

OKREŚLANIE WARTOŚCI EDOMETRYCZNEGO MODUŁU ŚCISLIWOŚCI OGÓLNEJ Z BADAŃ PROWADZONYCH ZE STAŁĄ PRĘDKOŚCIĄ ODKSZTAŁCANIA

UKD 624.131.376.4:539.32:624.131.439.7'3

Postęp w rozwiązaniach posadowień obiektów wiąże się bezpośrednio z problematyką osiadania. Zagadnienie obliczania wartości osiadania było już bardzo eksponowane w poprzednich normach dotyczących gruntów budowlanych, a obecna norma PN-74/B-03020 jeszcze zwiększa nacisk na odkształcalność podłoża. Również i działalność praktyczna związana z budownictwem w rejonach, w których występują słabe grunty, jak też przy zwiększaniu wymiarów obiektów i wzroście obciążeń przekazywanych na podłoże, wymaga podania wiarygodnych parametrów charakteryzujących ściśliwość podłoża budowlanego.

Niestety z tymi rosnącymi wymaganiami nie idzie w parze rozwój podstawowych prac badawczych w każdej niezbędnej dziedzinie, a nawet analizując kolejne normy można mówić o stagnacji, jeśli nie o pewnym cofaniu się w zakresie badań pozwalających na określanie wartości parametrów. I tak — obowiązujące od 1976 r. normy zalecają rozwój badań *in situ* i na tej podstawie określanie wartości podatności gruntu oraz badania presjometryczne pozwalające na wyznaczenie modułu presjometrycznego. Znacznie mniejsze znaczenie ma edometryczny moduł ściśliwości ogólnej i zgodnie z normą powinien być stosowany jedynie do gruntów słabych, dla których wartość $M_0 < 100 \text{ kG} \cdot \text{cm}^{-2}$. Jeśli jeszcze dodać, że wzór na obliczenie wartości osiadań w normie jest podany dla wartości modułów edometrycznych, to wyłaniają się duże trudności przy wykonywaniu tych obliczeń.

Należy też stwierdzić, że brak zarówno sprzętu, jak i wykonuje się zbyt małą liczbę doświadczeń przy próbnym obciążeniu gruntu, a uzyskiwane wyniki są niekiedy dalekie od rzeczywistych wartości. Badania presjometryczne rozwijają się wprawdzie, zwłaszcza dzięki uporczywej pracy prowadzonej w „Geoprojekcie” oraz kombinatach geologicznych, jednak obecnie nie można jeszcze jednoznacznie mówić o zastosowaniu uzyskiwanych wartości do obliczania osiadań. W tej sytuacji nie wydaje się więc możliwe rezygnowanie z badań edometrycznych, a nawet potrzebne jest ich rozwijanie i unowocześnianie.

Edometr, zaprojektowany i wprowadzony do badań przez Terzagiego, od wielu lat stanowi podstawowe wyposażenie laboratoriów w różnych krajach. W każdym podręczniku gruntoznawstwa i mechaniki gruntów, niezależnie od autora oraz języka publikacji, znajdziemy opis badań edometrycznych wraz z ich interpretacją. Na podstawie wartości modułów uzyskanych z badań edometrycznych zaprojektowano i zrealizowano tysiące obiektów, przy czym brak danych odnośnie do powstania awarii, których przyczyną byłoby błędne wyznaczenie modułów edometrycznych. Przeciwnie — wielokrotnie okazało się, że obserwowane wartości osiadań są niższe od obliczonych, choć można znaleźć dużą liczbę publikacji wykazujących zgodność między wartościami prognozowanymi a obserwowanymi.

