

NOWOCZESNE METODY BADAŃ PODŁOŻA
DLA USTALENIA DANYCH WYJŚCIOWYCH
DO PROJEKTOWANIA ODWODNIEŃ I POSADOWIEŃ BUDOWLI

Zbigniew Młynarek

Zakład Geotechniki Akademii Rolniczej w Poznaniu

WSTĘP

Określenie parametrów geotechnicznych, które jednoznacznie odzwierciedlają właściwości podłoża, ma szczególne znaczenie w projektowaniu odwodnień i posadowień budowli. Jak ogólnie wiadomo, generalnie stosowane są dwie metody oceny parametrów podłoża, a mianowicie, poprzez badania laboratoryjne oraz badania w warunkach in situ. Ostatnie lata przyczyniły się do intensywnego rozwoju techniki laboratoryjnej i terenowej, stąd też zwiększyły się możliwości bardziej wszechstronnej oceny parametrów podłoża.

W niniejszym artykule przedstawiono ostatnie osiągnięcia z dziedziny sprzętu do badań właściwości podłoża w warunkach in situ oraz poglądy na temat możliwości wykorzystania metod terenowych do oceny stratygrafii podłoża, właściwości fizycznych i parametrów wytrzymałościowych. W przeglądzie tym szczególną uwagę zwrócono na metodę statycznego sondowania.

METODY OCENY DANYCH WYJŚCIOWYCH
DO PROJEKTOWANIA POSADOWIEŃ
I ODWODNIEŃ TERENÓW BUDOWLANYCH

Dla właściwego doboru metody posadowienia oraz odwodnienia terenu budowlanego niezbędnym elementem jest przyjęcie odpowiedniego modelu obliczeniowego podłoża. W zależności od kategorii modelu przeprowadza się bardziej lub mniej skomplikowane badania terenowe i laboratoryjne. Modele te można podzielić na trzy kategorie /Jamiolkowski [1]/:

Kategoria I - bardzo zaawansowanych modeli nieliniowych, o charakterze elastoplastycznym. Modele te uwzględniają zmienność związków fizycznych w czasie oraz anizotropowość podłoża. Dane wyjściowe dla tych modeli można uzyskać w badaniach laboratoryjnych, które z kolei wymagają specjalistycznej, wysokiej jakości aparatury. Testy laboratoryjne w tej grupie powinny być weryfikowane badaniami w warunkach in situ.

Kategoria II to modele zaawansowane, opierające się na prawach konstytutywnych teorii sprężystoplastycznych i nieliniowych związków fizycznych. Niezbędne badania laboratoryjne kwalifikują się w tej kategorii do badań tylko nieco bardziej skomplikowanych od badań standardowych.

Kategorię III stanowią proste modele empiryczne lub sztywno-plastyczne, które uwzględniają izotropowość podłoża. Dla ustalenia danych wyjściowych dla tych modeli wystarczające są konwencjonalne badania laboratoryjne i terenowe.

Ostatnie lata, jak wcześniej wspomniano, przyniosły wiele istotnych zmian w technice badań laboratoryjnych i terenowych. Każda z tych dwóch grup doświadczeń ma określone zalety i wady. Podejmując decyzję odnośnie zakresu programu badań, warto przytoczyć za Jamiolkowskim [1] niektóre z istotniejszych uwarunkowań dla metod laboratoryjnych i terenowych. Generalnie można jednak stwierdzić, że szacowanie właściwości podłoża na podstawie badań laboratoryjnych, opartych na próbkach o strukturze nienaruszonej, jest sposobem droższym od badań terenowych.

Do zalet technik terenowych badań podłoża można zaliczyć:

- badaniu poddana jest znacznie większa objętość gruntu aniżeli w badaniu laboratoryjnym,
- badanie terenowe bardziej dokładnie pozwala zidentyfikować makrostrukturę, warstwowanie,
- kilka z istniejących obecnie przyrządów do badań terenowych pozwala ocenić zmiany właściwości podłoża w sposób ciągły,
- badania terenowe mogą być przeprowadzone w tych warunkach, gdzie pozyskanie prób do badań laboratoryjnych jest niemożliwe, względnie próby są niewiarygodne, np. silnie zaburzone iły, wrażliwe iły oraz dominująca część gruntów niespoistych,
- badanie jest prowadzone w naturalnych warunkach, związanych z istniejącym w podłożu stanem naprężenia. Nowoczesne techniki badania pozwalają wyznaczyć wartości ciśnień porowych.

Ograniczenia dla metod terenowych stanowią:

- warunki graniczne, wyrażone w naprężeniach i odkształceniach dla większości badań terenowych są słabo zdefiniowane, a racjonalna interpretacja wyników jest trudna,
- warunki drenażu podczas badania dla wielu przyrządów nie są znane,
- wprowadzenie przyrządu pomiarowego w podłoże powoduje istotne zakłócenia w podłożu,
- zasięg odkształcenia i obszarów zniszczenia w otaczającym przyrząd podłożu jest generalnie różny od tego, który powodują konstrukcje inżynierskie. Częstokroć stany te nie są dokładnie zdefiniowane,
- pola naprężeń wokół przyrządu są niejednorodne, a prędkości odkształceń są większe niż stosowane w laboratorium. Są one także różne od tych, które wywołują konstrukcje inżynierskie,

- z wyjątkiem metody sondowania, typu sondą cylindryczną, stan i rodzaj podłoża jest identyfikowany w sposób pośredni.

Do zalet badań laboratoryjnych zalicza się:

- warunki odpływu wody z próbki w czasie doświadczenia są ściśle kontrolowane,
- dobrze zdefiniowane są warunki brzegowe,
- doświadczenie może być przeprowadzone zgodnie z wybranymi i dobrze zdefiniowanymi ścieżkami naprężeń,
- na próbkę gruntu nakładane jest jednorodne pole odkształceń przez co możliwe jest zastosowanie w interpretacji wyników badania teorii ośrodków ciągłych. Generalnie odkształcenia w próbce kwalifikują się do małych odkształceń,
- rodzaj próbki gruntu i jej właściwości fizyczne są jednoznacznie zdefiniowane.

Ograniczenia dla metod laboratoryjnych stanowią:

- w gruntach spoistych, nawet dla próbek tzw. wysokiej jakości, zakłócenia będące wynikiem pobrania próbek są często trudne do zdefiniowania,
- pozyskanie próbek o nienaruszonej strukturze dla gruntów niespoistych jest w dalszym ciągu nie rozwiązaniem zagadnieniem praktycznym,
- mała objętość próbki nie może uwzględniać niejednorodności oraz makrostruktury całego podłoża. Fakt ten pozwala wątpić w efektywne modelowanie właściwości podłoża na bazie badań laboratoryjnych wykonanych w małej skali,
- czynniki, które decydują o formowaniu się płaszczyzn zniszczenia w próbce podczas badania, są ciągle bardzo słabo rozpoznane,
- nieciągłość informacji uzyskana z badań laboratoryjnych może prowadzić do błędnego wy-modelowania zjawisk, które mogą wystąpić w dużym masywie gruntowym.

Wymienione wyżej zalety i wady poszczególnych typów badań oraz określone nakłady finansowe powodują, że właściwe przygotowanie programu badań podłoża stanowi istotny element przygotowania projektu technicznego. Za niezbędne dane geotechniczne do zaprojektowania posadowień i odwodnień, jak ogólnie wiadomo, uznaje się informacje o budowie geologicznej podłoża i strukturze gruntów, parametry fizyczne i parametry ścianania poszczególnych warstw gruntów, charakterystyki odkształcenia, wartości poziomych naprężeń w podłożu oraz wartości ciśnień porowych. W zależności od wielkości zadania inwestycyjnego podane wyżej parametry, opisujące ośrodek gruntowy, są wykorzystywane w mniejszym lub szerszym zakresie. Aktualne możliwości oszacowania poszczególnych parametrów są dosyć zróżnicowane. Warto więc zapoznać się z zakresem niezbędnych badań potrzebnych do oceny określonych parametrów. Niektóre z tych oznaczeń wymagają wyspecjalizowanej aparatury i sprzętu terenowego. Doskonale ilustrują wymienione wyżej dwa problemy tab. 1 i 2, opracowane przez Jamiolkowskiego i .

