

ZNACZENIE BADAŃ *IN SITU* W PROJEKTOWANIU GEOTECHNICZNYM¹

Kazimierz Garbulewski, Mariusz Lech

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Artykuł zawiera opis metod badań *in situ*, które zgodnie z normą Eurokod 7 są wymagane w projektowaniu geotechnicznym do rozpoznawania warunków posadowienia obiektów budowlanych i określania parametrów podłoża gruntowego w celu sprawdzenia stanów granicznych. Podano kierunki rozwoju metod badań *in situ* z uwzględnieniem innowacyjnych zmian wprowadzonych do praktyki w ostatnich latach. Ponadto w artykule przedstawiono przegląd referatów zgłoszonych na konferencję ProGeotech 2013 „Projektowanie geotechniczne – badania i dobór parametrów” do sesji I „Badania polowe według EC 7”, z krytycznymi uwagami do dyskusji podczas sesji konferencyjnej.

Słowa kluczowe: badania *in situ*, projektowanie geotechniczne, Eurokod 7

PRZEGLĄD METOD BADAŃ

W ostatnich kilku dekadach obserwuje się ciągły rozwój i wzrost znaczenia badań *in situ*, w szczególności w przypadkach badań podłoża, z którego trudno pobrać próbki gruntów do badań laboratoryjnych o wymaganej klasie jakości I lub II [Robertson 2012]. Do tego typu zalicza się podłoża, w których stwierdzono występowanie gruntów bardzo słabych (np. organicznych lub wymieszanych drobnymi i grubymi materiałami koluwalnymi), jak również materiałów antropogenicznych, w tym odpadowych. Według Mayne i innych [2009] rozwój i znaczenie badań *in situ* wynika z niepodważalnych ich zalet, do których są zaliczane: większa wydajność i efektywność ekonomiczna w porównaniu z pobieraniem próbek i badaniami laboratoryjnymi, duża liczba danych oraz ocena zmienności zarówno pionowej, jak i poziomej. Ciągły zapis wyników badań *in situ* pozwala określić zmienność gruntów i ich właściwości na poziomie trudnym do uzyskania innymi metodami, także za pomocą badań laboratoryjnych. Należy jednakże podkreślić, że za-

¹Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy nr N N506218039.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Kazimierz Garbulewski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: kazimierz_garbulewski@sggw.pl

równo badania *in situ*, jak i badania laboratoryjne zawierają podobne ryzyko niewykrycia w podłożu ekstremalnych warunków geotechnicznych, na przykład niewielkiej miąższości warstw słabych gruntów, decydujących często o stateczności projektowanej budowli.

Wymagany w projektowaniu posadowień obiektów budowlanych zakres i ogólne wymagania metodyczne badań *in situ* zostały podane w normie PN-EN 1997-2, zależnie od kategorii geotechnicznej obiektu. Z definicji kategorii geotechnicznej wynika, że przy klasyfikowaniu projektowanych obiektów uwzględnia się ocenę ryzyka. W normie podano jednakże tylko zasady dotyczące powszechnie stosowanych w krajach europejskich badań, które wybrano, przyjmując następujące kryteria: znaczenie w geotechnicznej praktyce, możliwość wykonywania badań przez usługowe przedsiębiorstwa oraz akceptowane w krajach UE procedury badawcze.

Badania *in situ*, oprócz normy PN-EN 1997-2, były opisywane w licznych artykułach publikowanych w czasopismach i materiałach konferencyjnych w Polsce i zagranicą. Stan wiedzy o metodach badań, kierunkach ich rozwoju, zasadach interpretacji wyników z przykładami zastosowania praktycznego był w ostatnich latach przedstawiany między innymi przez Powella [2005], Młynarka [2007, 2011], Mayne i innych 2009 oraz Robertsona [2012]. Publikacjami wyjątkowej wagi, zawierającymi obszerną i wnikliwą charakterystykę badań *in situ* w Polsce na tle osiągnięć czołowych w świecie ośrodków naukowo-badawczych, są publikacje Młynarka, na przykład referat opublikowany w materiałach konferencji szkoleniowej w Wiśle [Młynarek 2013].