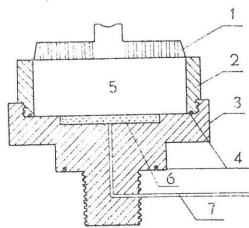
Poruszymy teraz niektóre elementy badań edometrycznych, zawarte w polskich normach i publika-

cjach. Norma PN-58/B-04495, dotycząca oznaczania edometrycznych modułów, zawierała na 18 stronach formatu A5 dokładny opis przyrządu, przebiegu badań i ich interpretacji. Obecnie obowiązująca norma PN-75/B-04481 poświęca oznaczaniu edometrycznych modułów 2 strony formatu A4. W obu normach przy obliczaniu wartości modułu zalecane jest stosowanie zwiększającego współczynnika α , przy czym w starej normie zalecano jedynie wyjątkowo wykorzystywać wyniki $E_1 \geq 300 \text{ kG} \cdot \text{cm}^{-2}$, w obecnej normie uznaje się jako niemiarodajne wartości $M_0 > 100 \text{ kG} \cdot \text{cm}^{-2}$. Wartości współczynnika α w obu normach podano arbitralnie przez załączenie identycznych wykresów.

Wyjaśnienia odnośnie do dokładności badań w edometrze w liczbie 8 podano w punkcie 6.1 normy z 1958 r., ale nie wszystkie z nich są w pełni przekonujące. Szerzej naświetlił wartość współczynnika α Z. Wilun (4). Wartość α podano w tablicy 7.2, przy czym są one nieco niższe niż na rys. 12 obecnej normy dla krzywej *a*. Jednocześnie Z. Wilun podaje moduły o wartościach sięgających 2000 kG/cm^2 . Wartości te, jak podaje ten autor, wyznaczono na podstawie wyników próbnym obciążeni i wyników obserwacji osiadań budowli prowadzonych w ITB od 1943 do 1959 r. Są to więc wartości wyliczone a nie wynikające z badań i trudno nazwać je edometrycznymi modułami.

Różnice między osiadaniami wyliczonymi na podstawie edometrycznych modułów a obserwowanymi w rzeczywistości mogą wynikać nie tylko z niedokładności popełnianych w badaniach, ale i innych przyczyn. I tak w literaturze można znaleźć stwierdzenie, że jeśli w podłożu występuje warstwa ściśliwa o niewielkiej miąższości, albo też gdy wymiar obciążonej powierzchni jest znaczny w porównaniu do miąższości konsolidowanej warstwy, to uzyskuje się stosunkowo dobre wyniki korzystając z modułów edometrycznych. Jeśli jednak w podłożu nie są spełnione powyższe warunki, to pomierzone wartości osiadania są mniejsze. Dla takich wypadków zaleca się w obliczeniach wartości całkowitego osiadania uwzględnić współczynnik zmniejszający, wynoszący dla silnie skonsolidowanych gruntów nawet wartość równą 0,25. Propozycję taką przedstawił A. W. Skempton i L. Bjerrum (2) podając wykres współczynnika zmniejszającego. Jest to inny pogląd, zgodnie z którym należy korzystać z modułów edometrycznych otrzymanych z badań, a korygować jedynie wartość osiadania, gdyż w podłożu może wystąpić trójosiowy stan odkształcenia, a więc inny niż w badaniach edometrycznych.

Prowadzenie znormalizowanych badań i obliczanie z nich parametrów stanowi przecież inne zagadnienie niż zastosowanie tych parametrów w faktycznie występujących warunkach geologicznych. Obecnie jest już oczywiste, że konieczne jest stosowanie ścieżki obciążenia, nie powinniśmy jednak również zapominać o konieczności dokonywania analizy możliwych odkształceń, czyli skontrolowania pola naprężeń przez pole prędkości odkształceń.



Ryc. 1. Przekrój konsolidometru.

1 — tłok z filtrem, 2 — pierścień, 3 — podstawa, 4 — uszczelnienie, 5 — próbka gruntu, 6 — filtr karborundowy, 7 — kanałik odprowadzający do przyrządu mierzącego ciśnienie wody w porach.

Fig. 1. Cross-section of consolidometer.

1 — piston with filter, 2 — ring, 3 — base, 4 — seal, 5 — soil sample, 6 — carborundum filter, 7 — outlet channel leading to device measuring water pressure in pores.

Dlatego też wysiłek badacz powinien być skierowany na ulepszanie zarówno prac badawczych, jak i metod interpretacji w celu dostarczenia parametrów do obliczeń, podobnie jak na rozwijanie metod obliczeniowych oraz analizowanie uzyskanych danych z obserwacji terenowych, oczywiście w ścisłym powiązaniu z istniejącymi warunkami geologicznymi.