Tabela 1

Aktualne możliwości badań laboratoryjnych w modelowaniu właściwości gruntów za Jamiolkowskim [1]

Paramet lub właściwość gruntu	Urządzenie, względnie procedura	Uwagi
1	2	3
1. Współczynnik K_o	1. Aparat TX lub test edometryczny, jedno z tych dwóch badań z możliwością pomiaru naprężeń poziomych	1.1.a. Test ograniczony do gruntów spoistych 1.1.b. Przydatność tylko dla mechanicznego przekonsolidowania po przyjęciu znormalizowanych warunków
2. Efektywne naprężenie normalne w podłożu σ'_p	2. Głównie test adometryczny	2.1.a. Test wymaga wysokiej jakości próbek gruntów spoistych o nie-naruszonej strukturze. 2.1.b. Bardzo trudno odróżnić różne mechanizmy przekonsolidowania
3. Wpływ pośredniego naprężenia głównego σ_2 na wytrzymałość i sztywność	3.1. Prawdziwy aparat TX z różnymi warunkami brzegowymi. 3.2. TSHC aparat z różnymi wartościami ciśnień wewnętrznych i zewnętrznych " P_e "	3.1. Duża ilość danych dla piasków daje sprzeczne wyniki dla wysokich wartości $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 3.2. Ograniczona ilość danych dotyczących iłów.
4. Wstępna anizotropia względem maksymalnej wytrzymałości i sztywności	4.1. Badania TX lub PS na warstwowanych próbkach 4.2. Prawdziwy test w TX 4.3. Aparat TSHC 4.4. Aparat DSC	4.1. Wątpliwa niezawodność 4.2. Ograniczony do $\sigma = 90^\circ$ obrotu głównych naprężeń przy zniszczeniu 4.3.a. "Udowodniony" dla CU i CD testów na piaskach i testów CU na iłach. 4.3.b. Może zbadać pełen zakres od $0^\circ \leq \sigma \leq 90^\circ$ /w teorii/ 4.4.a. Może zbadać pełen zakres w warunkach płaskiego stanu naprężenia 4.4.b. "Zdowodniony" dla piasków i iłów przekonsolidowanych 4.4.c. Ograniczony do niskich poziomów naprężeń ścinających
5. Narastająca anizotropia, wpływ zmiennego naprężenia	5.1. Prawdziwe testy w TX 5.2. Testy TSHC 5.3. Test DSC	5.1. Ograniczony do $\sigma = 90^\circ$ obrotu głównych naprężeń przy zniszczeniu 5.2. Doskonały potencjał teoretyczny 5.3.a. Dość wszechstronny w ramach warunków naprężeń płaskich

cd. tabeli 1

1	2	3
		5.3.b. Dostępne są wyczerpujące dane dot. indukowanej anizotropii w piaskach
6. Wpływy czasu /szybkość pełzania i naprężenia/	6.1. Edometr i prawie wszystkie rodzaje TX, PS, DSS, prawdziwe TX i TSHC mogą badać wpływy czasu	6.1.a. Problemy eksperymentalne związane z przeciekaniem membramy, tarciem na ścianach próbek i wahaniami temperatury
7. Wpływ ograniczającego poziomu naprężenia na maksymalną wytrzymałość i sztywność	7.1. Nieliczne ograniczenia praktyczne przy standardowym sprzęcie laboratoryjnym /TX, PS, DSS, TRC, TSHC/. Ograniczenia dla takich urządzeń jak DSZ	7.1.a. Ważne dla zagęszczonych piasków, sztywnych iłów i gruntów scementowanych 7.1.b. Istnieje ograniczenie dla DSC: stosowane naprężenie nie może przekroczyć 50 kPa.
8. Moduł ścinania przy małych naprężeniach	8.1. TRC i TSHC	8.1.a. "Udowodnione" dla iłów i laboratoryjnie rekonstruowanych piasków, ograniczone dane, dostępne dla piasku o nienaruszonej strukturze 8.1.b. W iłach rezultaty są bardzo zależne od nawet niewielkiego zakłócenia struktury próbki 8.1.c. Większość dostępnych danych uzyskano z izotropowo skonsolidowanych próbek 8.1.d. Mało wiadomo o wpływie wstępnej anizotropii i σ_v na mierzone wartości parametrów

Symbole:

- OED - edometr,
- USS - prosty aparat bezpośredniego ścinania,
- TRC - aparat kolumnowy do badania wytrzymałości przy skręcaniu,
- PS - aparat płaszczyznowy,
- CD - badanie próbek według schematu - z konsolidacją i drenowaniem w czasie badania,
- OCR - współczynnik przekonsolidowania,
- TX - aparat trójosiowego ściskania,
- TSHC - aparat cylindryczny do badania wytrzymałości na ścinanie /próbki o kształcie rury grubościennej/,
- DSC - aparat z komorą o ukierunkowanej płaszczyźnie ścinania,
- CU - badanie według schematu z konsolidacją i bez drenażu,
- K_0 - współczynnik parcia spoczynkowego.

Tabela 2

Aktualne możliwości badań terenowych w modelowaniu właściwości gruntu

Parametr lub właściwość gruntu	Urządzenie, względnie procedura	Uwagi
1. Profilowanie i identyfikacja podłoża	1.1. CPTU	1.1.a. Jednoczesny pomiar q_c i U_{max} podczas sondowania ma wielkie możliwości w profilowaniu i identyfikacji gruntu.
	1.2. CPT	1.1.b. Sztywny i bardzo dobrze odpowietrzony system z bardzo szybką reakcją ma niezawodne pomiary U_{max} .
	1.3. DMT	1.1.c. Korekta q_c i f_s dla nierównych i obszarowych efektów.
	1.4. Stożek akustyczny	1.2.a. Dobry do profilowania gruntu, lecz mniej wrażliwy na zmiany warstwowe w porównaniu do CPTU.
	1.5. czujnik elektryczny	1.2.b. Stosunek tarcia f_s/q_c słabym identyfikatorem typu gruntu, szczególnie dla wrażliwych iłłów 1.2.c. Potencjalne możliwości mogą być zwiększone przez ulepszenie rozkładu pomiarów q_c i bardziej niezawodne i powtarzalne pomiary f_s .
2. In situ σ_{h_0} stąd K_0	2.1. SBP /mierzy σ_{h_0} /	1.3.a. I_D jest wrażliwym identyfikatorem gruntu, ponieważ wykonywany jest nieciągłe, zwykle co 20 cm, jest mniej czuły na zmiany warstwowe.
	2.2. DMT /ocenia K_0 /	1.4.a. Głównie do profilowania i identyfikacji warstw gruntów, wymaga dalszego uwarygadniania w badaniach polowych i laboratoryjnych.
	2.3. ISC /ocenia σ_{h_0} /	1.4.a. Głównie do profilowania i identyfikacji warstw gruntów, wymaga dalszego uwarygadniania w badaniach polowych i laboratoryjnych.
	2.4. TSC /mierzy σ_{h_0} /	1.5.a. Mierzy niewymiarowy elektryczny "Czynnik twórczy", który odzwierciedla strukturę piasku z powodu jej anizotropii, kształtu cząstek, wskaźnik porowatości i scementowania, może być odpowiedni do badań nad upłynnieniem gruntu.
	2.5. Przełom hydrauliczny /ocenia σ_{h_b} /	1.5.b. Wymaga dalszego potwierdzenia, szczególnie w badaniach terenowych.
2. In situ σ_{h_0} stąd K_0	2.1. SBP /mierzy σ_{h_0} /	2.1.a. "Udowodnione" w miękkich iłach, mniejsze doświadczenie z iłami zwartymi, słabe z piaskami.
	2.2. DMT /ocenia K_0 /	2.1.b. Największe potencjalne możliwości wśród metod terenowych, lecz wciąż trudności z podatnością sprzętu i procedura sondowania.
	2.3. ISC /ocenia σ_{h_0} /	2.2.a. Oparte na korelacjach empirycznych, obiecujące, lecz wymaga dalszych badań aby ocenić niezawodność.
	2.4. TSC /mierzy σ_{h_0} /	2.3.a. Nowe urządzenie, wymaga dalszego potwierdzenia w badaniach terenowych i laboratoryjnych.
	2.5. Przełom hydrauliczny /ocenia σ_{h_b} /	2.4.a. Ograniczone doświadczenie, pozytywne jedynie w iłach miękkich do twardeplastycznych mało prawdopodobne wykorzystanie dla innych gruntów.

cd. tabeli 2

Parametr lub właściwość gruntu	Urządzenie, względnie procedura	Uwagi
		2.4.b. W iltach zwartych przecenia δh_o , wymaga korekty błędu uwarstwienia. 2.4.c. Zasadnicze znaczenie pionowego ustawienia. 2.5.a. Możliwy do zastosowania jedynie dla ściśliwych gruntów o $k < 1$. 2.5.b. Niepewna interpretacja.
3. W terenie pionowe efektywne naprężenie σ'_p	3.1. Testy PL i SPL	3.1.a. Ograniczone doświadczenie w ocenie σ'_p . 3.1.b. Możliwe zastosowanie, ograniczone do względnie jednorodnych bezkoezyjnych osadów na małych głębokościach w których testy są wykonywane w warunkach pełnego zdrenowania. 3.1.c. Dla SPL wpływ kształtu płytki oraz zakłóceń powstałych podczas jej ustawiania na związek obciążenie-osiadanie nie jest dobrze wyjaśniony. 3.2.a. $U_{max} - U_o/q_c - \sigma'_v_o$ może być skorelowana z OCR, w jednorodnych osadach spoistych odzwierciedla zmiany OCR. 3.2.b. Możliwe zastosowanie ograniczone do osadów spoistych, niezbędne dalsze potwierdzenie laboratoryjne i terenowe.
4. Charakterystyki deformacji	4.1. PL i SPL 4.2. Testy SBP 4.3. DMT 4.4. CPT 4.5. Pomiar szybkości fali ścinania	4.1.a. Zastosowanie ograniczone do małych głębokości. 4.1.b. "Udowodnione" w niespoistych osadach w których można stwierdzić przeciętny zdrenowany moduł Younga E, na głębokości oddziaływania płytki. 4.1.c. W gruntach spoistych, pomimo niepewności co do warunków zdrenowania, zakłada się, że daje przeciętny niezdrnowany moduł Younga E. 4.1.d. Ponieważ E otrzymujemy z pomiarów przemieszczeń pod wpływem obciążenia niezbędne jest założenie aprioryczne modułu konstytutywnego gruntu. 4.1.e. Bardzo trudno odnieść E, uzyskane z testów PL i SBL do zachowania się makro elementów gruntu czyli do poziomu naprężeń i odkształceń. 4.2.a. Duże możliwości potencjalne dla bezpośrednich pomiarów modułu ścinania σ_n w kierunku poziomym 4.2.b. σ_n opisujący "elastyczne" zachowania się gruntu może być oceniony z małych cykli odciążenie - obciążenie, których rolą jest minimalizacja zakłóceń gruntu w wyniku wprowadzenia sondy. 4.3.a. Przez korelacje empiryczne daje wartości modułu siecznego w piaskach i iltach.

