

BŁĘDY W BADANIACH PRESJOMETRYCZNYCH

UKD 624.131.382.088

Badanie presjometryczne jest rodzajem próbnego obciążenia gruntu w warunkach *in situ*, wykonywanego w otworze wiertniczym za pomocą sondy o kształcie cylindrycznym, rozszerzanej radialnie. Sonda połączona jest przewodem z urządzeniem pomiarowym (presjometrem) pozostającym na powierzchni terenu. Rozszerzanie sondy uzyskuje się poprzez podawanie ciśnienia wzrastającego równymi stopniami i utrzymywanego przez określony czas. Zmiany objętości sondy mierzone są po każdym stopniu ciśnienia. Badanie pozwala więc uzyskać zależność naprężenie – odkształcenie gruntu, przy założeniu deformacji dwuwymiarowej, kołowo-symetrycznej (3). Podstawowymi parametrami, które otrzymuje się interpretując wyniki badania i stosując odpowiednie wzory (1, 3, 4, 6) są: moduł presjometryczny gruntu E_p oraz presjometryczna nośność graniczna p_1 .

Przygotowanie i wykonanie badania w terenie jest dość złożonym procesem, w związku z czym istnieje poważne niebezpieczeństwo otrzymania wyników obciążonych znacznym błędem. Na prawidłowość uzyskanych wyników wpływać mogą następujące grupy czynników:

- rodzaj i jakość sprzętu,
- jakość otworu wiertniczego,
- sposób przygotowania i przeprowadzenia badania,
- metody interpretacji.

Szczegółowy opis zasad konserwacji, przechowywania i transportu sprzętu, a także przygotowania go do badań w terenie znaleźć można w każdym podręczniku czy instrukcji (1, 3, 5, 6), nie ma więc potrzeby ich powtarzać. Najważniejszą zasadą jest zapewnienie pełnej szczelności pracującego w warunkach wysokich ciśnień układu presjometr – sonda. Sprawdzenia szczelności dokonuje się prostą metodą poprzez podawanie wysokich (od 0,4 MPa) ciśnień do sondy umieszczonej w grubościennej rurze atestacyjnej. Ten sam test może służyć do ustalenia poprawki związanej z odkształcalnością własną („pasożytnicza”) układu, jednak ma ona znaczenie tylko jeśli przewiduje się badanie bardzo mocnych utworów, tj. praktycznie skał. Wyższa od dopuszczalnej (3) wielkość poprawki nie zawsze oznaczać musi nieszczelność układu – częściej powodem jest obecność pęcherzyków gazu w wodzie wypełniającej obwód pomiarowy, którą to nieprawidłowość można łatwo usunąć. Należy także pamiętać o okresowym sprawdzeniu (legalizacji) manometrów.

Podstawową czynnością podczas przygotowania sprzętu do badań, a także po każdej awarii sondy jest jej cechowanie celem ustalenia oporu własnego osłon gumowych. Częstym błędem jest notowanie wyników już pierwszego próbnego rozszerzania sondy, gdy tymczasem względnie powtarzalne wartości oporu własnego wykazują osłony wstępnie kilkakrotnie (4–5 razy) rozszerzane (1).

Jeżeli błędy związane z szeroko rozumianą jakością sprzętu i otworu, przebiegiem badania i metodami interpretacji można nazwać usuwalnymi, to błędy nieusuwalne zależą od możliwości do uzyskania precyzji pomiaru, a więc dokładności manometrów określanej przez producenta z reguły w granicach $\pm 1\%$ oraz powtarzalności

oporu własnego sondy szacowanej na $\pm 20\%$. Za dopuszczalny błąd badania przyjmuje się 10% (1). W związku z tym oprzyrządowanie musi być dostosowane do spodziewanej wytrzymałości gruntu.

Otwór wiertniczy powinien spełniać kilka podstawowych warunków, a mianowicie:

- średnica może tylko nieznacznie (do 6 mm wg (3), do 20% wg (2)) przekraczać średnicę sondy;
- ścianki otworu powinny pozostać nienaruszone (uwzględniając przemieszczenia związane z poziomym naprężeniem spoczynkowym w gruncie p_0);

– wewnątrz otworu nie może zawierać nieusuniętego urobku, tj. powinno być czyste lub wypełnione płuczką.