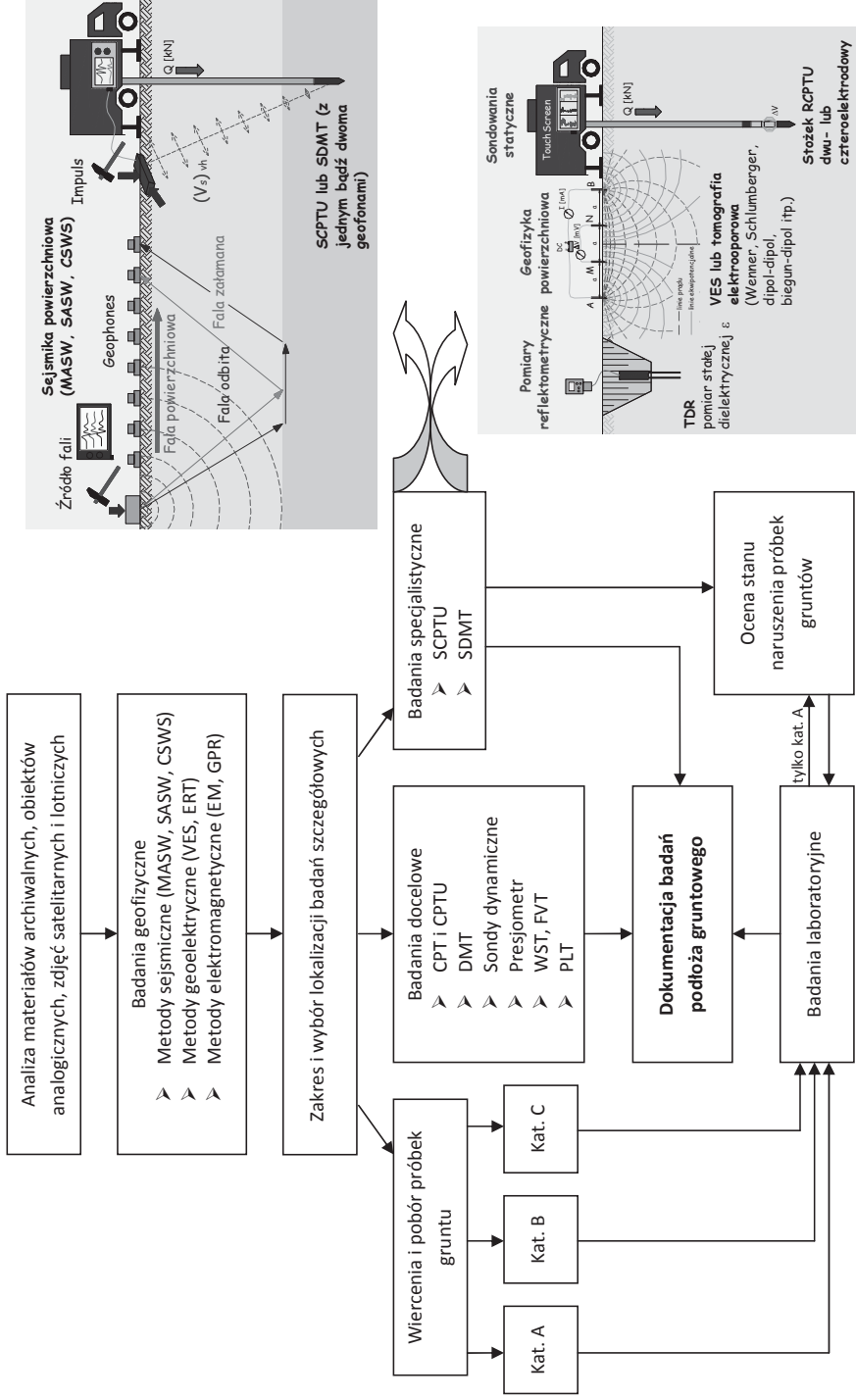
Zakres typowych badań podłoża w terenie obejmuje: wiercenia z pobieraniem z wytypowanych głębokości próbek gruntów o nienaruszonej strukturze za pomocą cienkościennych próbników (np. Shelby, NeSGI), badania – często w regularnych przedziałach głębokości (np. co 1,5 m) – sondą SPT z pobraniem próbek gruntów do badań makroskopowych i sondowania CPTU i DMT lub coraz częściej, zwłaszcza w przypadku obiektów budowlanych 3. kategorii geotechnicznej, wieloparametryczne sondowania SCPTU (np. sondą Icone Seismic Module) i SDMT (dylatometr sejsmiczny). Pomimo że sondowanie CPTU jest szybsze (prędkość wciskania sondy wynosi $20 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) i tańsze, obie metody sondowań są powszechnie zalecane i wykonywane równolegle, a wyniki badań uważane za porównywalne i równorzędne [Mayne i in. 2009, Robertson 2009, Rabarijoely i Garbulewski 2013]. Niewątpliwą jednakże zaletą, świadczącą o przewadze sondowań CPTU nad DMT, jest ciągły w profilu podłoża wynik pomiarów sondą CPTU (q_c, f_s, u), których interpretacja pozwala na uzyskanie informacji o zmienności w podłożu gruntów i ich właściwości. W zestawie badań SCPTU znajduje się rejestrator z możliwością zapisywania pomiarów z częstotliwością $50 \mu\text{s}$ lub większą w celu zapewnienia odpowiedniej dokładności w określaniu prędkości fal akustycznych w podłożu gruntowym. W sondowaniach DMT pomiary wykonywane są punktowo co 0,2 m głębokości. Biorąc pod uwagę warunki badań obiema sondami, można uznać za uzasadnioną opinię, że wyniki badań CPTU pozwalają uzyskać bardziej wiarygodne parametry wytrzymałościowe, a DMT – odkształceniowe, ze względu na mechanizm odkształceń podłoża.

Badania *in situ* są szczególnie trudne do przeprowadzenia i interpretacji wyników w przypadku występowania w podłożu gruntów słabych, na przykład organicznych lub mineralnych o wskaźniku konsystencji $I_c < 0,5$, albo gruntów bardzo sztywnych. W pierwszym przypadku z powodzeniem jest jeszcze stosowana sonda krzyżakowa (FVT), natomiast w drugim – presjometry (PMT). Do wyboru najbardziej efektywnej

metody badań *in situ* pomocne jest w pewnym stopniu podane w Eurokodzie 7 zestawienie stosowalności obecnie dostępnego sprzętu. Interpretując wyniki badań *in situ*, można uzyskać wartości parametrów geotechnicznych najczęściej wykorzystywanych w praktyce, do których należą między innymi: parametry stanu podłoża w warunkach *in situ* (np. wskaźnik prekonsolidacji OCR), parametry wytrzymałościowe, sztywność gruntu, ściśliwość i przepuszczalność hydrauliczna, czyli zestaw parametrów wyjściowych potrzebnych do sprawdzenia stanów granicznych projektowanych obiektów budowlanych. Badania i zasadnicze wymagania, które powinny być uwzględnione w trakcie ich prowadzenia w terenie przedstawione w normie PN-EN 1997-2 są na ogół powszechnie znane; mogą one stanowić pomoc jedynie dla inżynierów bez większego doświadczenia. Bardziej wartościowe dla praktyki są szczegółowe zalecenia zawarte w normie EN-ISO 22476 (części od 1 do 13), którą należy traktować jako nierozdzielną część Eurokodu 7. W normie PN-EN 1997-2, jak również w normach zharmonizowanych nie uwzględniono coraz powszechniej stosowanych w praktyce sond geotechnicznych wyposażonych w dodatkowe sensory pozwalające pomierzyć na przykład prędkość fali sejsmicznej lub przewodność elektryczną ośrodka gruntowego. Zastosowanie w badaniach terenowych sondowań SCPTU, SDMT lub sejsmiki powierzchniowej odgrywa coraz większą rolę, na przykład w ocenie jakości próbek i wynikającej z tego prawidłowej ocenie parametrów geotechnicznych podłoża budowli. Obecnie wykorzystywane do określenia parametrów gruntowych techniki badań laboratoryjnych, obejmujące między innymi pomiar prędkości propagacji fali poprzecznej i podłużnej, wymagają pobrania w terenie próbek gruntu o najwyższej jakości, która powinna być skontrolowana w laboratorium. Wyniki badań przeprowadzonych w ostatnim okresie wykazały, że porównanie prędkości fali sejsmicznej w terenie i w warunkach laboratoryjnych pozwala określić jakość próbek gruntów pobranych w terenie, w tym próbek gruntów słabych, na przykład miękkoplastycznych ilów [Tanaka 2002, Landon i in. 2007, Hight 2013], jak również gruntów cementowanych [Ferreira i in. 2011].