cd. tabeli 2

Parametr lub właściwość gruntu	Urządzenie, względnie procedura	Uwagi
		<p>4.3.b. Obecnie dostępne korelacje uzyskano głównie dla piasków kwarcowych oraz iłów morskich i aluwialnych, wymagane dalsze badania terenowe i laboratoryjne na szerszym zakresie gruntów.</p> <p>4.4.a. Empiryczne korelacje pomiędzy q_c i E, wątpliwej niezawodności i bez ogólnej wartości z wyjątkiem dla piasku NC.</p> <p>4.4.b. Przydatne jedynie dla kwarcowych niescementowanych piasków w których penetracja ma miejsce jedynie w pełni zdrenowanych warunkach.</p> <p>4.5.a. "Udowodnione" potencjalne możliwości do oceny małych naprężeń^w poziomo uwarstwionych osadach.</p> <p>4.5.b. Wartość G jest obliczona po założeniu dotyczącym konstytutywnego modelu gruntu, ścieżek naprężeń i jednorodności gruntu</p>
5. Przepływ, konsolidacja	<p>5.1. Odwiert</p> <p>5.2. Pompowanie wielkoskalowe</p> <p>5.3. Piezometry</p> <p>5.4. Samowierzący presjometr</p> <p>5.5. Test retencji /Camkometer/</p> <p>5.6. Piezostóżek lub sonda piezometryczna</p> <p>5.7. Powtórna analiza wykonana w skali naturalnej</p>	<p>5.1. Preforowane testy wypływu przy stałym ciśnieniu, interpretacja powyżej poziomu wody skrajnie trudna.</p> <p>5.2. Bardzo niezawodny, lecz bardzo drogi test, wymagana dokładna instalacja studni oraz pomiary zagłębiania przy pomocy piezometrów.</p> <p>5.3. Preferowane są stałe testy ciśnienia z małym, U' aby uniknąć dziurawienia, parametry z testów wypływu odpowiednie do warunków OC; testy wypływu właściwe dla warunków NC.</p> <p>5.4. Wymagane ostrożne instalowanie; możliwe jedynie badanie odpływu, stąd wyprowadzone parametry są odpowiednie dla warunków OC.</p> <p>5.5. Wymagane ostrożne instalowanie; trudności interpretacyjne w wyniku nie monotonicznych zmian naprężeń efektywnych.</p> <p>5.6. Duże oszczędności i powtarzalność; wymagana duża staranność przy wykonywaniu badań i interpretacji pomiarów terenowych.</p> <p>5.7. Niepewność związana z początkowym nadmiernym ciśnieniem porowym lub z końcowym osiadaaniem konsolidacji, wymagają ostrożnej analizy danych eksperymentalnych.</p>

Symbole:

- CPTU - quasi-statyczne sondowanie gruntu z pomiarem ciśnienia porowego,
 CPT - quasi-statyczne sondowanie bez pomiaru ciśnienia porowego,
 DMT - dialatometr Marchettiego,
 ISB - aparat typu Iowa "stepped blade",
 SBP - presjometr typu "self boring",
 PL - próbne obciążenie płytą.

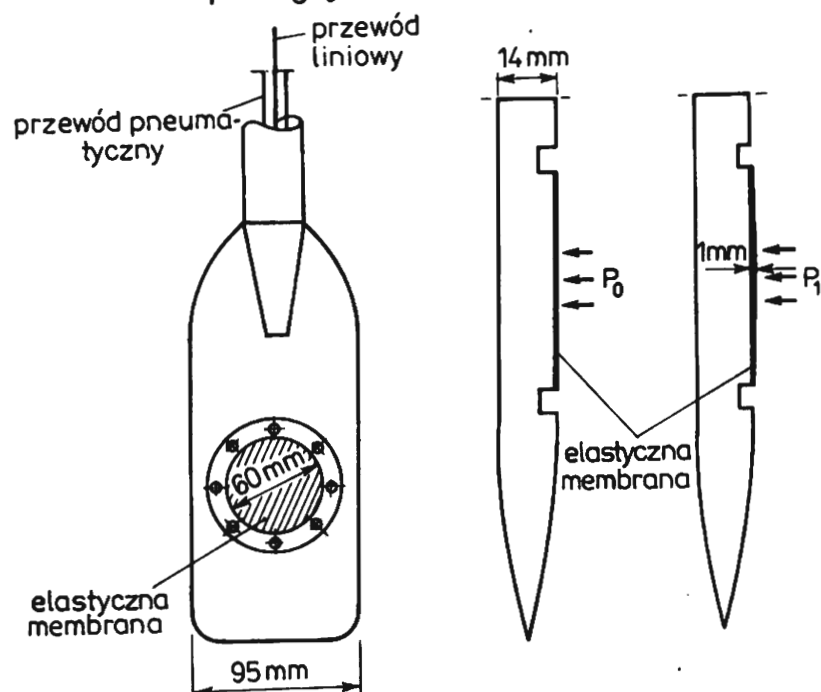
SPL - próbne obciążenie płytą talerzową,
 σ_{ho} i σ'_{ho} - odpowiednio poziome całkowite i efektywne naprężenie w warunkach in-situ,
 σ'_{vo} - efektywne naprężenie pionowe.

W tabeli 2 można zauważyć, że trzy urządzenia i jednocześnie trzy techniki pomiarowe stanowią obecnie istotny element w badaniu właściwości podłoża w warunkach in situ. Są to badania przy pomocy sond statycznych, badania dilatometrem Marchettiego i badania zmodyfikowanym presjometrem. Metodzie statycznego sondowania poświęcono głównie niniejszy artykuł, natomiast poniżej podaje się kilka uwag odnośnie konstrukcji i techniki badania dilatometrem i zmodyfikowanym presjometrem.

Dilatometr Marchettiego został po raz pierwszy wykorzystany we Włoszech w 1970 r. Przyrząd ten wyróżnia się prostą konstrukcją, na którą składa się niewielkiej grubości ostrze, z elastyczną stalową membraną /rys. 1/. W czasie badania dilatometr jest wciskany w podłoże z prędkością w zakresie od 1 do 2 cm/sec. Po każdym 10 do 20 cm penetracja jest zatrzymywana. W czasie doświadczenia wykonuje się dwa odczyty [2]:

- pierwszy, w którym dokonuje się pomiaru ciśnienia wewnętrznego, niezbędnego do wstępne-
 go napięcia membrany /rys. 1 ciśnienie p_0 /,

- drugi, który wyznacza wartość ciśnienia p_1 , niezbędnego do rozprężenia membrany w czę-
 ści centralnej na głębokość 1 mm.

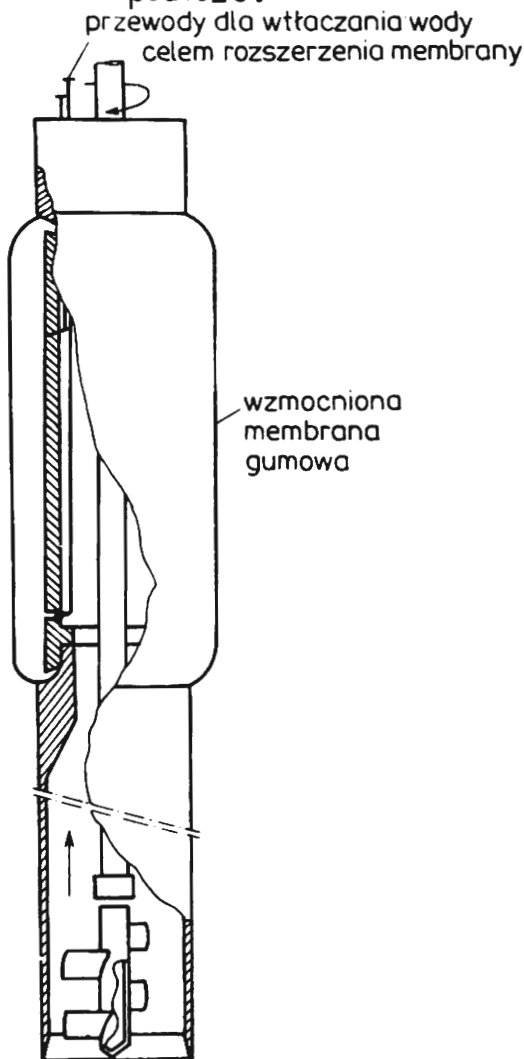


Rys. 1. Schemat dilatometru Marchettiego

Liczne badania prowadzone w wielu ośrodkach pozwoliły ustalić wartości współczynników korekcyjnych do wymienionych wyżej odczytów. Generalnie jednak, wyznaczenie wskaźnika materiałowego J_D oraz wskaźnika naprężeń poziomych K_D pozwala na skonstruowanie zależności empirycznych, niezbędnych do oceny właściwości podłoża. Wymienione wyżej wskaźniki wyznaczają się z następujących zależności:

wskaźnik materiałowy	$J_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0}$	/1/
wskaźnik naprężeń poziomych oraz moduł dilatometryczny	$K_D = \frac{p_0 - u_0}{v_0}$	/2/
	$E_D = 38.2 / p_1 - p_0 /$	/3/

gdzie: u_0 - wartość ciśnienia porowego w podłożu, σ'_{v_0} - efektywne naprężenie pionowe w podłożu.