Spełnienie tych wymagań związane jest z zastosowaniem (lub adaptacją) metody i techniki wiercenia odpowiedniej dla danych warunków gruntowo-wodnych (1, 2, 3, 5, 6), niemniej osiągnięcie doskonałej jakości otworu jest trudne.

Sytuacja ta skłania producentów do poszukiwania nowych rozwiązań technicznych i do zalecania stosowania poszczególnych technik w różnych warunkach (1, 2, 3, 5). Nowe generacje sprzętu z „samozagłębiającym się” presjometrem typu PAF¹ na czele są niezwykle kosztowne i tylko nieliczne organizacje mogą pozwolić sobie na ich zakup. Zdaniem autora jednak w większości wypadków zadowalającą jakością otworu można uzyskać stosując klasyczne metody wiertnicze, do których należą wiercenia płuczkowe lub „na sucho” systemem ręcznym i mechanicznym. Wybór metody zależy oczywiście od konkretnych warunków gruntowo-wodnych², jednak równie istotna jest umiejętna technika wiercenia, a więc np. odpowiednia szybkość penetracji i rotacji, częstotliwość oczyszczania otworu, sposób zwiercania przeszkód itd. (6).

Z jakością otworu związany jest też najczęściej niedoceniany problem techniki opuszczania sondy do poziomu badania. Ścianki otworu o prawidłowych wymiarach, lecz zawierającego np. większe fragmenty nie usuniętego urobku mogą zostać zniszczone podczas nieumiejętnego („brutalnego”) opuszczania sondy. W związku z tym, nawet dysponując sprzętem mechanicznym zaleca się opuszczać ją ręcznie, a napotykając opór próbować zagłębiać dalej stosując raczej delikatne udary niż rosnący nacisk. Sondę opuszcza się z zamkniętym obiegiem wody i otwartym pomocniczym (ochronnym) obiegiem gazu. Po umieszczeniu jej na planowanej głębokości otwiera się obieg wody. Obserwacja ruchu słupa wody w wizjerze urządzenia pomiarowego dostarcza wstępnych danych o jakości otworu. W prawidłowo wykonanym otworze powinna opaść nieznacznie. Obniżenie się poziomu wody w granicach 100 cm^3 sygnalizuje, iż otwór jest zbyt mocno rozwiercony, przy

¹ Z francuskiego „le Pressiometre Auto Foreur”

² Do szczególnie trudnych warunków – dla uzyskania otworu odpowiedniej jakości – należą luźne piaski oraz grunty zawierające duże ilości grubych ziarn, jak: żwir, gliny zwalowe z kamieniami i niektóre nasypy, a także pęczniące łą.

spadku ponad 200 cm³ nie można oczekiwać poprawnych wyników badania. Podnoszenie się słupa wody w wizjerze oznacza otwór zbyt ciasny.

Samo badanie presjometryczne powinno spełniać następujące zasadnicze wymogi:

– ilość przyrostów ciśnień do zakończenia badania w granicach 8–14, co wymaga wstępnego ustalenia wielkości jednostkowego przyrostu Δp (zwykle 0,02–0,2 MPa) oraz dostosowania przedziału czasowego Δt (1–3 min.);

– zachowania właściwej (zależnej od głębokości badania i położenia ZWG) różnicy ciśnień pomiędzy obiegiem pomiarowym i ochronnym.

Konsekwencje wykonywania pomiarów w otworach o nieprawidłowej średnicy (a także w trudniejszym przypadku otworu o naruszonych ściankach) oraz nie przestrzegania zasad cechowania i samego badania w sensie wpływu tych czynników na jakość uzyskanych wyników zestawiono w tabeli:

Etap pracy	Przyczyna otrzymania błędnych wyników	Uzyskane wartości są: „-” zaniżone, „+” zawyżone, „?” o problematycznej wartości		Objaśnienia dodatkowe
		E_p	p_l	
1	2	3	4	5
1) przygotowanie otworu	a) otwór o zbyt dużej średnicy	(-)	?	p_l szacowane w przybliżeniu
	b) uszkodzone ścianki otworu	-	?	p_{oM}^3 zawsze wyższe od rzeczywistej wart. p_o
	c) otwór zbyt ciasny	+	?	faza modułu zakłócona wpływem innych czynników, p_{oM} zwykle nieokreślone
2) Cechowanie standardowe	ilość wstępnych rozszerzeń sondy mniejsza od zalecanej (4–5)	-	-	
3) cechowanie na „straty objętości”	nie przeprowadzone	-	-	ważne tylko dla bardzo wysokich wartości modułów, patrz też pkt 4a
4) badanie presjometryczne	a) obecność pęcherzyków gazu w wodzie	-	-	
	b) niewłaściwa różnica ciśnień pomiędzy obiegami gazu i wody	-	-	zbyt duże ciśnienie w obwodzie wody
		+	+	zbyt niskie ciśnienie w obwodzie wody
	ilość stopni ciśnienia	c) zbyt mała	+	+
d) zbyt duża		-	-	

³ p_{oM} – poziome naprężenie spoczynkowe w gruncie określone wg Menarda z badania presjometrycznego.

Jeżeli chodzi o metody interpretacji do poważniejszych problemów należą:

– szacowanie rzeczywistej wartości poziomego ciśnienia spoczynkowego w gruncie p_o , niezbędnej do wyliczenia presjometrycznej nośności granicznej p_l oraz

– ekstrapolacja krzywej presjometrycznej poza zbadany odcinek w celu odczytania wartości p_l (w „luźnych” otworach).

Na rolę tych czynników zwrócono uwagę w rubryce 5 tabeli.

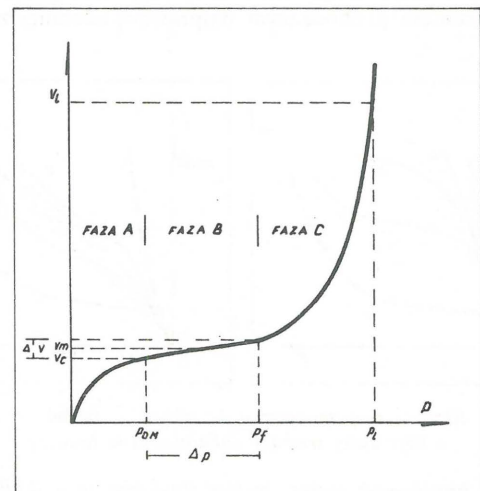
Błędy przedstawione w punktach 2–4 tabeli nie powinny zdarzać się przeciętnie doświadczonym i poważnie traktującym pracę operatorom. Natomiast dysponując jedynie standardowym sprzętem trudno uniknąć, zwłaszcza w bardziej skomplikowanych warunkach gruntowo-wodnych, nieprawidłowości związanych z jakością otworu. Błędy stąd wynikające są stosunkowo dobrze czytelne w kształcie krzywej presjometrycznej. Krzywa presjometryczna, będąca graficznym zapisem badania presjometrycznego (ryc. 1⁴) powinna posiadać:

– fazę B służącą do wyliczenia modułu presjometrycznego (niezbędne dane: Δp , Δv , V_m),

– fazę C, którą umownie kończy punkt V_l , P_l ($V_l = 2V_o + 535$) oznaczający presjometryczną nośność graniczną.

Jeśli weźmiemy pod uwagę, iż skala objętościomierza presjometru sięga 700 cm³, to uwzględniając podany powyżej wzór łatwo wyliczymy, że V_o nie powinno przekroczyć ok. 80 cm³, jeżeli punkt V_l , p_l ma się znaleźć na krzywej uzyskanej z badania. W praktyce wartość V_o zawiera się zwykle w granicach 50–250 cm³. Istnieją metody ekstrapolowania wartości p_l dla $V_l > 700$ cm³ (1, 6), ale oczywiście dokładność szacunku maleje ze wzrostem V_l .

Ogromną rolę w interpretacji wyników „niezbyt udanych” badań odgrywa analiza stosunku E_p/p_l będącego wartością charakterystyczną (w pewnych przedziałach) dla różnych grup gruntów (1, 3, 4, 6).