Dla badań edometrycznych złożyło się niezbyt szczęśliwie, że w nowej normie PN-75/B-04481 podano na rys. 11 schemat edometru z pierścieniem nieruchomym, choć opracowano w Polsce w ośrodku gdańskim edometry z pierścieniem pływającym. O edometrach takich zresztą wspomina norma w punkcie 3.14.5.3 przy oznaczaniu ciśnienia pęcznień gruntów sypkich. Edometry opracowane w ośrodku gdańskim mają również korzystniejszy stosunek wysokości próbki do średnicy, co pozwala na uzyskanie wyników obciążonych mniejszym błędem, choć wymiary próbek nie są zgodne z normą.

Prowadzone są również prace nad zmianą metodyki badawczej, które pozwoliłyby na wyeliminowanie dalszych źródeł błędów i taka propozycja została przedstawiona przez Vu Cao Minha i Z. Głazera (6). Są to badania edometryczne, gdyż jest spełniony warunek jednoosiowego stanu odkształcenia, co stanowi najważniejszą istotę tych badań. Na podstawie wyników wielu wykonanych badań laboratoryjnych, Vu Cao Minh (5) stwierdził zależność prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ od różnicy wartości odkształcenia końcowego ϵ_{∞} i odkształcenia w danej chwili ϵ oraz stwierdził, że wykres $\lg \dot{\epsilon}$ do $\lg (\epsilon_{\infty} - \epsilon)$ dla różnych gruntów i przy różnych wartościach Δp jest linią prostą. Na tej podstawie został przedstawiony wzór:

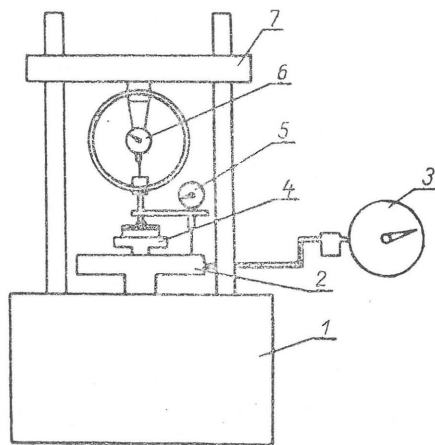
$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\beta} (\epsilon_{\infty} - \epsilon)^m \quad [1]$$

Współczynniki m i β można odczytać z wykresów jako nachylenie prostej i wartość jej przesunięcia. Współczynniki te mają również sens fizyczny; i tak stwierdzono, że wartość m zależy od wymiarów cząstek gruntu i im grunt ma mniejsze cząstki tym wartość m jest mniejsza. Współczynnik β zależy od obciążenia wstępnego p_0 , a więc jest związany z rodzajem i stanem gruntu.

Vu Cao Minh stwierdził również zależność prędkości odkształcenia od wartości naprężenia efektywnego:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\beta} [f(\sigma') - \epsilon]^m \quad [2]$$

Analiza pełzania szkieletu gruntowego — a proces ten rozpoczyna się od chwili przejmowania obciążenia przez szkielet gruntowy — pozwoliła na przyjęcie:



Ryc. 2. Schemat przyrządu do badania konsolidacji.

1 — zespół napędzający, 2 — stół, 3 — pomiar ciśnienia wody w porach, 4 — konsolidometr, 5 — czujnik do pomiaru odkształceń gruntu, 6 — dynamometr z czujnikiem pomiarowym, 7 — nieruchoma rama.

Fig. 2. Scheme of device for studies of consolidation.

1 — driving gear, 2 — table, 3 — measurement of water pressure in pores, 4 — consolidometer, 5 — device for measurements of soil deformations, 6 — dynamometer with measuring device, 7 — stable frame.

$$f(\sigma') = \frac{\sigma'}{M_0} \quad [3]$$

gdzie: M_0 jest edometrycznym modułem ściśliwości ogólnej.

