostały poddane naprężeniom izotropowym

o wartości 100 kPa. Badania wykonano w gruntach w pełni nasyconych wodą (S1) oraz przy wartościach ciśnienia ssania (podciśnienia) na poziomie $S = 50$ kPa (U1) i $S = 200$ kPa (U2). Pomiarów wykonywano za pomocą stożka firmy A.P. van den Berg o średnicy 16 mm, którego pole powierzchni wynosi 2 cm^2 , a pole tulei ciernej 30 cm^2 . Wyniki badania przedstawiono na rysunku 5. Jak można zauważyć, zwiększenie wartości ciśnienia ssania w istotny sposób wpłynęło na uzyskane podczas badania wartości oporu stożka, powodując wzrost wartości q_c średnio o 4 MPa.

Przedstawione powyżej wybrane wyniki badań w warunkach terenowych i laboratoryjnych wskazują jednoznacznie na istotne zmiany wartości oporu stożka zależnie od warunków, w jakich prowadzone są badania. Kluczową rolę odgrywa tu stan nasycenia ośrodka gruntowego, gdzie występowanie znacznych wartości ciśnienia ssącego powoduje zwiększenie wytrzymałości gruntu. Wobec tego uzasadniona jest hipoteza, że rozkład wilgotności w obrębie strefy aktywnej podłoża ulega zmianom sezonowym i nie jest stały w czasie, co powoduje, że wartości uzyskane podczas



RYSUNEK 5. Wyniki badań CPTU w piaskach nasyconych i nienasyconych wykonanych w komorze kalibracyjnej (Pournaghiazar i in. 2010)

FIGURE 5. CPTU test results for saturated and unsaturated sands obtained in calibration chamber (Pournaghiazar et al. 2010)

badan terenowych w tej strefie mogą znacząco od siebie różnić się, w zależności od okresu, w jakim wykonywane jest badanie. Nieuwzględnienie w interpretacji badań stanu nasycenia podłoża gruntowego wodą może prowadzić do błędnej oceny właściwości inżynierskich gruntów i warunków geotechnicznych w podłożu projektowanych konstrukcji.

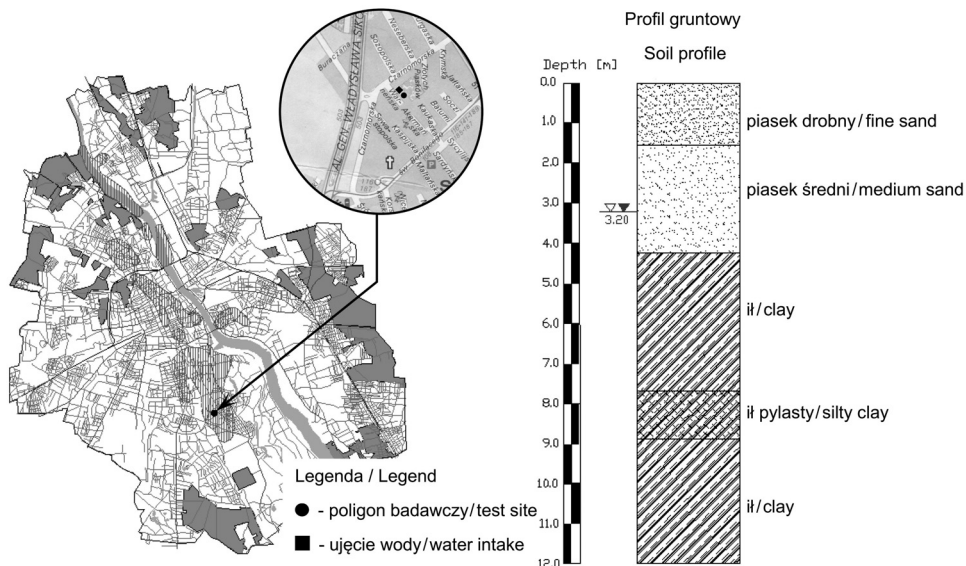
Wyniki badań CPTU wykonanych na poligonie badawczym Stegny

W podłożu poligonu Stegny do głębokości 3,0 m p.p.t. zalegają piaski drobne, poniżej – do głębokości 4,3 m p.p.t. występują piaski średnie, pod którymi znajdują się ropy szare o miąższości 12,5 m. Swobodne zwierciadło wody zalega na głębokości około 3,2 m p.p.t. (rys. 6).