Ryc. 1. Krzywa presjometryczna, punkty charakterystyczne służące do dalszych obliczeń omówiono w tekście

Fig. 1. Pressiometer curve, characteristic points, used for further calculations, are discussed in the text

⁴ Na rycinie zastosowano klasyczne przyporządkowanie oś x – ciśnienie podawane do sondy, oś y – objętość (sondy); w nowszych opracowaniach (1, 2) spotyka się inne wersje krzywych presjometrycznych.

Kształt krzywej może wskazywać generalnie, że:

- otwór jest zbyt „luźny” (o zbyt dużej średnicy),
- otwór jest zbyt „ciasny” (o zbyt małej średnicy),
- otwór wydaje się posiadać właściwą średnicę, jednak jego ściany są uszkodzone bądź zniszczone,
- „czynnik zakłócający” jest bardziej skomplikowany.

Kształty krzywych związanych ze zbyt dużym otworem pokazano na ryc. 2⁵. Łatwo zauważyć, że początkowy odcinek krzywej (faza A) jest długi w odniesieniu do wielkości V . V_0 przekracza 300 cm^3 . Krzywa „a” zawiera całą fazę B (zakres modułu) oraz początek fazy C. Zarówno E_p , jak i p_1 mogą być w tym przypadku wyliczone, chociaż p_1 tylko w dużym przybliżeniu (1, 6), zaś E_p będzie prawdopodobnie nieznacznie zaniżone (2). Krzywa „b” kończy się w zakresie fazy B. Można wyliczać stąd wartość modułu presjometrycznego, będzie ona jednak zaniżona m.in. wobec braku dokładności w oznaczeniu V_m (por. ryc. 1). Szacunkową wartość p_1 otrzymać można ze stosunku E_p/p_1 . Krzywa „c” zawiera tylko fazę A i jest oczywiście nieinterpretowalna.

Analizując fazę A powyższych krzywych warto zwrócić uwagę na istotny szczegół: biegnie ona w pobliżu krzywej cechowania. Oznacza to, iż przed osiągnięciem fazy B brak w otworze poważniejszego oporu, a więc ścianki otworu, choć zbyt dużego, są dobrze zachowane. Sytuacja taka ma miejsce często w gruntach spoistych o konsystencji od twaroplastycznej do zwartej i jest tam rezultatem zbyt szybkiego wiercenia, tak więc kolejne podwierty mogą być wykonane właściwie bez zmiany stosowanego sprzętu, a jedynie poprzez poprawienie techniki wiercenia.

Można sobie wyobrazić przekształcenie krzywej „a” z ryc. 2 poprzez przeniesienie punktu V_0 w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara do – mniej więcej – dwusiecznej kąta, jaki tworzą osie p i V . Otrzymamy pęk krzywych jak pokazano na ryc. 3. Przebieg fazy A wskazuje, że sonda napotyka opór gruntu natychmiast po rozpoczęciu badania, jednak jej znaczna długość informuje, że otwór jest także zbyt duży, dodatkowo wypełniony rozluźnionym gruntem pochodzącym najprawdopodobniej ze ścia-

nek otworu wokół sondy. W takiej sytuacji trudno jest wyrokować, czy możliwe jest uzyskanie wartościowych wyników, jako że promień rozluźnionej strefy może być dowolnie duży.

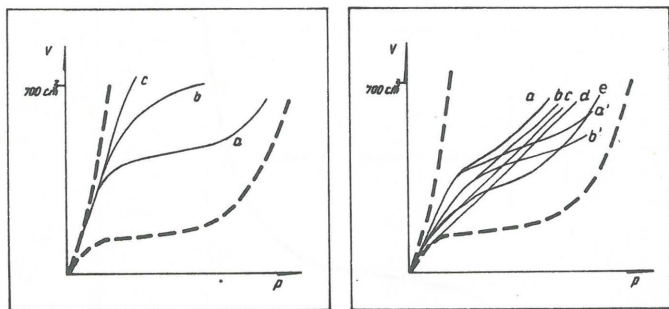
Krańcowym przypadkiem zdaje się tu być krzywa, a raczej prosta „d” (brak faz A–C). W tym przykładzie rozszerzająca się sonda penetruje strefę naruszoną do samego końca badania, które należy uznać za bezwartościowe. Zdarza się to w piaskach, gdy stosuje się niewłaściwą metodę wiercenia bądź gdy gęstość płuczki jest zbyt mała. Konsekwencją odrzucenia krzywej „d” jest uznanie za niezadawalające wyników badań „a”, „b” i „c”. Obecność słabo zarysowanej fazy B oznacza jedynie napotkanie nieco mniej naruszonego gruntu. Oprócz piasków sytuacje takie zdarzają się w słabych gruntach mało spoistych, a także w gruntach organicznych. Modyfikacje a’ i b’ mogą być traktowane jako wyniki względnie zadawalające, choć należy spodziewać się zaniżonej wartości modułu presjometrycznego, zaś nośność graniczna ze względu na wysokie V_0 może być określona tylko w sposób przybliżony.