W coraz większym stopniu, zarówno do opracowania programu badań *in situ*, jak i interpretacji wyników sondowań i badań innymi metodami, wykorzystywane są również badania teledetekcyjne. Badania teledetekcyjne, w tym wykonywanie i interpretacja zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz lotniczy i naziemny skanowanie laserowe, umożliwiają zebranie danych do utworzenia cyfrowego modelu terenu (DMT). Model taki, opracowany lub kupiony i zweryfikowany, pozwala między innymi: poznać rzeźbę terenu, opracować trójwymiarowe modele obiektów (np. wałów przeciwpowodziowych w celu oceny zagrożenia powodziowego przyległych terenów), określić szatę roślinną i rozkład wilgotności w powierzchniowej warstwie podłoża. Procedury geomatyki wykorzystywane są do równoczesnej analizy wielu danych dotyczących stanu środowiska i obiektów przestrzennie odniesionych do powierzchni terenu lub ich interakcji.

Eurokod 7 dopuszcza stosowanie nowatorskich metod rozpoznawania podłoża gruntowego z zastrzeżeniem, że w takich przypadkach należy bezwzględnie przeprowadzić badania weryfikujące za pomocą innej powszechnie uznanej metody badawczej. Metody geofizyczne znajdują w ostatnich latach szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej, zarówno w badaniach geologiczno-inżynierskich, jak i w badaniach środowiskowych. Badania te można podzielić na cztery główne grupy: grawimetryczne, magnetometryczne, sejsmiczne i geoelektryczne. Metody geofizyczne polegają ogólnie na prześwietlaniu



Rys. 1. Diagram doboru badań do oceny warunków geotechnicznych posadowienia projektowanych obiektów budowlanych
 Fig. 1. Diagram for selection of tests required to geotechnical site characterization of design structures

profilu gruntowego i pomiarze parametrów fizycznych gruntów bez naruszania ich struktury. Metody te mogą być stosowane na różnych etapach prac terenowych – jako badania wstępne mające na celu orientacyjne rozpoznanie warunków gruntowych lub jako badania uzupełniające pozwalające na zagęszczenie punktów pomiarowych oraz w monitoringu. W badaniach środowiska gruntowo-wodnego wykorzystywane są głównie dwie metody badań: metoda elektrooporowa (profilowanie oraz tomografia elektrooporowa) i elektromagnetyczna (georadar). Pozostałe metody w zakresie monitoringu i rozpoznawania stanu środowiska są mniej użyteczne i ich zastosowanie w praktyce jest rzadsze. Badania sejsmiczne stosowane są od dziesięcioleci na szeroką skalę w poszukiwaniach geologicznych, a postępujący rozwój, będący konsekwencją miniaturyzacji sprzętu komputerowego i cyfrowego przetwarzania pomierzonych danych oraz interpretacji wyników pomiarów, spowodował ich coraz częstsze wykorzystanie w badaniach podłoża gruntowych. Na podstawie prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej wygenerowanej na powierzchni terenu określane są zwykle parametry sprężyste podłoża.

Biorąc pod uwagę zalety badań metodami geofizycznymi, zwłaszcza możliwość uzyskania przestrzennego modelu podłoża projektowanych budowli, należy sądzić, że będą one w coraz szerszym zakresie wykorzystywane w projektowaniu geotechnicznym, a norma PN-EN 1997-2 zostanie uzupełniona o wytyczne ich stosowania. Rozpoznanie warunków posadowienia projektowanych obiektów budowlanych będzie wówczas przeprowadzane etapami, których zakres dla projektowanych obiektów budowlanych 2. i 3. kategorii geotechnicznej powinien być ogólnie zgodny z diagramem przedstawionym na rysunku 1.

ARTYKUŁY KONFERENCYJNE – TEMATYKA I OCENA

Na konferencję do sesji „Badania polowe według EC 7” zgłoszono 7 artykułów (tab. 1) dotyczących badań *in situ* i ich znaczenia w projektowaniu geotechnicznym. Oprócz dwóch artykułów (nr 1 i 2 w tab. 1), które można zakwalifikować do grupy artykułów o zbliżonej tematyce dotyczącej rozszerzenia i zwiększenia wiarygodności zasad interpretacji sondowań geotechnicznych przez uwzględnienie oddziaływań wody w porach gruntowych, pozostałe pięć artykułów zawiera opisy różnych kierunków badań *in situ* i ich zastosowania w praktyce. W niniejszym rozdziale podano charakterystykę zgłoszonych artykułów z krytycznymi uwagami do dyskusji podczas sesji konferencyjnej.