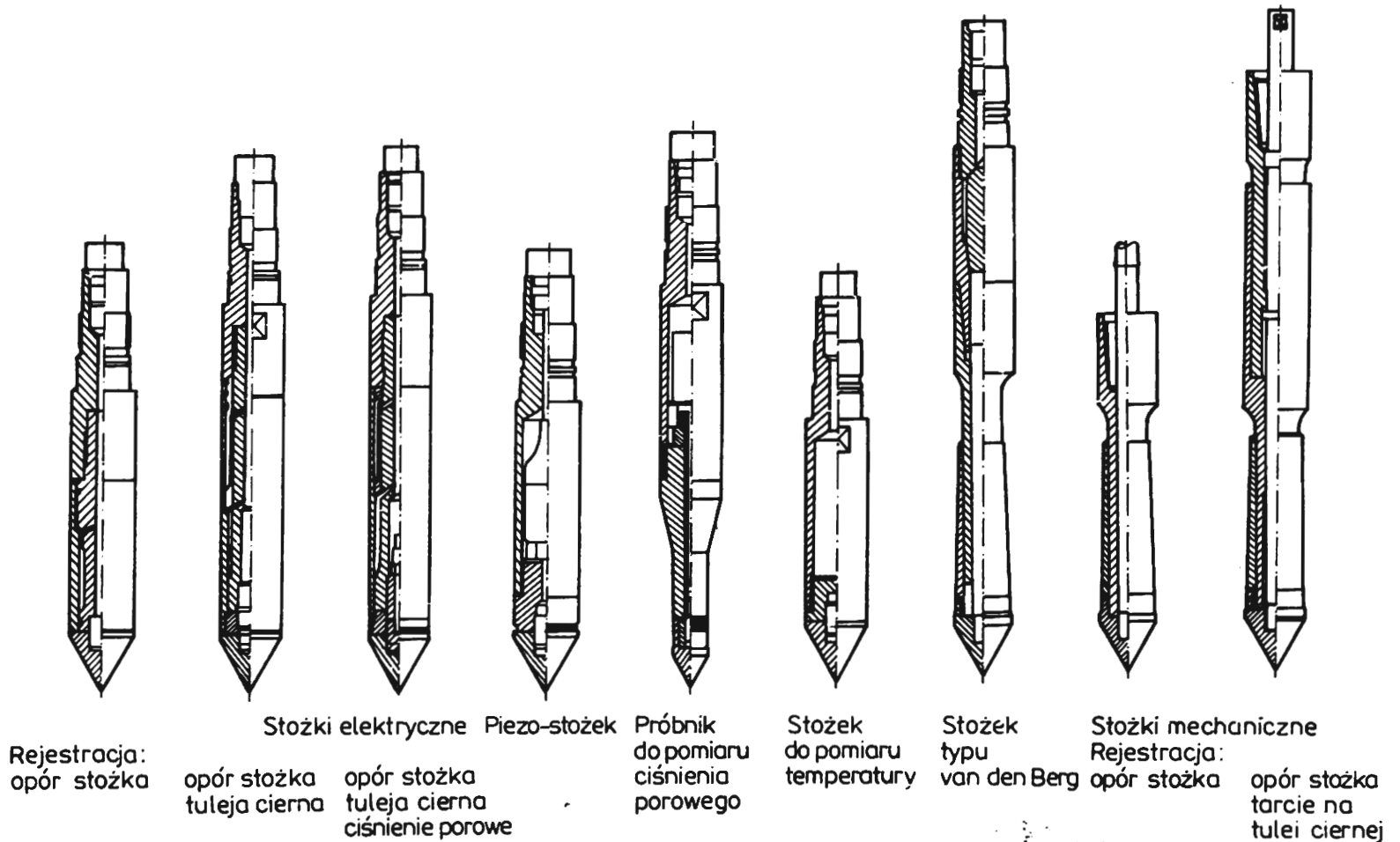


Rys. 2. Schemat presjometru typu PAFSOR

Obszerne badania prowadzone w wielu krajach przyczyniły się do skonstruowania związków empirycznych, które pozwalają szacować wartości poziomych efektywnych naprężeń pierwotnych w podłożu przy wykorzystaniu tego typu presjometru.

Trzecim, istotnym przyrządem, który stanowi nowoczesny instrument do badania podłoża jest sonda statyczna, a szczególnie sonda typu "piezo-cone", która umożliwia pomiar ciśnienia porowego w podłożu. Badanie tym urządzeniem polega na pomiarze oporu stożka, względnie tarcia na tulei ciernej podczas quasi-statycznego wciskania tego zestawu w podłoże. Na rys. 3. przedstawiono typowe końcówki sond statycznych, natomiast na rys. 4 pokazano sondę statyczną najnowszej generacji firmy van den Berg z Holandii.

Drugim nowoczesnym przyrządem, który pozwala ocenić wartości poziomych naprężeń w podłożu jest presjometr typu "self boring". Urządzenie to eliminuje w znacznym stopniu zniszczenie naturalnej struktury gruntu podczas wiercenia. Aktualnie najpowszechniej stosowanymi wersjami self-boring presjometru są wersje francuska PAFSOR /Baquelin [2] angielska CAMKOMETER /Worth i Hughes [3]/. Presjometr PAFSOR /rys. 2/ posiada długość 215 cm i średnicę 13,2 cm. Część przyrządu, która podlega rozprężaniu jest długości 52,8 cm. W czasie doświadczenia dokonuje się następujących pomiarów; ciśnienia porowego, ciśnienia w komorze aparatu "p" oraz odpowiedniego odkształcenia /obrotowo-symetrycznego/ ϵ_0 lub zmian objętości rozprężanej komory.



Rys. 3. Typowe końcówki sond statycznych

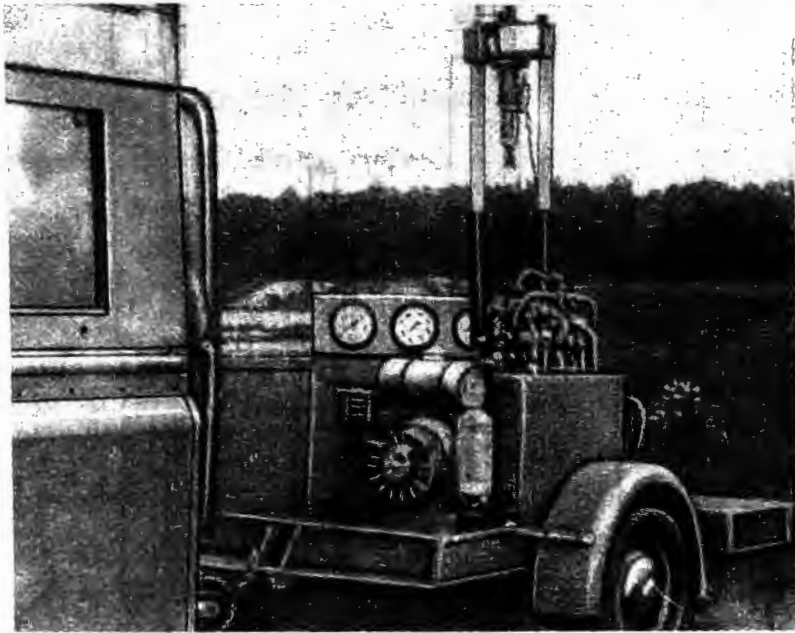
Sonda statyczna posiada również pewne ograniczenia w porównaniu z self-boring presjometrem i dilatometrem, jest jednak urządzeniem, które zaczyna być wykorzystywane w Polsce. Z tego powodu poniżej podaje się bardziej obszernie informacje na temat wykorzystania sond statycznych do oceny właściwości podłoża.

PROGNOZOWANIE PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH I BUDOWY PODŁOŻA NA PODSTAWIE ZMIAN OPORU STOŻKA W METODZIE STATYCZNEGO SONDOWANIA

Metoda statycznego sondowania, jak przedstawiono w tab. 1, umożliwia ocenę stratygraficzną podłoża, typ i rodzaj warstw gruntów, jednorodność, ciągłość, przepuszczalność i wytrzymałość gruntów znajdujących się na drodze sondowania. Metoda ta może być także wykorzystana do kontroli wymienionej warstwy słabego gruntu w podłożu, kontroli stanu zagęszczenia wykonanej poduszki żwirowej oraz wyselekcjonowania występujących w podłożu nasypów i osuwisk.