Krzywa „e” (ryc. 3) obrazuje szczególny przypadek otworu o naruszonych ściankach spotykany, np. w plastycznych gruntach spoistych. Kolejne wartości ΔV odpowiadające następującym po sobie przyrostom ciśnień Δp są coraz mniejsze, aby po osiągnięciu przegięcia między fazami B i C znów zacząć rosnąć. Faza B ograniczona jest do jednej pary Δp , ΔV i nie ma pewności, czy w tym momencie sonda penetrowała już grunt nienaruszony. Jeśli nie – wartość modułu będzie zaniżona, jeśli tak – nieco zawyżona ze względu na podwyższoną wartość V_m . O zbyt niskiej tj. obciążonej błędem wartości E_p można wnioskować analizując stosunek E_p/p_1 – w omawianych przypadkach często niższy od wartości przedstawianych w literaturze (1, 3, 4, 6).

Kolejny zestaw niezbyt udanych badań związany jest ze zbyt małą średnicą otworu. Rzut oka na rysunek (ryc. 4) pozwala stwierdzić, że ewentualne nieprawidłowości zachodzą w fazach A i B, gdy wszystkie krzywe zbiegają do zbliżonego punktu V_0 , p_1 . Krzywa „a” stanowi niemal proste przesunięcie „w dół” krzywej „idealnej”. Jest to efekt wyparcia przez ciasne ścianki otworu wody z sondy do urządzenia pomiarowego, przez co badanie rozpoczyna się ($p = 0$) od pewnej ujemnej wartości V . Takie badanie jest oczywiście najzupełniej poprawne.

Pole pomiędzy krzywymi „a” i „a'” jest obszarem rosnących naprężeń, nierozładowanych przed rozpoczęciem badania. Linia „a'” jest przypadkiem, gdzie nachylenie prostego odcinka krzywej aż do początku fazy C pozostaje takie same, praktycznie brak więc fazy A. Jest to jednocześnie ostatni przypadek pozwalający na wyliczenie prawidłowej i bezpiecznej wartości modułu presjometrycznego.

Krzywe „b” i „c” rozpoczynają się stycznie do osi ciśnień, przy czym krzywa „b” oddziela się wcześniej i w pewnym sensie łagodnie tworząc dalej łuk, zaś krzywa „c” „wyłamuje się” nagle z osi p i podąża stromo do góry. Przypadek ten jest łatwiejszy do interpretacji – krzywa „c” ma tylko fazę C, więc można wyliczyć wartość p_1 (choć zalecane dla tej sytuacji założenia $V_0 = 0$ (1) nie wydaje się zupełnie oczywiste), natomiast nie ma możliwości ustalenia E_p . Przypadek „b” należy uznać za najbardziej niebezpieczny spośród analizowanych powyżej, prowadzi bowiem do zawyżenia wartości E_p , a w konsekwencji do zaniżenia wielkości spodziewanych osiadań. Zjawisko zbyt ciasnego otworu zachodzi w gruntach pęczniejących, a także przy wprowadzaniu sondy w grunt poprzez wbijanie lub wwbrowywanie.