Artykuł Tschuschkego (nr 1 w tab. 1) dotyczył wykorzystania sondowań statycznych CPT i/lub CPTU do określania wytrzymałości na ścinanie gruntów w podłożach budowli z uwzględnieniem warunków rozpraszania wzbudzonych podczas sondowania ciśnień wody w porach (warunki z odpływem, bez odpływu lub z częściowym odpływem wody). Autor słusznie zauważył, że w praktyce często stosuje się te same zasady interpretacji wyników badań, niezależnie od techniki badań (CPT, RCPT, CPTU, SCPTU) i systemów rejestracji wyników (mechaniczny lub elektryczny), co może prowadzić do nietrafnych ocen warunków geotechnicznych i decyzji projektowych, nawet w przypadku występowania w podłożu – zwykle łatwiejszych do oceny – gruntów piaszczystych. Do rozpoznania warunków z odpływem, dla których opracowano najczęściej empiryczne zależności do oszacowania parametrów wytrzymałościowych (φ' , c') wykorzystywany jest współ-

Tabela 1. Artykuły konferencyjne – sesja I
Table 1. Conference papers – session I

Lp. No	Autor – Author	Tytuł artykułu – Paper title
1	Wojciech Tschuschke	Pomiar ciśnienia wody w porach metodą statycznego sondowania w aspekcie oceny wytrzymałościowej gruntów Measurement of pore water pressure using cone penetration test in terms of soil strength assessment
2	Łukasz Zawadzki, Mariusz Lech, Kazimierz Garbulewski	Wpływ stanu nasycenia podłoża gruntowego wodą na wyniki sondowań geotechnicznych Influence of ground saturation degree on penetration tests results
3	Marek Bajda, Mariusz Lech, Kinga Kronik	Wykorzystanie powierzchniowych badań elektrooporowych do oceny stanu technicznego budowli ziemnych The use of surface electric resistivity tomography for examination of technical conditions of the earth structures
4	Tomasz Godlewski	Interpretacja badań polowych a Eurokod 7 Interpretation of <i>in situ</i> tests vs Eurocode 7
5	Piotr Paprocki, Tomasz Kołanka, Sławomir Gawalko, Adrian Gańko	Wyznaczanie parametrów wytrzymałościowych gruntów z wykorzystaniem analizy wstecznej do projektu zabezpieczenia osuwiska Determination of soil strength parameters using back analysis for the need of documenting the design of landslide protections
6	Marek Bajda, Eugeniusz Koda	Badania geotechniczne do oceny warunków posadowienia w strefach przykrawędziowych Skarpy Warszawskiej Geotechnical tests for estimation of engineering conditions at the edge zone of “Skarpa Warszawska”
7	Eugeniusz Koda, Tomasz Kołanka, Piotr Osiński	Investigation of soil contamination level beneath the metallurgical waste landfill for the purpose of future reclamation works Badania stanu zanieczyszczenia gruntów w podłożu składowiska odpadów polutniczych do opracowania projektu rekultywacji

czynnik tarcia (R_f) w przypadku sondowań CPT i wskaźnik ciśnienia wody w porach (B_q) wymagający określenia rozkładu w podłożu ciśnień hydrostatycznych (u_o) i ciśnień wody w porach filtrem zainstalowanym bezpośrednio za ostrzem stożka (u_2) w sondzie CPTU. W interpretacji wyników sondowań, zwłaszcza do określenia parametrów wytrzymałościowych gruntów, należy rozpoznać warunki odpływu wody w badanym podłożu. O warunkach z odpływem świadczą wartości $R_f < 1\%$ (tzw. czyste piaski) i $B_q \approx 0$. Wartości współczynników $R_f < 1\%$ i $B_q > 0,1$ są charakterystyczne dla piasków zaglinionych lub gruntów o podobnym uziarnieniu. Na podstawie analizy wyników sondowań podłoża drogi, w której występowały grunty przejściowe (R_f w zakresie 0,5–2,5% i $B_q > 0,1$) autor stwierdził, że nieuwzględnienie wpływu ciśnienia wody w porach w analizie wyników pomiarów prowadzi do zaniżenia wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego. Wartość kąta tarcia wewnętrznego zwiększa się proporcjonalnie do wskaźnika ciśnienia wody w porach (B_q), co wyrażono wzorem $\Delta\phi' = 17,2 \cdot B_q - 2,3$ ($R^2 = 0,76$). W przypadku wartości $B_q = 0,5$ wartość efektywnego kąta tarcia wewnętrznego zmienia się z 33° do 39° . W analizowanym przypadku podłoża drogi nieuwzględnienie $\Delta\phi'$ skutkowało błędną decyzją o konieczności wzmocnienia podłoża. Z badań autora wynika, że do określenia parametrów wytrzymałościowych gruntów korzystniej jest zastosować badania z pomiarem ciśnienia wody w porach, czyli badania CPTU. Sonda CPT może być wykorzystana

jedynie w badaniach wytrzymałości podłoża o sprawdzonych warunkach odpływu wody, czyli w niezapyłonych i niezaglinionych piaskach. Często jeszcze stosowanie sondy CPT, niezależnie od warunków odpływu wody, wynika również z trudności w pomiarach i interpretacji wyników badań wzbudzonych ciśnień wody w porach, które niekoniecznie są wartościami dodatnimi. Wiarygodność pomiarów ciśnienia wody w porach zależy od spełnienia wielu wymagań technicznych, w tym zwłaszcza trudnego do spełnienia zapewnienia niezapowietrzenia się filtrów zlokalizowanych na podstawie stożka.

Zawadzki i inni (nr 2 w tab. 1) proponował uwzględnić w interpretacji wyników sondowań statycznych CPTU zmienną w czasie strefę aktywną podłoża (nie w pełni nasyconą wodą), w której w większości przypadków posadowione są obiekty budowlane. Według autorów na warunki geotechniczne rozpoznawane sondowaniami wpływ mają w tej strefie takie czynniki, jak ciśnienie atmosferyczne i infiltracja. Przedstawione w artykule wyniki badań terenowych osadów piaszczystych w zachodniej Australii i badań laboratoryjnych piasków w komorze kalibracyjnej, jak również badania własne na poligonie Stegny w Warszawie wskazują w sposób jednoznaczny na istotne zmiany wartości oporów stożka zależnie od warunków wilgotnościowych podłoża. Według autorów kluczową rolę w interpretacji sondowań odgrywa stan nasycenia wodą gruntów w strefie aktywnej, w której ciśnienie ssania powoduje zwiększenie wytrzymałości gruntów. Biorąc pod uwagę nieliczne, jak na razie, przypadki podane w literaturze i badania własne, autorzy sugerowali konieczność uwzględnienia w interpretacji sondowań zmienego w czasie stanu nasycenia wodą gruntów w podłożu projektowanych budowli. Podana w artykule hipoteza, słuszna w świetle wiedzy o odmiennym zachowaniu się gruntów zależnie od stanu nasycenia wodą, jak dotychczas nie była badana w szerszym zakresie. W Eurokodzie 7 podano zalecenia dotyczące uwzględnienia podziału podłoża zależnie od położenia zwierciadła wody gruntowej w sondowaniach dynamicznych, natomiast brak jest zaleceń odnośnie do sondowań statycznych. Jedną z prawdopodobnych przyczyn takiego stanu wytycznych jest konieczność uwzględnienia w rozkładzie naprężeń efektywnych w podłożu nie tylko dodatnich wartości ciśnienia wody w porach, ale również w strefie aktywnej wartości ujemnych, co wymaga do ich określenia zastosowania nieznanymi na ogół w środowisku geotechnicznym metod badań.