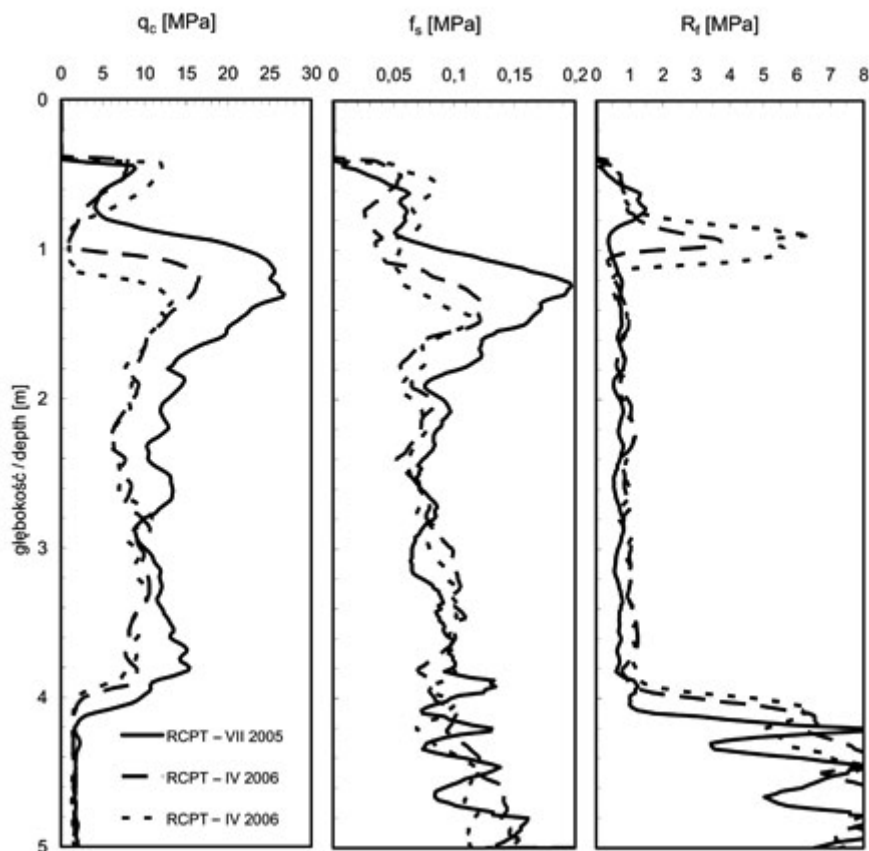
Na podstawie analizy wyników badań wykonanych w latach 2005–2006

w trzech profilach oddalonych od siebie średnio o 1,5 m, można stwierdzić znaczną zmienność parametrów uzyskiwanych podczas sondowań gruntów w strefie aktywnej, o zmiennej wilgotności gruntu. Wyniki sondowań wykonanych na poligonie badawczym Stegny w latach 2005–2006 przedstawiono na rysunku 7.

Różnice wartości parametrów uzyskanych w różnych okresach, w odmiennych warunkach wilgotnościowych, sięgają nawet 20,0 MPa w przypadku oporu stożka i ponad 100 kPa w przypadku tarcia na pobocznicach. Największe różnice zarejestrowano na głębokości 1,22 m, gdzie dla sondowania RCPT – IV 2006 uzyskane wartości wyniosły odpowiednio $q_c = 8,7$ MPa oraz $f_s = 66$ kPa, natomiast w badaniach wykonanych rok wcześniej (RCPT – VII 2005) dla tej samej głębokości uzyskano wartości $q_c = 25,4$ MPa oraz $f_s = 196$ kPa.



RYSUNEK 6. Lokalizacja i profil gruntowy poligonu badawczego Stegny
FIGURE 6. Location of the Stegny test site and borehole profile



RYSUNEK 7. Wyniki badań CPTU wykonanych na poligonie Stegny w latach 2005–2006
 FIGURE 7. The CPTU test results from Stegny site in years 2005 and 2006

W 2005 roku podczas badania zarejestrowano opór stożka o 192% większy niż w 2006 roku. Podobnie wartości tarcia na pobocznicy pomierzone w 2005 roku są większe o 197% w porównaniu z badaniem z 2006 roku. Jak można zauważyć, wartości współczynnika tarcia (R_f) nie ulegają znaczącym zmianom, co wskazuje na równomierne zmiany wartości oporu stożka i tarcia na tulei, świadcząc o tym, że zmiany warunków w gruncie w podobny sposób oddziałują na obie te wartości, powodując ich równomierny przyrost bądź spadek.