W badaniu sondą statyczną uzyskuje się dwie charakterystyki; krzywą penetracji /rys. 5/ i krzywą zmian tarcia na tulei czarnej "f_s" z głębokością. Dodatkowym wskaźnikiem w tym badaniu jest bezwymiarowy współczynnik tarcia R_f, który określa proporcję pomiędzy oporem stożka q_c i tarcie na tulei czarnej. Teoretyczna interpretacja charakterystyk sondowania sprowadza się do interpretacji dwóch przypadków:

- sondowania gruntów niespoistych w warunkach odpływu wody wokół stożka,
- sondowania gruntów spoistych w warunkach nadwyżki ciśnienia porowego wokół stożna sondy.

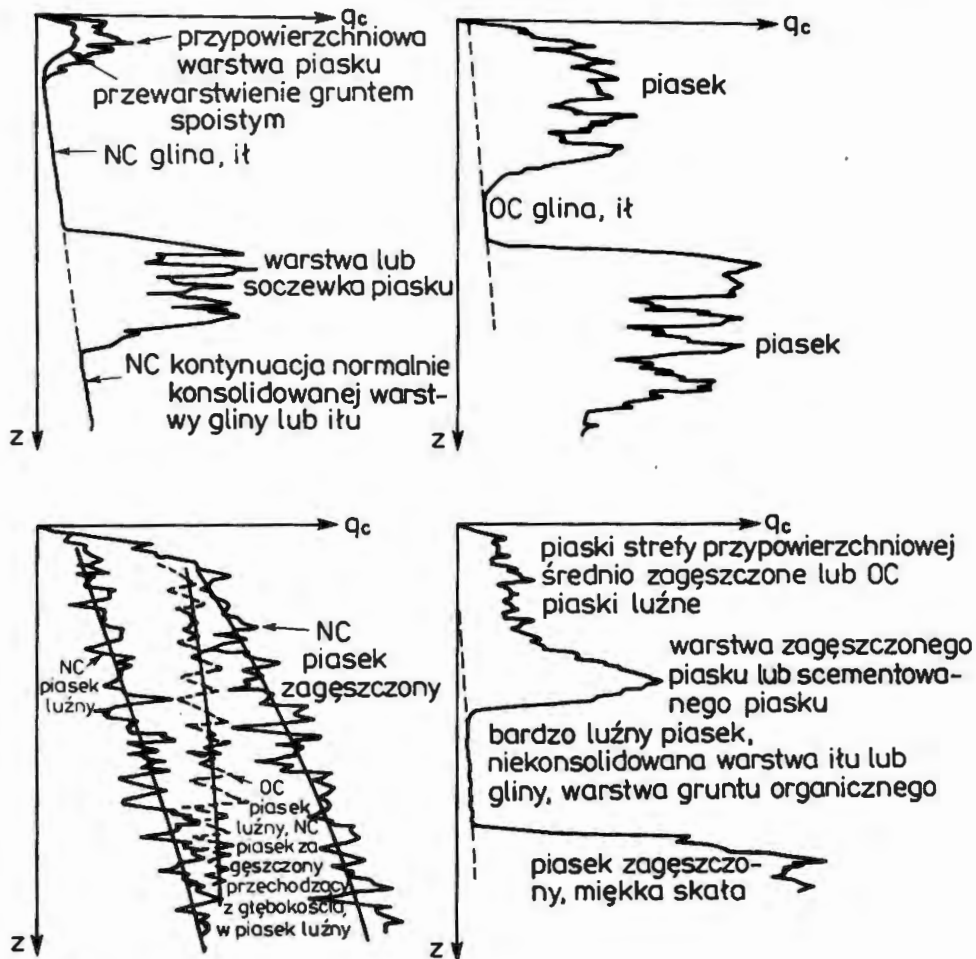


Rys. 4. Sonda statyczna typu Hyson-20 firmy van den Berg

Do właściwej interpretacji charakterystyk sondowania niezbędna jest znajomość następujących warunków początkowych; obciążenia naziomu v_0 /w naprężeniach całkowitych/ oraz początkowego ciśnienia porowego " u_0 ". Wyniki statycznego sondowania mogą być interpretowane w ujęciu jakościowym i ilościowym. Interpretacja jakościowa obejmuje ocenę jednorodności budowy podłoża, miąższość i zasięg występowania warstw, wstępną kwalifikację podłoża do mineralnego lub organicznego oraz warunki konsolidacji.

Na podstawie przebiegu krzywej penetracji

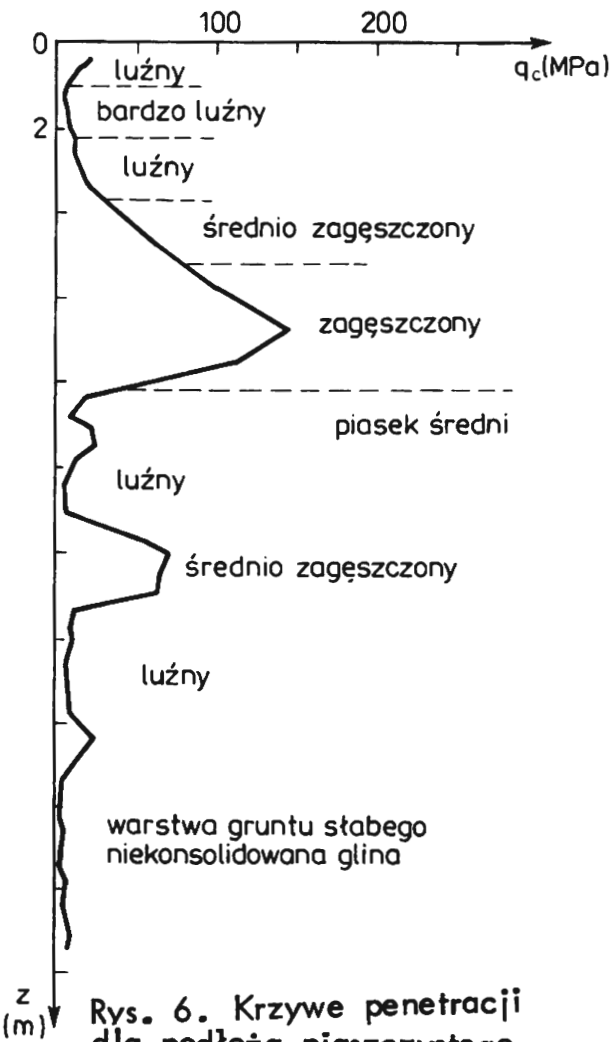
można wnioskować o budowie geologicznej podłoża następująco: gliny i ły /rys. 5a i b/ charakteryzują się niższymi wartościami oporu stożka q_c niż piaski /rys. 5c/. Jednak dla luź-



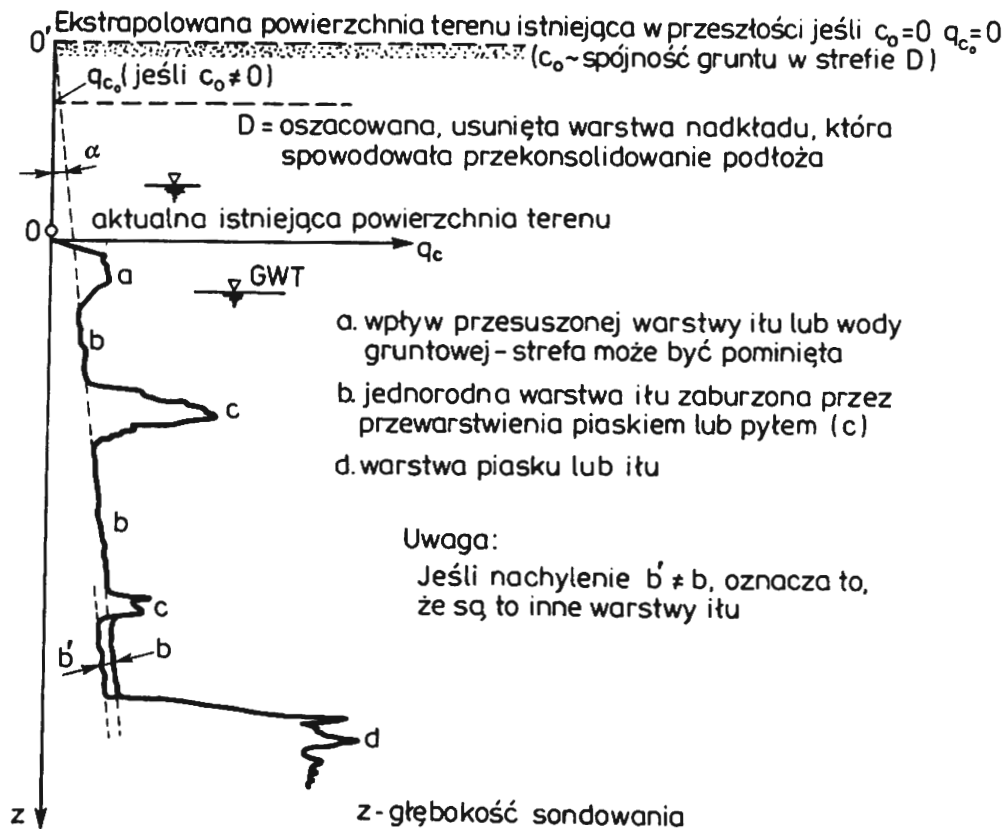
Rys. 5. Krzywe penetracji dla różnych przykładów budowy podłoża

nych piasków i silnie przekonsolidowanych ítów wartości oporu stożka mogą być zbliżone. Krzywa penetracji dla piasków wyróżnia się większą intensywnością "zig-zag" efektów /rys. 5c. Na rys. 6 przedstawiono krzywe penetracji dla podłoża piaszczystego o różnych stopniach zagęszczenia, natomiast na rys. 7 zilustrowano interpretację oceny stopnia przekonsolidowania jednorodnej warstwy ítu.