Bajda i inni (nr 3 w tab. 1) przedstawili badania elektrooporowe, jako przykład możliwości szerokiego wykorzystania w praktyce geotechnicznej metod geofizycznych (ERT) do oceny stanu technicznego odcinka wału przeciwpowodziowego Wisły w rejonie Krański Górne (woj. mazowieckie). Korpus wału o wysokości od 4 do 5 m uformowany został z piasków pylastych i drobnych (z wkładkami pyłów) na madowym tarasie zalewowym Wisły (piaski drobne i średnie z przewarstwieniami gliniastymi). Wyniki badań techniką tomografii elektrooporowej pozwoliły autorom wykryć w korpusie i podłożu strefy o oporności od 300 do 450 Ωm (strefa 1), od 600 do 1000 Ωm (strefa 2) i około 1100 Ωm (strefa 3). W strefie 3, co potwierdziły badania kontrolne sondą DPL, występują grunty piaszczyste w stanie luźnym. Według autorów duże, tzn. większe od 1000 Ωm , oporności gruntów piaszczystych oznaczają utrudniony przepływ prądu w podłożu, co może być spowodowane rozluźnieniem materiału w tym obszarze. Na podstawie badań własnych autorzy zaproponowali wstępne kryteria oceny zagęszczenia gruntów piaszczystych w wałach przeciwpowodziowych. Wartości oporności właściwej w zakresie 1000–1300 Ωm oznaczają stan luźny piasków pylastych, w zakresie 650–1000 Ωm – stan

średnio zagęszczony ($I_D \approx 0,5$), a w zakresie 300–450 Ωm – stan zagęszczony ($I_D \approx 0,7$). W celu opracowania bardziej szczegółowej klasyfikacji prowadzone będą dalsze badania w tym kierunku. W podsumowaniu artykułu autorzy podkreślali zalety techniki ERT, jej nieinwazyjny charakter i możliwość trafnego zaplanowania zakresu i lokalizacji szczegółowych badań geotechnicznych w strefach wałów przeciwpowodziowych o zwiększonej oporności właściwej. Artykuł zawierał jeden przykład skutecznego wykorzystania metod geofizycznych w praktyce geotechnicznej i nic dziwnego, że autorzy w podsumowaniu stwierdzili, że przeprowadzone badania miały charakter wskaźnikowy. Do opracowania klasyfikacji stanu gruntów w wałach przeciwpowodziowych, z pewnością potrzebnej w zastosowaniu praktycznym, konieczna jest szersza analiza wyników dotychczasowych badań wykonanych przez instytucje naukowe i usługowe w Polsce.

Artykuł Godlewskiego (nr 4 w tab. 1) dotyczył określania w projektowaniu geotechnicznym wyprowadzonych wartości parametrów geotechnicznych (nowy termin wprowadzony w normie PN-EN 1997-1) na podstawie wyników sondowań dynamicznych (DP), statycznych (CPTU) i dylatometrycznych (DMT). Autor słusznie zauważył, że w celu uzyskania „wiarygodnych parametrów geotechnicznych” konieczne jest zapewnienie jakości badań zgodnie z procedurami podanymi w Eurokodzie 7 i sprawdzonej w praktyce interpretacją wyników. W artykule przedstawiono porównanie stosowanych w Polsce przez ośrodki naukowo-badawcze, w szczególności przez ITB, zasad interpretacji wyników sondowań, między innymi DP, CPT, SPT, CPTU i DMT, z podanymi w normie PN-EN 1997-2 (w zasadzie w załącznikach informacyjnych od załącznika D do K). Według autora do prawidłowej oceny warunków geotechnicznych posadowienia projektowanych obiektów konieczne jest stosowanie w interpretacji sondowań regionalnych korelacji lub korelacji powszechnie stosowanych adaptowanych do warunków lokalnych. Można zgodzić się z opinią autora, że nowe typy sond statycznych wciskanych z piezostóżkiem (CPTU) i dylatometr płaski Marchettiego (DMT) „...nie mają jeszcze dość dobrych (regionalnych) polskich korelacji do interpretacji wyników lub są one w zbyt małym stopniu zweryfikowane” pomimo licznych już prac badawczych w ramach projektów NCN i NCBR. Jako przykład braku jednoznacznych zaleceń autor podaje szerokie zakresy zmienności współczynnika N_{kt} do określenia z badań CPTU wytrzymałości na ścinanie bez odpływu gruntów drobnoziarnistych (c_{it}). W normie PN-B-04452:2002 na podstawie lokalnych doświadczeń i wiarygodnych korelacji podano wartości współczynników N_{kt} dla typowych gruntów polodowcowych występujących w Polsce w zakresie 12–25, a dla gruntów zastoiskowych w zakresie 6–15, co jest zgodne z wartościami N_{kt} zalecanymi w innych regionach. Oprócz podanych zaleceń w normie tej brak jest jednoznacznych zasad przyjmowania wartości współczynników N_{kt} w interpretacji sondowań zarówno CPT, jak i CPTU. Zasady takie powinny znaleźć się w załączniku krajowym normy PN-EN 1997-2. Jak stwierdził autor, obecnie prowadzone są badania przez wiele ośrodków i badaczy nad zasadami symultanicznej interpretacji wyników badań CPTU i DMT w celu wykorzystania ich do bezpośredniego wyznaczania parametrów geotechnicznych (np. φ' , c_{it} , E). Z doświadczeń wynika, że do wyznaczania modułów odkształcenia bardziej uzasadnione jest wykorzystanie pomiarów sondą DMT, pod warunkiem przeprowadzenia ich walidacji. Wniosek ten w pełni został uzasadniony podanym w artykule porównaniem wartości osiadań podłoża gruntowych, obliczonych na podstawie pomiarów DMT i pomierzonych na 30 obiektach o różnych metodach posadowienia