Z wzorów [1] i [3] wynika, że w rozważaniach przyjęto liniową zależność między naprężeniem a odkształceniem końcowym:

$$\epsilon_{\infty} = \frac{\sigma'}{M_0} \quad [4]$$

Z analizy zmian wartości ciśnienia wody w porach oraz prędkości odkształcenia w trakcie procesu konsolidacji stwierdzono, że istnieją dwie fazy:

— faza ruchu nieustalonego, w czasie której wzrasta ciśnienie wody w porach aż do pewnej określonej wartości, a jednocześnie wzrasta prędkość odkształcenia;

— faza ruchu ustalonego, w której ciśnienie wody w porach, w osi symetrii konsolidowanej warstwy ($u_H = \text{const}$) stabilizuje się na pewnej określonej wartości, prędkość odkształcenia jest stała $\dot{\epsilon} = \text{const}$, wartość naprężenia efektywnego wzrasta ze stałą prędkością $\sigma' = \text{const}$.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że w fazie ruchu ustalonego średnia wartość dla całej konsolidowanej warstwy

$$\sigma'_{gr} = p - \frac{2}{3} u_H \quad [5]$$

Zależność tę [5] można również, popełniając niewielki błąd, przyjąć dla fazy ruchu nieustalonego.

Aby obliczyć wartość M_0 , można korzystać ze wzoru [4], wymaga to jednak przeprowadzenia dodatkowych obliczeń wartości ϵ_{∞} , a można też z wykorzystującą dokładnością obliczać zgodnie z wzorem:

$$M_0 = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \epsilon} \quad [6]$$

Należy podkreślić, że wartości σ' i ϵ przedstawiają średnią wartość dla całej próbki, a wartość σ' oblicza się ze wzoru [5].

Badanie przeprowadza się w ten sposób, że po umieszczeniu próbki w konsolidometrze (ryc. 1) obciąża się ją początkowym obciążeniem p_0 i czeka

WARTOŚCI MODUŁU ŚCISLIWOŚCI PASTY ILU PYLASTEGO OBLICZANE Z BADAŃ W KONSOLIDOMETRZE ORAZ TRADYCYJNYCH BADAŃ EDOMETRYCZNYCH (MN/m²)
(wg Vu Cao Minha; 5)

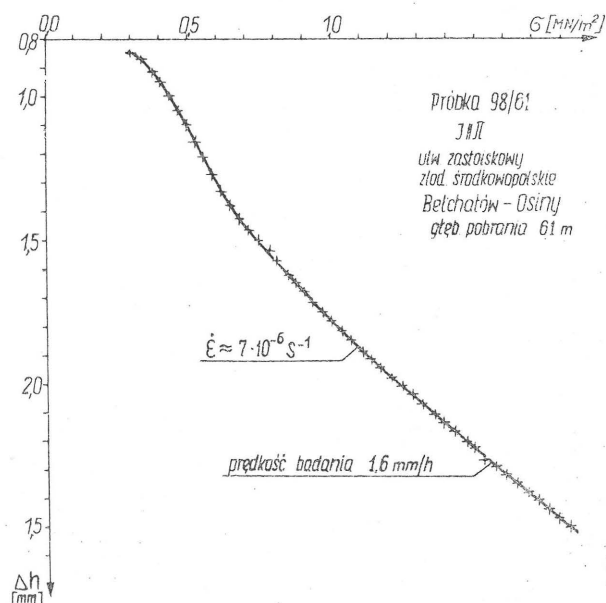
Przedział naprężenia MN/m ²	Badanie przy stałej prędkości odkształcenia				Badania tradycyjne
	$\dot{\epsilon}_{const} = 1,7 \cdot 10^{-5}/s$	$\dot{\epsilon}_{const} = 0,85 \cdot 10^{-5}/s$	$\dot{\epsilon}_{const} = 3,5 \cdot 10^{-6}/s$	$\dot{\epsilon} = 0$	
0,05—0,1	1,25	1,21	1,19	1,13	1,13
0,1—0,2	1,96	1,91	1,90	1,82	1,82
0,2—0,4	3,40	3,32	3,28	2,90	2,92

aż do rozproszenia wartości ciśnienia wody w porach, mierzonego u dołu próbki do wartości $u_H \approx 0,5$ kN/m². To wstępne obciążenie jest konieczne nie tylko ze względu na prowadzenie badania zgodnie ze ścieżką obciążenia, ale daje również dodatkowe korzyści. Wstępne obciążenie powoduje dobre dociśnięcie gruntu do bibuły i filtrów oraz pierścienia. Dzięki temu zostają usunięte niektóre źródła błędów.