Podsumowanie i wnioski

Ingerencja człowieka w środowisko, w tym w wyniku działalności inżynierskiej (np. głębokie wykopy fundamentowe), jest coraz większa, co ma także wpływ na zmianę warunków wilgotności i stan nasycenia wodą podłoża gruntowego. Zabudowa coraz większej powierzchni terenu nieprzepuszczalnymi nawierzchniami, powodująca zwiększenie intensywności spływu powierzchniowego i zmniejszenie ilości wody infiltrującej w podłoże gruntowe,

jak również stosowanie różnego rodzaju odwodnień powoduje obniżenie poziomu zwierciadła wód gruntowych, a co za tym idzie – zwiększenie miąższości strefy aktywnej, w której grunty znajdują się w stanie niepełnego nasycenia. W związku z tym, konieczny jest rozwój metod terenowych, umożliwiających szybkie rozpoznanie właściwości inżynierskich podłoża w stanie niepełnego nasycenia gruntów wodą. Warto podkreślić, że fundamenty większości obiektów budowlanych projektowane są w strefie niepełnego nasycenia gruntów wodą (powyżej zwierciadła wody gruntowej).

Analiza przedstawionych w niniejszym artykule wyników wskazuje na znaczący wpływ powstających w strefie nienasyconej podłoża ciśnień ssących na wartości mierzone podczas sondowań, co może skutkować błędnym rozpoznanie parametrów geotechnicznych podłoża przyjmowanych w projektowaniu geotechnicznym. Dlatego celowe wydaje się wykonanie badań w różniących się wilgotnościowo warunkach i uwzględnienie wpływu ciśnienia ssącego w interpretacji sondowań geotechnicznych.

Na podstawie podanych w niniejszym artykule informacji i wyników badań można przedstawić następujące główne wnioski:

1. W interpretacji sondowań statycznych należy uwzględnić zmienny w czasie stan nasycenia wodą gruntów w podłożu projektowanych budowli.

2. Ocena warunków geotechnicznych projektowanych budowli powinna być wykonana na podstawie wyników sondowań wybranych z różnych okresów oddziaływania czynników atmosferycznych na stan nasycenia wodą podłoża gruntowego.

Literatura

- BISHOP A.W. 1959: The principle of effective stress. *Tek. Ukeblad.* 106, 39: 859–863.
- EN ISO 22476-1 2009: Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical CPT and CPTU.
- EN ISO 22476-2 2009: Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Dynamic probing.
- EN ISO 22476-11 2009: Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Flat dilatometer test.
- EN ISO 22476-12 2007: Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Mechanical cone penetration.
- LEHANE B.M., ISMAIL M.A., FAHEZ M. 2004: Seasonal dependence of in situ test parameters in sand above the water table. *Geotechnique* 54, 3: 215–218.
- LU N., LIKOS W.J. 2004: *Unsaturated Soils Mechanics*. John Wiley & Sons, Canada.
- LU N., LIKOS W.J. 2006: Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132, 2: 131–142.
- PN-81/B-03020: Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-B-04452 2002: Geotechnika badania polowe.
- PN-EN 1997-1 2008: Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2 2009: Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.
- POURNAGHIAZAR M., RUSSEL A.R., KHALILI N. 2010: CPT in unsaturated soils using a new calibration chamber. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- RUSSEL A.R., POURNAGHIAZAR M., KHALILI N. 2010: Interpreting CPT results in unsaturated sands. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- TERZAGHI K. 1923: Die Berchnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungsercheinungen. *Sitz. Akad. Wissen. Wien Math-naturw Kl. Abt. Ila* 132, 105–124.

Streszczenie

Wpływ stanu nasycenia podłoża gruntowego wodą na wyniki sondowań geotechnicznych. Analiza wyników dotychczasowych badań terenowych pozwala stwierdzić, że stan nasycenia ośrodka gruntowego w podłożu budowli wpływa na wyniki sondowań geotechnicznych, np. wykonywanych sondą CPTU. Sondowania wykonywane są w podłożu gruntowym, w którym można wyróżnić strefę aktywną, tzn. strefę oddziaływania na ośrodek porowaty czynników atmosferycznych, które powodują fluktuację stanu nasycenia ośrodka powyżej zwierciadła wody gruntowej i powodują zmianę wytrzymałości gruntu. W artykule przedstawiono model strefy aktywnej w podłożu gruntowym, który powinien być uwzględniony w interpretacji wyników sondowań geotechnicznych. Ponadto podano analizę wpływu stanu nasycenia podłoża gruntowego wodą na wyniki sondowań wykorzystując dane z literatury i badania własne.

Summary

Influence of ground saturation degree on penetration tests results. Considering previously published *in situ* test results e.g. CPTU it can be stated that saturation degree affects the penetration test results. In soil profile tested using CPTU the effective zone should be distinguished in the interpretation of test results. According to the CPTU test results conducted at the Stegny site the depth of the active zone is about 4 meters. Changes of the measured penetration parameters in active zone due to the influence of atmospheric factors should be taken into account in geotechnical parameters estimation.

Authors' address:

Łukasz Zawadzki, Mariusz Lech, Kazimierz Garbulewski
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: lukasz_zawadzki@sggw.pl