(stopa, ława, płyta) w gruntach piaszczystych (Sa), spoistych (Sasi, sasiCl, Cl) i organicznych (Or). W końcowej części artykułu autor zaproponował do wyznaczania modułu dylatometrycznego (M_{DMT}) zmodyfikowany nomogram Schmertmana, co można uznać za kierunek zgodny z tendencją symultanicznej interpretacji wyników sondowań DMT i CPTU. Jednakże nawiązując do informacji podanej w rozdziale 1, dotyczącej poziomu odkształceń generowanych w trakcie sondowania CPTU, propozycję podanego w artykule nomogramu, gdzie moduł dylatometryczny określany jest na podstawie oporu stożka (q_c) i współczynnika tarcia (R_f), należy uznać za dyskusyjną. Ponadto proponowany nomogram nie uwzględnia innych czynników, takich jak chociażby stan naprężenia w gruncie, historii naprężenia, anizotropii ośrodka, a przede wszystkim poziomu odkształceń. Stosowanie korelacji $q_c \sim M_{DMT}$, $q_c \sim E$, zwłaszcza przez geotechników z małym doświadczeniem, może prowadzić do błędnych wniosków. Kluczowym wnioskiem wynikającym z treści artykułu jest podkreślenie znaczenia poprawnej interpretacji wyników sondowań, której warunkiem jest opracowanie własnych „kluczy interpretacyjnych” dla poszczególnych metod badań *in situ*. Do tego niezbędna jest baza danych zawierająca sprawdzone wyniki sondowań i ich weryfikacja, która powinna być opracowana jako efekt projektu badawczego współpracujących ośrodków naukowo-badawczych w Polsce. Należy zgodzić się z ważnym wnioskiem autora artykułu, aby efekt projektu badawczego znalazł się w załączniku krajowym normy PN-EN 1997-2.

Artykuł Paprockiego i innych (nr 5 w tab. 1) dotyczył określania rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych gruntów z wykorzystaniem analizy wstecznej, co jest możliwe w przypadku osuwisk skarp, w których wystąpił stan graniczny wyrażony wartością współczynnika stateczności $F = 1$. Podjęcie tego problemu wynika z uaktywnienia się w 2010 roku na południu Polski dużej liczby osuwisk na skutek intensywnych opadów atmosferycznych i konieczności opracowania projektów geotechnicznych zabezpieczenia skarp zniszczonych osuwiskami. Projektowanie geotechniczne wymaga ustalenia wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów występujących w obrębie skarpy głównej i koluwium osuwiska. W artykule przedstawiono charakterystykę aktywnego osuwiska długości około 250 m w obrębie płaszczowiny śląskiej (główna jednostka tektoniczna Karpat Fliszowych) i wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych na podstawie wyników badań w aparacie trójosiowym, które zweryfikowano, przeprowadzając analizę wsteczną stateczności skarpy zbocza. Podstawą do przeprowadzenia analizy wstecznej były wyniki pomiarów geodezyjnych (dane geometryczne skarpy przed wystąpieniem i w trakcie rozwoju osuwiska), wierceń z pełnym rdzeniowaniem, obserwacji w szurfach badawczych i badań geotechnicznych, uzupełnione badaniami geofizycznymi metodą elektrooporową. Analiza wyników badań terenowych i laboratoryjnych umożliwiła udokumentowanie warunków geotechnicznych w rejonie osuwiska i wykrycie przebiegu powierzchni poślizgu. Obserwacje rdzeni gruntów z otworów badawczych (w artykule pokazano rdzeń z prawdopodobną strefą poślizgu), jak również interpretacja wyników badań geofizycznych (niestety tylko z ogólną informacją o ich wykorzystaniu) pozwoliły przyjąć, że powierzchnia poślizgu przebiega w strefie przewarstwień skruszonego piaskowca, w stropowej części podłoża fliszowego, na głębokości od 6 do 12 m. Jednakże autorzy nie byli całkowicie pewni położenia powierzchni poślizgu, skoro w analizie stateczności zbocza przyjęli dodatkowo wariant z powierzchnią poślizgu na styku zwierzeliny i podłoża fliszowego. Na podstawie analizy wstecznej, w której przyjęto sześć

wariantów różniących się geometrią zbocza (przed i po wystąpieniu osuwiska) i położeniem powierzchni poślizgu oraz zwierciadła wody gruntowej, zweryfikowano ustaloną pierwotnie na podstawie bezpośrednich testów laboratoryjnych w aparacie trójosiowego ściskania wartość efektywnego kąta tarcia wewnętrznego. Należy zauważyć, że kąt tarcia wewnętrznego określony z badań ($\varphi' = 24^\circ$) różni się tylko o 4° od uzyskanego z analizy wstecznej dla warunku $F \leq 1$. Kąt $\varphi' = 20^\circ$ uznano za rzeczywistą wartość kąta tarcia wewnętrznego gruntów koluwalnych występujących w analizowanym zboczu. Z analizy stateczności zbocza wynika, że przyjmując tę wartość kąta tarcia wewnętrznego i geometrię zbocza przed powstaniem osuwiska, współczynnik stateczności $F = 0,95$. Wyniki obliczeń skarpy po powstaniu osuwiska wskazują na dalsze zagrożenie jej stateczności, szczególnie w przypadku wystąpienia niekorzystnych zjawisk pogodowych lub innych czynników pogarszających warunki stateczności. Według deklaracji złożonych przez Komitet Techniczny PKN do spraw geotechniki (nr 254) warunki stateczności skarp nasyków i zboczy naturalnych powinno się sprawdzać, stosując 3. podejście projektowe (DA3), w którym obliczeniowe wartości parametrów wytrzymałościowych określa się, stosując współczynniki częściowe, na przykład $\gamma_{\varphi'} = 1,25$ (do $\tan \varphi'$). Autorzy, powołując się na Eurokod 7, stwierdzili, że obwiednia zniszczenia w przypadku interpretacji badań gruntów prekonsolidowanych nie jest prostoliniowa, zwłaszcza w zakresie małych naprężeń. W związku z tym istotne jest wyjaśnienie, jakie założenia przyjęto do określenia na podstawie badań w aparacie trójosiowego ściskania parametrów wytrzymałościowych gruntów stanowiących koluwia osuwiskowe i jak dobrano parametry obliczeniowe w analizach stateczności.