Po rozproszeniu ciśnienia wody w porach przystępuje się do zwiększania wartości obciążenia pionowego ze stałą prędkością. Łatwo to uzyskać stosując zespół napędzający aparatu do badań trójosiowego ściskania (ryc. 2). Wskazane jest, aby prędkość odkształcenia $\dot{\epsilon}$ była mniejsza niż $10^{-6}s^{-1}$. Podczas wzrostu obciążenia rejestruje się wartość ciśnienia wody w porach, co pozwala wyróżnić fazę ruchu nieustalonego i ustalonego. Z badania otrzymuje się zależność σ' od Δh dla danej prędkości odkształcenia, którą można łatwo przekształcić w zależność σ' od ϵ i obliczyć stąd zgodnie ze wzorem [6] wartość M_0 .

Pierwsze badania, zgodnie z nową metodyką, wykonano na pastach gruntowych sporządzonych z ilów krakowieckich. Chodziło bowiem o uzyskanie materiału spełniającego w miarę możliwości założenia przyjęte w teorii, m. in. o spełnienie warunków jednorodności gruntu oraz wysokiego stopnia wilgotności (około 0,97—0,98). Jednocześnie próbka miękkoplastycznej, jednorodnej pasty gruntowej lepiej przylega do pierścienia konsolidometru, zapewniając prawidłowy pomiar ciśnienia wody w porach. Uzyskane przez Vu Cao Minha wyniki (tab. I) wskazują na dużą zgodność wartości modułów ścisłości obliczonych na podstawie badań w konsolidometrze oraz badań tradycyjnych. Największe różnice w wynikach (7—17%) występują przy większych prędkościach badania, a najmniejsze różnice — przy małych prędkościach. Wartości otrzymane z badań w konsolidometrze są zazwyczaj nieco wyższe od wyników badań tradycyjnych.

W laboratorium Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW prowadzono prace mające na celu porównanie wyników badań w konsolidometrze oraz tradycyjnych badań edometrycznych na próbkach gruntów o NNS. Badania wykonano dla rozmaitych gruntów, o różnej genezie, pozycji stratygraficznej i historii geologicznej (tab. II). Schemat badania ścisłości dostosowano do konkretnych potrzeb i w związku z tym stosowanie obciążenia wstępnego, jego wartość, prędkość zwiększania obciążenia podczas badania, wartość maksymalnego obciążenia były odmienne dla różnych próbek. I tak dla gruntów pobranych w rejonie Bełchatów — Osiny stosowano obciążenie wstępne równe połowie wartości naprężenia pierwotnego przy założeniu nawodnienia podłoża. Podczas obciążenia wstępnego notowano odkształcenia próbki wg schematu stosowanego w tradycyjnym badaniu edometrycznym. Następnie po okresie ok. 1 godziny, podczas którego następowało niemal całkowite rozproszenie ciśnienia wody w porach, rozpoczynano badanie właściwe, polegające na stosowaniu stale rosnącego obciążenia. Badanie przerywano w chwili, gdy obciążenie osiągnęło wartość 3- do 4-krotnie większą od naprężenia pierwotnego próbki w ośrodku gruntowym. Podczas badania rejestrowano w stałych odstępach czasu (5 lub 10 min.) wartości: obciążenia, odkształcenia próbki i ciśnienia wody w porach.



Ryc. 3. Przykładowa krzywa ścisłości gruntu (próbka 98/61) otrzymana z badania w konsolidometrze.

Fig. 3. Exemplary curve of soil compressibility (sample no 98/61) obtained from studies in consolidometer.