W interpretacji ilościowej, istotny element dla oceny danych wyjściowych podłoża metodą statycznego sondowania odgrywa oszacowanie rodzaju gruntów występujących w podłożu. Do identyfikacji rodzaju gruntów z grupy osadów aluwialnych można skorzystać z diagramu Schmertmanna 5 /rys. 8/. Bardziej uniwersalny jest diagram Begemanna /rys. 9/, który został sporządzony na podstawie zmian oporów stożka mechanicznego i tarcia na tulei ciernej.

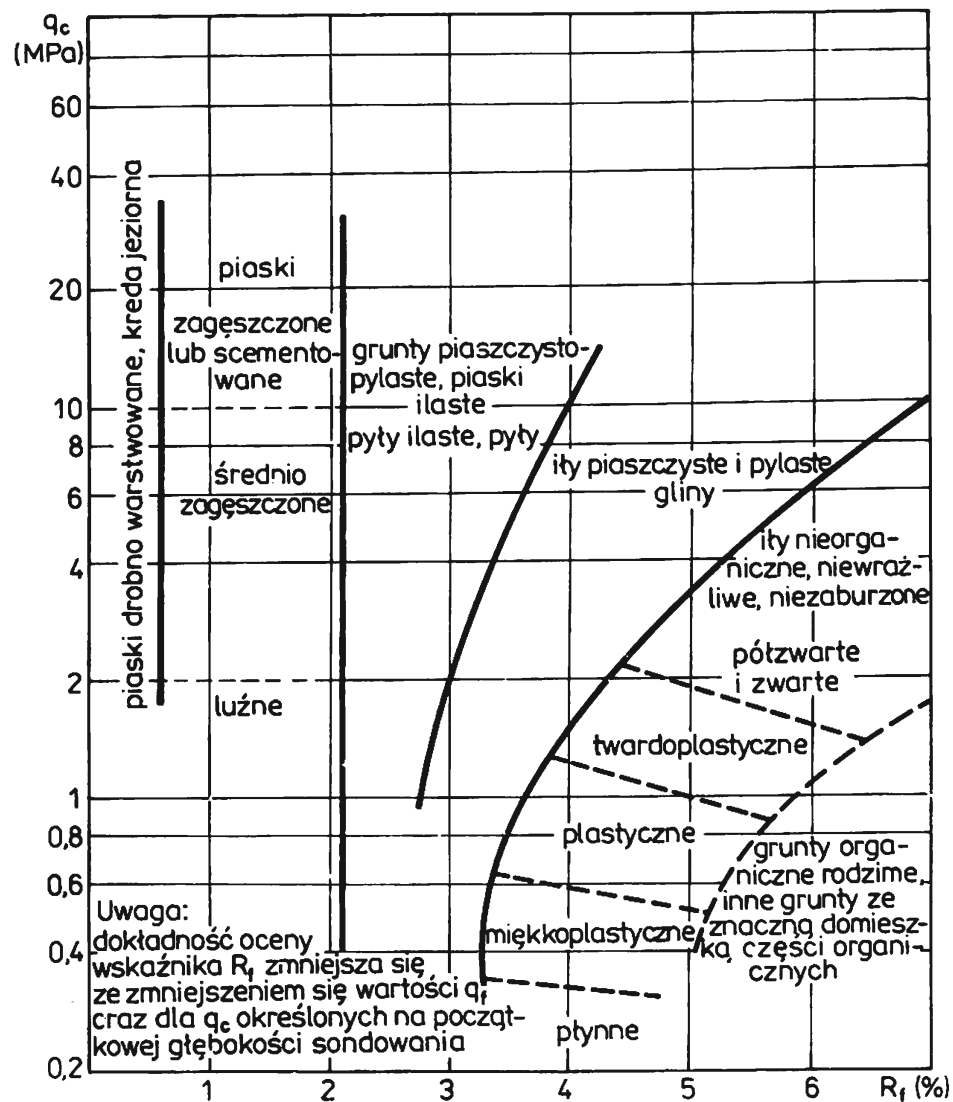


Rys. 6. Krzywe penetracji dla podłoża piaszczystego o różnych stopniach zagęszczenia

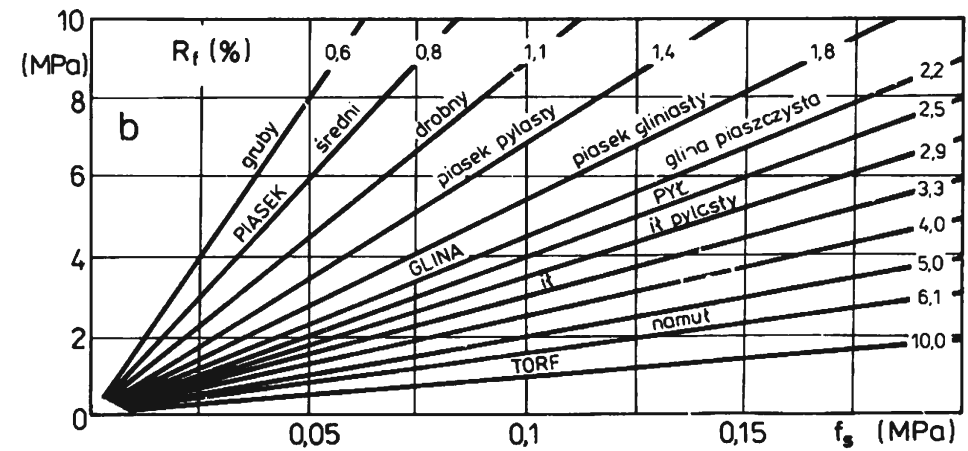
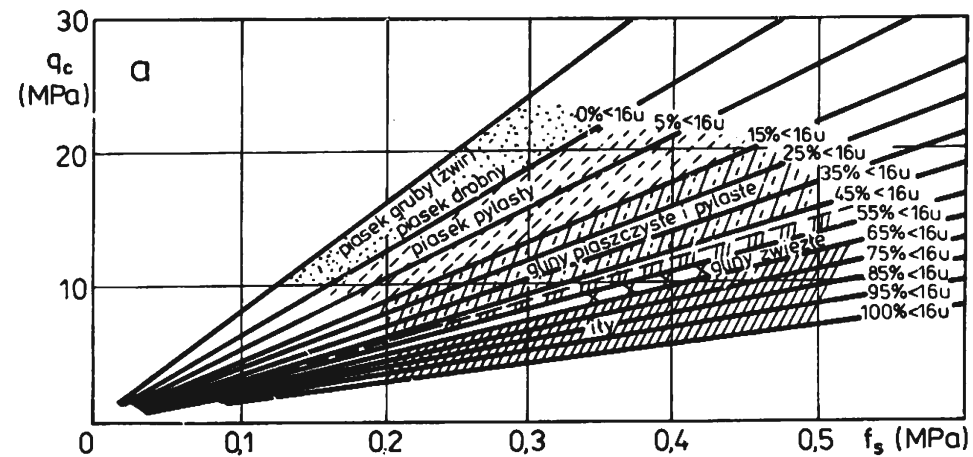


Rys. 7. Przykład oceny stopnia przekonsolidowania jednorodnej warstwy ítu na podstawie zmian oporu stożka