Artykuł autorstwa Bajdy i Kody (nr 6 w tab. 1), podobnie jak artykuły nr 3, 4 i 5, stanowił przykład zastosowania badań *in situ* w praktycznych zagadnieniach inżynierskich, w tym przypadku do oceny warunków geotechnicznych posadowienia projektowanego budynku w rejonie ulicy Tamka w Warszawie (Skarpa Warszawska). Przypowierzchniową strefę podłoża budują tu spoiste osady koluwalno-deluwialne oraz aluwia okresowych cieków, leżące na erozyjno-glacitektonicznej powierzchni iłów pstrych pliocenu. Na podstawie analizy materiałów archiwalnych, badań terenowych (wiercenia, sondowania CPTU i DMT) oraz badań laboratoryjnych gruntów autorzy przedstawili budowę geologiczną i warunki hydrogeologiczne oraz dokonali ilościowej i jakościowej oceny parametrów geotechnicznych gruntów występujących w badanym podłożu. Analiza wyników badań geotechnicznych umożliwiła wydzielenie w podłożu osadów antropogenicznych, zboczowych i rzecznych oraz stropu silnie zaburzonych osadów plioceńskich z oceną ich przydatności do posadowienia projektowanej budowli. Obszerny zakres badań *in situ*, uzasadniony złożonymi warunkami geotechnicznymi wynikającymi z genezy gruntów w Skarpie Warszawskiej i z geodynamicznych procesów, w tym sondowania CPTU z pomiarem ciśnień wody w porach (u_2), pozwoliły na dokładne rozpoznanie zróżnicowanej budowy osadów koluwalno-deluwialnych zalegających w strefie przyskarpowej. Z kolei ciągły zapis mierzonych parametrów gruntowych pozwolił na rozpoznanie przewarstwień, nawet o niewielkiej miąższości, i precyzyjne ustalenie głębokości zalegania stropu niezaburzonych iłów trzeciorzędowych, które wskazano jako strefę bezpiecznego posadowienia obiektów budowlanych. Autorzy, kierując się powszechnie znaną wiedzą

i własną praktyką, zastosowali sondę CPTU do określenia stanu plastyczności oraz wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu badanych ilów, natomiast dylatometr DMT do określenia parametrów odkształceniowych. W artykule podano wzory użyte w interpretacji sondowań, jednakże wyjaśnienia wymagają zasady ich doboru, zależnie od rodzaju gruntu wartości współczynników N_k i B , przyjętych do obliczenia wytrzymałości na ścinanie (τ_{fi}) i kąta tarcia wewnętrznego (ϕ'). Autorzy podkreślili, że w profilu gruntowym, zbudowanym w przewodzie z gruntów spoistych o pochodzeniu deluwialno-koluwialnym, występują liczne sączenia wody wpływające na stan uplastycznienia gruntów i zmianę ich objętości (pęcznienie). Z pewnością w tym kontekście istotny w wyborze odpowiednich warunków posadowienia projektowanego budynku jest rozkład ciśnienia wody w porach w podłożu badanym do głębokości 18 m. Warto również podkreślić, że na analizowanym obiekcie prowadzone były pomiary geofizyczne metodą tomografii elektrooporowej, mające na celu określenie stropu nienaruszonych ilów [Lech i Bajda 2013]. Wyniki tych badań nie zostały włączone do zgłoszonego na konferencję artykułu, niemniej warto podać informację, że potwierdziły one położenie stropu nienaruszonych ilów.

W artykule autorstwa Kody i innych (nr 7 w tab. 1) podjęto tematykę rozpoznania i udokumentowania stanu zanieczyszczenia podłoża gruntowego na terenach zdegradowanych, która wchodzi w zakres intensywnie rozwijanej obecnie geotechniki środowiskowej. Zgodnie z prawem obowiązującym na terenie naszego kraju i całej Unii Europejskiej jednym z zadań podczas przygotowania projektu rekultywacji terenów zdegradowanych jest szczegółowa analiza i dokumentacja warunków gruntowych. W artykule autorzy przedstawili szczegółowy zakres badań gruntów na potrzeby stworzenia projektu prac rekultywacyjnych terenów składowiska odpadów pohnitcznych o powierzchni 34 ha, zlokalizowanego na terenach dużego miasta. W artykule przedstawiono zakres oraz metodykę przeprowadzonych badań skażenia gruntu, analizę morfologii i składu odpadów pohnitcznych wraz z ich dokumentacją. Na badania te składały się zarówno badania terenowe, w tym badania detektorem fotojonizacji (PID) lotnych substancji ropopochodnych, jak i laboratoryjne – analizy fizyczno-chemiczne pobranych w terenie próbek gruntu i wody. Szczegółowa analiza uzyskanych wyników pozwoliła na precyzyjne ustalenie indyktorów zanieczyszczeń, stref ich zasięgu oraz objętości skażonych gruntów na analizowanym terenie huty. Dzięki zastosowaniu takich metod badawczych, jak: sondowania geoelektryczne, wiercenia geologiczne, pomiary geodezyjne oraz laboratoryjne analizy chemiczne, opracowano między innymi mapy stref zanieczyszczeń z rozkładem wartości stężeń, co w dalszym etapie umożliwiło sporządzenie obszernego projektu prac rekultywacyjnych na terenie przeznaczonym pod przyszłe inwestycje urbanistyczne. Analizując artykuł, można stwierdzić, że autorzy do rozpoznania zanieczyszczenia terenu wykorzystali wyłącznie wyniki analiz chemicznych próbek gruntów pobranych z 80 otworów badawczych, co należy uznać za działanie słuszne, jednakże biorąc pod uwagę liczbę odwiertów i badań laboratoryjnych – bardzo pracochłonne i kosztowne. W artykule nie podano, w jakim zakresie, poza ustaleniem miąższości odpadów, wykorzystano badania geoelektryczne do rozpoznania zanieczyszczenia gruntów w podłożu.