Opracowanie wyników badania wykonano w następujący sposób:

- 1) przeliczenie zarejestrowanych wartości odkształcenia dynamometru na wartości naprężenia całkowitego σ działającego na próbkę;
- 2) obliczenie naprężenia efektywnego σ' wg wzoru [5];
- 3) sporządzenie krzywej ścisłości w układzie $\sigma' - \Delta h$ (por. ryc. 7, 7a, 7b). Można również sporządzić wykres w układzie $\sigma' - \epsilon$, co ułatwia późniejsze obliczenia modułu ścisłości;
- 4) przyjęcie przedziałów naprężeń i odczytanie z wykresu ścisłości wartości odkształceń próbki na krańcach przedziałów;
- 5) obliczenie modułu ścisłości wg wzoru [6].

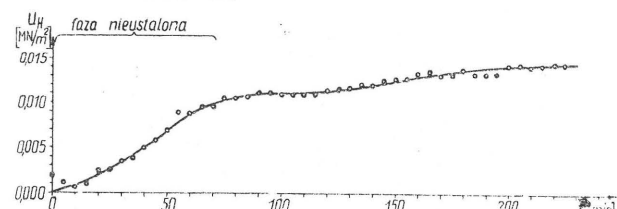
Na rycinie 3 przedstawiono krzywą ścisłości uzyskaną z badania w konsolidometrze próbki ilu przewarstwowanego pyłem. Próbkę pobrano z głębokości 61 m ppt, z serii zastoiszkowej złodowacenia środkowopolskiego (próbka 98/61). W celu zanalizowania przebiegu badania przedstawiono również wykresy zmian wartości ciśnienia wody w porach podczas badania (ryc. 4) oraz wykresy zmian wartości odkształcenia względnego próbki gruntu w 5-minutowych przedziałach czasu (ryc. 5). Jak widać, faza nieustalona w wypadku próbki 98/61 jest związana z pierwszymi 70 minutami badania. Ciśnienie wody w porach w tym czasie stale wzrasta, a odkształcenia względne mają zmienne wartości: początkowo szybko wzrastają, a następnie wykazują pewien spadek.

Tabela II

ZESTAWIENIE WARTOŚCI EDOMETRYCZNEGO MODUŁU ŚCISLIWOŚCI OGÓLNEJ UZYSKANYCH Z BADAŃ W KONSOLIDOMETRZE ORAZ METODĄ TRADYCYJNĄ

Pozycja stratygraficzno-facjalna	Nazwa (symbol) gruntu	Rejon pobrania próbki	Numer próbki głębokość pobrania (m)	Wilgotność w (%)	Naturalny ciężar objętościowy γ_n $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	Przedział naprężenia $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$	Wartości edometrycznego modułu ścisłości ogólnej $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$				
							badanie tradycyjne				badanie w konsolidometrze M_k
							M_I	M_O	M_{III}	M_{IV}	
holocen (utwory akumulacji organicznej)	τ	Bełchatów	— 0,5—0,9	160,1— 186,7	10,7— 12,5	0,05—0,1 0,1—0,2 0,2—0,4				0,63 ^a 0,78 ^a	0,67 ^a 0,86 ^a 1,42 ^a
plejstocen — interglacjał eemski (utwory akumulacji organicznej)	Nm	Bełchatów	205 17	68,7— 85,0	16,3	0,2—0,4 0,4—0,8 0,8—1,6				5,9 ^c 10,7 ^c	5 6 8
plejstocen — zlodowacenie środkowo-polskie (utwory facji wytopiskowej)	Gp/Pg	Bełchatów	228 2,5	14,7— 15,6	21,6	0,025—0,05 0,05—0,1 0,1—0,2 0,2—0,4	3 4 5 11	4 4 7 —	6 5 7 14		6 6 8 12
plejstocen zlodowacenie środkowo-polskie (głina zwałowa)	Gp	Bełchatów	207 7,2	12,4— 12,6	22,6	0,1—0,2 0,2—0,4 0,4—0,8	9 10 17	— — —	12 13 25	18,0 ^c 43,4 ^c	13 14 31
	Gp	Bełchatów	— 22,6—22,9	13,0	23,6	0,2—0,4 0,4—0,8				20 ^d 40 ^d	20 ^d 35 ^d
plejstocen zlodowacenie środkowo-polskie (utwory zastoisowe)	I	Bełchatów	108 42	18,8— 21,8	21,0	0,2—0,4 0,4—0,8 0,8—1,6	18 18	— —	26 27		19 18 25
	I/ π	Bełchatów	98 61	21,5	19,4	0,4—0,8 0,8—1,6					12 18
plejstocen zlodowacenie południowo-polskie (głina zwałowa)	I	Bełchatów	— 38,4—38,7	9,3	23,8	0,2—0,4 0,4—0,8				27 ^d 44 ^d	30 ^d 41 ^d
sarmat — (ił krakowiecki)	I	Machów	— 50	17,5	21,9	1,0—1,5 1,5—2,5				50 ^b 70 ^b	45 ^d 75 ^d