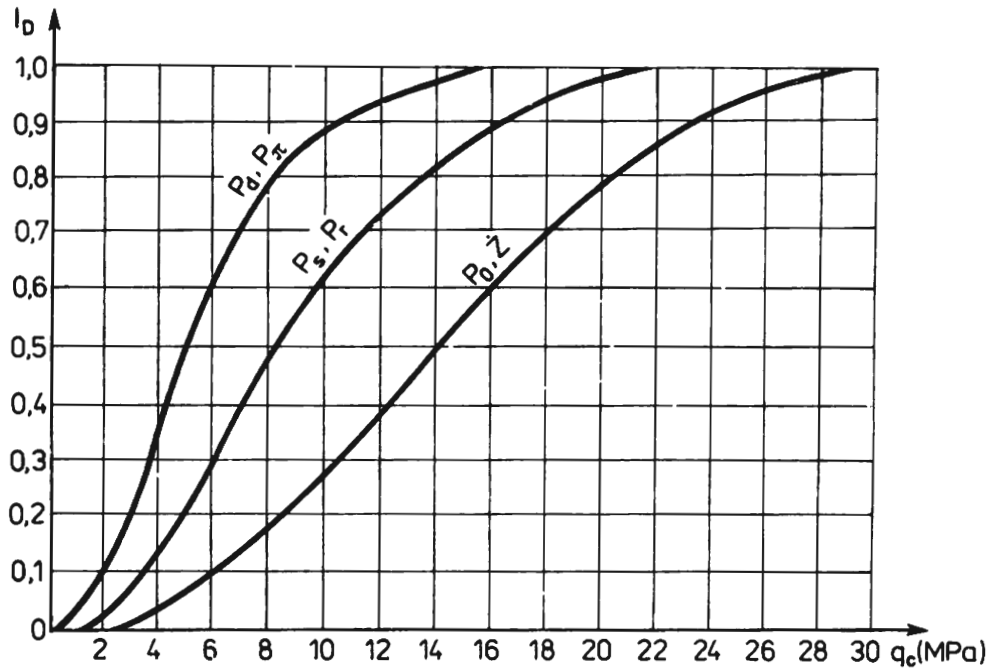
Pomiar oporu stożka może służyć także do identyfikacji cech wskaźnikowych gruntów niespoistych. Oceny te należy uznać jako orientacyjne ze względu na to, że tylko wpływ niektórych czynników, które decydują o zmianach oporu stożka, jest obecnie znany /Młynarek 6 / Na rys. 10 przedstawiono diagram dla oceny stopnia zagęszczenia piasków według wytycznych Geoprojektu 7, natomiast na rys. 11a związek pomiędzy oporem stożka i stopniem zagęszczenia dla normalnie konsolidowanych piasków według Schmertmanna [5].



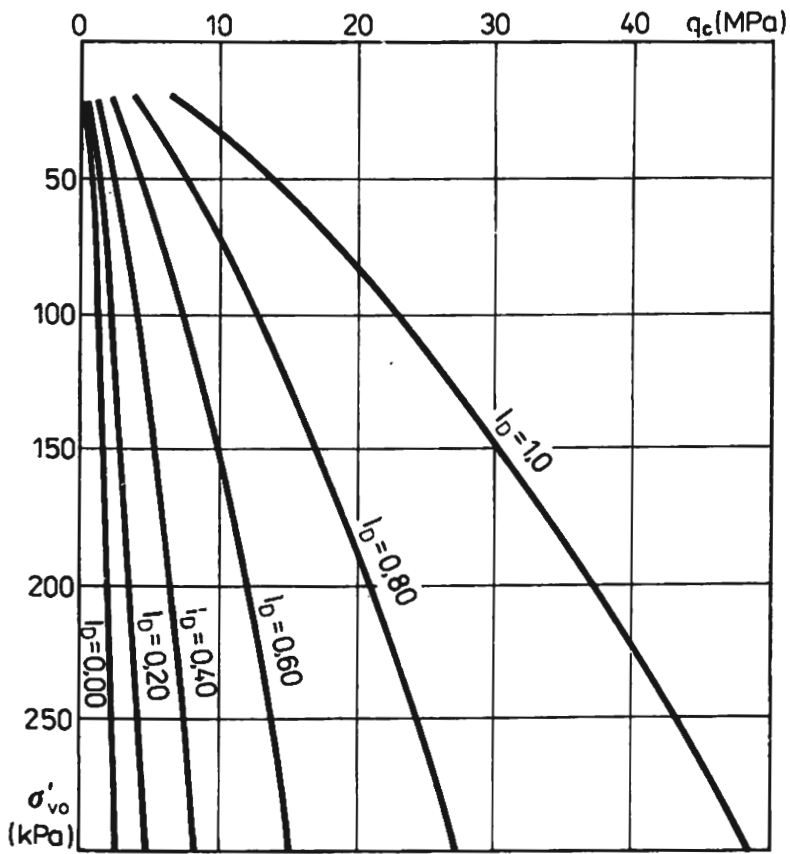
Rys. 8



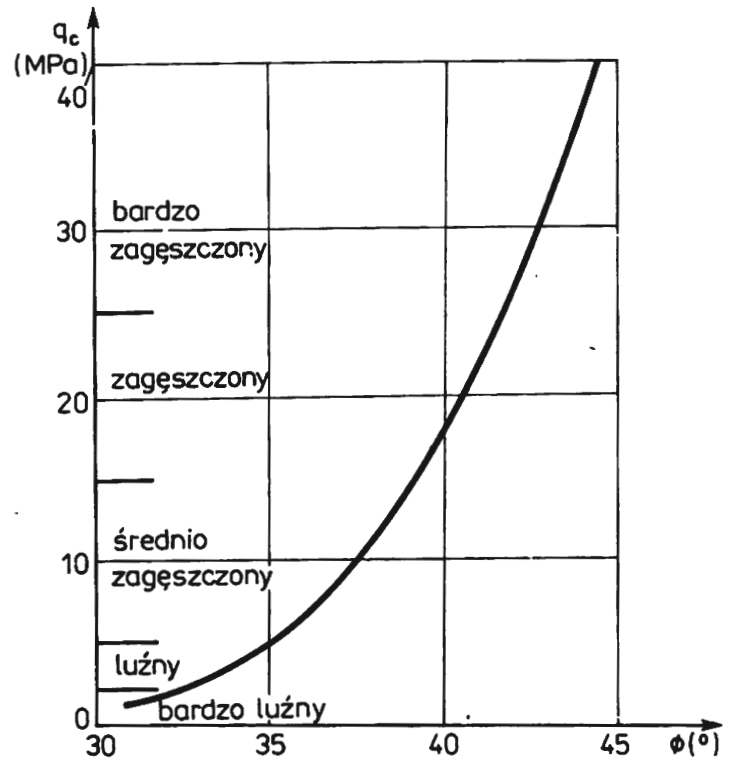
Rys. 9



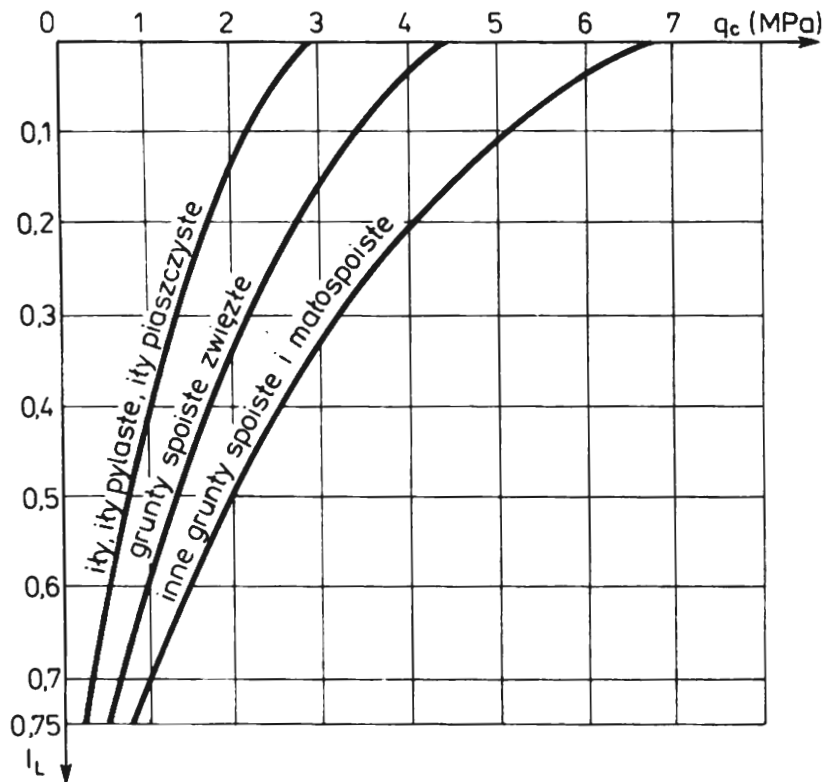
Rys. 10



Rys. 11a



Rys. 11b. Zależność pomiędzy oporem stożka i kątem tarcia wewnętrznego



Rys. 12. Zależność pomiędzy oporem i stopniem plastyczności /według wytycznych Geo projektu - badania stożkiem mechanicznym/

Pomimo wielu ograniczeń znajomość oporu stożka może być wykorzystana do wyznaczenia szacunkowych wartości stopnia plastyczności. Tego typu związek przedstawiono na rys. 12.

Istotne znaczenie posiada prognozowanie parametrów wytrzymałościowych gruntów z podłoża na podstawie krzywej penetracji. Prognozowanie to obejmuje, jak wcześniej wspomniano, ocenę parametrów ścinania i modułów odkształcenia. Parametry ścinania mogą być określone w tzw. warunkach niedrenowanych i w warunkach odpływu. Niedrenowana wytrzymałość gruntów na ścinanie dotyczy gruntów spoistych i występuje w tych gruntach ze względu na znaczną prędkość wciśnięcia stożka. Badanie piezo-stożkiem pozwala jednak na wyrażenie wytrzymałości na ścinanie w naprężeniach efektywnych. Do opisu związku pomiędzy oporem stożka a wytrzymałością na ścinanie wykorzystuje się niektóre propozycje rozwiązań teoretycznych lub związki empiryczne. Obszerne omówienie tego zagadnienia można znaleźć w pracach Jamiolkowskiego [1], Lunne [8], Młynarka i Sanglerata [9].