PODSUMOWANIE

W projektowaniu geotechnicznym badania *in situ* mają kluczowe znaczenie w wyborze i uzasadnieniu typu i głębokości posadowienia projektowanych obiektów oraz udokumentowaniu, że zapewnią one bezpieczne warunki ich użytkowania. Do niepodważalnych zalet badań *in situ* powszechnie zaliczane są ich efekty, w tym:

- rozpoznanie stratygrafii i litologii podłoża,
- wydzielenie warstw geotechnicznych,
- wykrycie najsłabszych stref podłoża,
- pobór próbek gruntów do badań laboratoryjnych z oceną stopnia ich naruszenia,
- ciągły rozkład pomierzonych parametrów gruntowych.

Dwie metody badań, CPTU i DMT, są uważane za równorzędne i wymagane do oceny warunków geotechnicznych projektowanych obiektów 2. i 3. kategorii geotechnicznej. Jednakże biorąc pod uwagę technikę badań obiema metodami, należy uznać badania CPTU za bardziej wiarygodne do określania parametrów wytrzymałościowych, a badania DMT – parametrów odkształceniowych gruntów. Do projektowania obiektów budowlanych 3. kategorii geotechnicznej i 2. kategorii geotechnicznej w złożonych warunkach gruntowych i obciążeniowych zalecane są badania SCPTU i SDMT, które pozwalają w interpretacji parametrów wziąć dodatkowo pod uwagę prędkość rozchodzenia się w podłożu fal akustycznych. Badania sondami SCPTU i SDMT powinny być poprzedzone rozpoznaniem warunków geotechnicznych metodami geofizycznymi. Do zalet badań geofizycznych można zaliczyć:

- nieinwazyjny charakter (brak naruszenia struktury podłoża),
- ogólne rozpoznanie budowy geologicznej podłoża,
- wytypowanie lokalizacji wierceń i sondowań geotechnicznych,
- ocenę jakości (stanu naruszenia) próbek gruntu,
- wstępne rozpoznanie warunków hydrogeologicznych,
- określenie poziomu występowania zwierciadła wody gruntowej (stref saturacji i aeracji),
- określenie porowatości ośrodka gruntowego,
- rozpoznanie zasięgu zanieczyszczeń chemicznych w gruncie oraz dróg migracji zanieczyszczeń,
- rozpoznanie granic strukturalnych budowli i infrastruktury inżynierskiej (np. składowisk odpadów, zbiorników i rurociągów).

PIŚMIENNICTWO

- Ferreira C., Viana Da Fonseca A., Nash D.F.T., 2011. Shear wave velocities for sample quality assessment on a residual soil. *Soils and Foundations* 51, 4, 683–692.
- Hight D.W., 2013. Assessing sample quality prior to laboratory testing. *Proc. of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks. Part 4*, IOS Press, 285–287.
- Landon M., DeGroot D., Sheahan T., 2007. Nondestructive Sample Quality Assessment of a Soft Clay Using Shear Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng. ASCE* 133, 4: 424–432.

- Lech M., Bajda M., 2013. Wybrane przykłady zastosowania tomografii elektrooporowej i sejsmiki powierzchniowej w zagadnieniach inżynierskich. Seminarium Naukowe „Współczesne zastosowania metod geofizycznych w geotechnice i geologii inżynierskiej”, Poznań.
- Mayne P.W., Coop M.R., Springman S.M., Huang A.B., Zornberg J.G., 2009. Geomaterial behaviour and testing. State of the Art (SOA) paper. Proc. of the 17th ICSMGE, Alexandria, 2777–2872.
- Młynarek Z., 2007. Site investigation and mapping in urban area. Proc. of the 14-th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Millpress, 175–202.
- Młynarek Z., 2011. Regional Report in East European Countries. The Silesian University of Technology ACEE 1, 55–76.
- Młynarek Z., 2013. Metody i ograniczenia w wyznaczaniu parametrów geotechnicznych gruntów w badaniach *in situ*. Materiały XXVIII Ogólnopolskich Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji. Wisła, 399–440.
- PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe.
- PN-EN 1997-1 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 22476-1-13:2005 Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania polowe.
- Powell J.M., 2005. *In situ* testing. General Report. Proc. of 14-th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka, Millpress, 729–734.
- Rabarijoely S., Garbulewski K., 2013. Simultaneous interpretation of CPT/DMT tests to ground characterization. Proc. of the 18-th ICSMGE. Paris (w druku).
- Robertson P.K., 2009. CPT-DMT Correlation. Journal of Geotechnical and Environmental Eng. ASCE 135, 11.
- Robertson P.K., 2012. Interpretation of *in-situ* tests – some insights. J.K. Mitchell Lecture, ISC’4, Recife, Brazil, 1–19.
- Tanaka H., 2002. Sample quality of cohesive soils: lessons from three sites, Ariake, Bothkennar and Drammen. Soils and Foundations 40 (4), 57–74.

THE ROLE OF *IN SITU* TESTS IN GEOTECHNICAL DESIGN

Abstract. The paper presents a description of *in situ* tests, which according to Eurocode 7 are required to recognize the geotechnical conditions of design structures and to determine the parameters of the ground in order to check the limit states. The developments of *in situ* testing methods including innovative changes introduced to the practice in recent years are also described. Moreover, an overview of the papers submitted to the conference ProGeotech2013 “Geotechnical design – investigation and selection of ground parameters”, session I: *In situ* tests according to EC7, with critical remarks for discussion at the conference session is presented.

Keywords: *in situ* tests, geotechnical design, Eurocode 7

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.12.2013