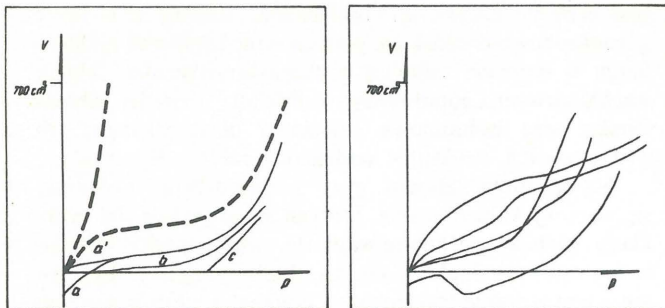
Ryc. 2. Krzywe presjometryczne uzyskane z badań w otworze o zbyt dużej średnicy (objaśnienia w tekście)

Fig. 2. Pressiometer curves obtained from tests in a drilling with too large diameter (see the text for explanations)

Ryc. 3. Krzywe presjometryczne uzyskane z badań w otworze o naruszonych ściankach (objaśnienia w tekście)

Fig. 3. Pressiometer curves obtained from tests in a drilling with disturbed walls (see the text for explanations)

⁵ Ryciny 2–4 zawierają dodatkowo jako materiał porównawczy krzywą „idealną” oraz krzywą cechowania standardowego (linie przerywane)



Ryc. 4. Krzywe presjometryczne uzyskane z badań w zbyt ciasnym otworze (objaśnienia w tekście)

Fig. 4. Pressiometr curves obtained from tests in a drilling with too small diameter (see the text for explanations)

Ryc. 5. Krzywe presjometryczne o kształtach nieregularnych świadczących o nieprawidłowym przebiegu badania

Fig. 5. Pressiometer curves with irregular course, indicative of some inappropriateness of the test

Znane są też przypadki wręcz nieprawdopodobnych kształtów krzywych presjometrycznych (ryc. 5). Wbrew pozorom są one często interpretowalne, choć sam opis zjawisk z nimi związanych jest dość skomplikowany, w związku z czym zostanie tu pominięty, zwłaszcza że przypadki takie występują rzadko. Opisane są one szczegółowo w pracach (1) i (6).

Powyższy tekst w ogromnym – z konieczności – skrócie omawia nieprawidłowości związane z wykonywaniem badań presjometrycznych i wynikające stąd błędy w otrzymywanych wartościach liczbowych. Mimo iż niektóre zagadnienia zaledwie zasygnalizowano, a inne, mniej istotne, wręcz pominięto autor ma nadzieję, że artykuł zwracając z jednej strony uwagę na złożoność problemu prawidłowego wykonywania badań presjometrycznych przekonuje jednocześnie, iż dzięki postępowi w znajomości tych zagadnień wyniki obciążone błędem mogą być względnie łatwo wykryte, nieprawidłowości usunięte, a sam błąd – w przybliżeniu – oszacowany i poprawiony.

LITERATURA

1. Baguelin F., Jezequel J.F., Shield D.H. – The Pressuremeter and Foundation Engineering Trans. Tech. Publications 1978.
2. Briand J-L., Gambin M. – Suggested Practice for Drilling Boreholes for Pressuremeter Testing. ASTM Geotechnical Testing Journal 1984.
3. Dudycz D. – Wytyczne wykonywania i interpretacji badań presjometrycznych. „Geoprojekt” Warszawa 1979.
4. Praca zb. – Interpretation and Application of Pressuremeter Test Results to Foundation Design – General Memorandum. Sols Soils 1975 nr 26, D/60 and (The Menard Pressuremeter).
5. Praca zb. – Principles of Pressuremeter Testing. 1975 D. 10 an. (The Menard Pressuremeter)
6. Tarnawski M. – Working with Pressuremeter (skrypt). Arch. Geotek OY, Helsinki 1983.

SUMMARY

The paper deals with irregularities which may take place in the course of preparations to pressuremeter tests, making the tests and interpreting their results, and lead to erroneous results. Attention is paid to the fact that, despite of numerous difficulties in obtaining satisfactory results of the tests, the question of detection and evaluation of errors appears relatively simple but insufficiently known, which makes its popularization justified.

РЕЗЮМЕ

В статье рассматриваются неправильности, которые могут возникнуть при приготовлении, ведении и интерпретации результатов pressiометрических исследований, что ведёт к получению ошибочных результатов. Обращено внимание на то, что mimo многих затруднений в получении удовлетворительных результатов исследований, вопрос нахождения и оценки ошибок относительно хорошо изучен и – как шире неизвестен – требует популяризации.