Związek pomiędzy niedrenowaną wytrzymałością na ścinanie i oporem stożka określa następujące równanie:

$$q_c = N_c S_u + \sigma_o \quad /4/$$

gdzie: N_c - współczynnik nośności lub tzw. współczynnik stożka,

S_u - niedrenowana wytrzymałość na ścinanie,

σ_o - naprężenie pierwotne, wyrażone w naprężeniach całkowitych.

Niedrenowana wytrzymałość na ścinanie opisana jest poprzez wartość spójności c_u z badania trójosiowego ściskania lub z badania sondą obrotową. Naprężenie σ_o w zależności od teorii jest interpretowane jako naprężenie pionowe σ_{vo} , poziome σ_{ho} lub oktaedryczne σ_{oc} . Z równania /4/ można wprost wyznaczyć wartość spójności, a mianowicie:

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_c} \quad /5/$$

Z badań Młynarka i Saglerata [9] i Młynarka i Kaszuba [10] wynika, że współczynnik N_c dla iltów plicieńskich równa się 23, dla glin pylastych 40. Wytyczne Geoprojektu podają następujące wartości współczynnika N_c

$$10 \leq N_c \leq 18 \quad \text{dla gruntów normalnie konsolidowanych,}$$

$$15 \leq N_c \leq 25 \quad \text{dla gruntów przekonsolidowanych.}$$

Badania Mireckiego [11] i Młynarka [12] wykazały, że dla gytii współczynnik N_c można przyjąć na poziomie 19,0, natomiast dla średnio rozłożonego torfu turzycowo-mszystego 7,0.

Do interpretacji parametrów ścinania w naprężeniach efektywnych wykorzystuje się kilka teorii. Największe zainteresowanie budzi teoria Senneseta i Janbu [13]. Teoria ta jest wykorzystywana do oceny drenowanej wytrzymałości na ścinanie. Zainteresowanych tym problemem odsyła się do wspomnianej wyżej pracy Senneseta i Janbu, względnie do opracowania znajdującego się w Zakładzie Geotechniki Akademii Rolniczej w Poznaniu /Młynarek [14]/.

Do oceny charakterystyk deformacji podłoża wykorzystuje się empiryczne zależności, gdyż do chwili obecnej nie sformułowano analitycznego związku pomiędzy oporem stożka a modułami deformacji. Dla gruntów niespoistych związek pomiędzy modułem odkształcenia edometrycznego a oporem stożka określa równanie /Sanglerat [15]/.

$$M_o = \lambda_o q_c \quad /6/$$

gdzie: λ_o - współczynnik proporcjonalności, M_o edometryczny moduł odkształcenia.

Współczynnik λ_o jest uzależniony od stopnia przekonsolidowania. Lunne [16] podaje, że dla piasków normalnie konsolidowanych wartość współczynnika λ_o wynosi 3, natomiast dla przekonsolidowanych może zmieniać się w przedziale od 3 do 30.

Charakterystyki deformacji dla gruntów spoistych wyznacza się według dwóch koncepcji, a mianowicie, na podstawie związku pomiędzy modułem ściśliwości a niedrenowaną wytrzymałością na ścinanie lub na podstawie empirycznej zależności

$$M_o = \frac{1}{m_v} \quad /7/$$

$$m_v = \frac{1}{\alpha q_c} \quad /8/$$

Moduł M_o odpowiada wartości edometrycznego modułu odkształcenia dla zakresu obciążeń

$$\Delta \sigma_z = \sigma_{vo} + 100 \text{ /kPa/} \quad /9/$$

gdzie: $\Delta \sigma_z$ - zakres analizowanych obciążeń w podłożu. Wartości współczynnika α' są zależne od rodzaju gruntu i mieszczą się w przedziale od 1.5 do 6. Szczegółowe wartości współczynnika znajdują się w pracy Sanglerata [15].

ZAKOŃCZENIE

Przedstawiona ocena możliwości wykorzystania badań laboratoryjnych, a szczególnie terenowych do wnioskowania o doborze fundamentu, głębokości jego posadowienia, względnie ustalenia kryteriów do poprawnego zaprojektowania odwodnienia nie wyczerpuje wszystkich możliwości interpretacyjnych charakterystyk, uzyskanych z doświadczenia in situ. Na przykład wspomniana krzywa penetracji może stanowić podstawę do obliczenia nośności i długości pali fundamentowych, wyznaczenia spodziewanych osiadań budowli lub stopnia przekonsolidowania podłoża. Z drugiej jednak strony, ograniczenia interpretacyjne badań terenowych sugerują, że w przypadku większych zamierzeń inwestycyjnych badania terenowe muszą być uzupełnione racjonalnym zestawem badań laboratoryjnych.

LITERATURA

1. Jamiolkowski M., Ladd C.C., Germaine I., Lancellotta R.: State of art report. New developments in field and laboratory testing in soils. XI ICSMFE, San Francisco, 1985.
2. Marchetti S.: A new in situ test for the measurement of horizontal soil deformability. Proceedings ASCE Speciality Conference on in-situ Measurement of Soil Properties, Raleigh vol. 1975.
3. Baquelin F., Jezequel J. F., Le Mee H., Le Mehaute A.: Expansion of cylindrical probes in cohesive soils. ISMFD, ASCE, SM 11, 1972.
4. Worth C.P., Hughes J.M.: An instrument for in situ measurement of the properties of soft clays, Proc. VII ICSMFE, Moscow, vol. 1, 2, 1973.
5. Schmertmann J.H.: Cone penetration test. Performance and design US, Department of Transportation, 1978.
6. Młynarek Z.: Czynniki wpływające na opór stożka podczas statycznego sondowania gruntów spoiстых. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy nr 83, 1978.

7. Wytyczne wykonywania badań sondą wciskaną i interpretacji wyników badań. Geoprojekt, Warszawa, 1979.
8. Lunne T., Christofferson H. P., Tjelta T.: Engineering use of piezocone data in North Sea clays. NGI report, 1984.
9. Młynarek Z., Sanglerat G.: Relationship between shear parameters and cone resistance for some cohesive soils. Symposium In situ Testing, Paris, vol. 2, 1983.
10. Młynarek Z., Kaszub M.: Wykorzystanie sondy statycznej RSH 12 do oceny właściwości niektórych gruntów spoistych Niziny Wielkopolskiej, VII KKMGF, Poznań, 1984.
11. Mirecki J.: Interpretacja wyników sondowań statycznych w torfach, Dysertacja, SGGWAR Warszawa, 1983.
12. Młynarek Z., Niedzielski A., Tschuschke W.: Badania związków między parametrami oznaczonymi przy zastosowaniu laboratoryjnej i terenowej sondy statycznej, a nośnością graniczną gruntów słabonośnych. Zakład Geotechniki - maszynopisy, 1984.
13. Senneset K., Janbu N.: Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests. ASTM Symposium, San Diego, 1984.
14. Młynarek Z.: Badania właściwości podłoża budowlanego metodą statycznego sondowania. Praca przygotowana do druku, 1985.
15. Sanglerat G.: The static-dynamic penetrometer and its uses /rękopis/, 1977.
16. Lunne T., Kleven A.: Role of CPT in North Sea Foundation Engineering, NGI Publication. No 139, 1982.

Zbigniew Młynarek

MODERN METHODS OF SUBSOIL INVESTIGATIONS
TO DETERMINE INITIAL DATA FOR DESIGNING DRAINAGE
AND FOUNDATION OF CONSTRUCTION

Summary

The paper presents contemporary means of estimating geotechnical parameters of soils indispensable for designing drainage and foundation for construction areas. The good and weak points of in situ and laboratory examinations have been discussed. The static sounding method has been described in greater detail. The methods of qualitative and quantitative interpretation of the penetration curve have been illustrated with examples and the concepts of identification of shear parameters and deformation modules from cone resistance have been discussed.

Збигнев Млынарек

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВАНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРОЕКТОВ ОСУШЕНИЙ КОТЛОВАНОВ
И ВОЗВЕДЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Р е з ю м е

В статье представлены современные возможности оценки тех физико-механических свойств грунтов, которые необходимы при проектировании оснований и осушении строительных площадок. Рассмотрены достоинства и недостатки натурных и лабораторных исследований. Подробно представлен метод статического зондирования. На примерах продемонстрировано способы качественной и количественной интерпретации кривой пенетрации; рассмотрены идеи идентификации параметров сдвига и модулей деформации на основе сопротивления конуса статического зонда.

Збигнев Млынарек

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВАНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРОЕКТОВ ОСУШЕНИЙ КОТЛОВАНОВ
И ВОЗВЕДЕНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Р е з ю м е

В статье представлены современные возможности оценки тех физико-механических свойств грунтов, которые необходимы при проектировании оснований и осушении строительных площадок. Рассмотрены достоинства и недостатки натурных и лабораторных исследований. Подробно представлен метод статического зондирования. На примерах продемонстрировано способы качественной и количественной интерпретации кривой пенетрации; рассмотрены идеи идентификации параметров сдвига и модулей деформации на основе сопротивления конуса статического зонда.