M_I — moduł ścisłości ogólnej bez żadnych poprawek
 M_O — moduł ścisłości ogólnej z poprawką normową κ (edometryczny moduł ścisłości pierwotnej)
 M_{III} — moduł ścisłości ogólnej z poprawką przyjętą z analizy wykresu konsolidacji
 M_{IV} — moduł ścisłości ogólnej z uwzględnieniem poprawki na odkształcenia własne edometru
 M_k — moduł ścisłości ogólnej uzyskany z badań w konsolidometrze



Ryc. 4. Zmiany wartości ciśnienia wody w porach podczas badania ścisłości gruntu w konsolidometrze (próbka 98/61).

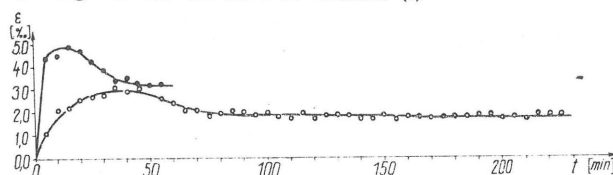
Fig. 4. Changes in value of water pressure in pores during studies of soil compressibility in consolidometer (sample no. 98/61).

a — wyniki podane przez R. Szydła (3)

b — z danych w pracy R. Kaczyńskiego (1)

c — wyniki uzyskane w laboratorium ZPiDG o/Łódź z badań gruntów pochodzących z tego samego rejonu i należących do tej samej serii inż.-geol.

d — wg Vu Cao Minha i Z. Glazera (6)

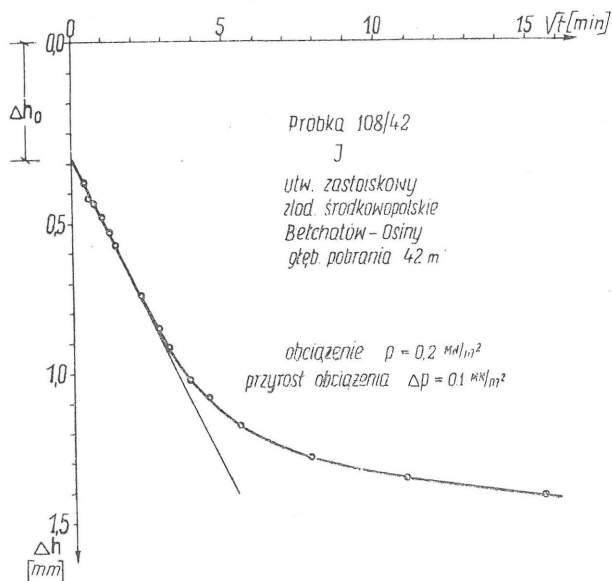


Ryc. 5. Zmiany odkształcenia względnego próbek gruntu w przyjętych (5-minutowych) przedziałach czasu.

● próbka 228/2,5, ○ próbka 98/61.

Fig. 5. Changes in relative deformation of soil samples in adopted (5 minutes) time intervals.

● sample no. 228/2,5, ○ sample no. 98/61



Ryc. 6. Wykres konsolidacji próbki 108/42 — tradycyjne badanie edometryczne. Na rycinie pokazano sposób wyznaczania poprawki Δh_0 .

Fig. 6. Graph of consolidation of clay sample — classic oedometer studied. Figure shows the method of calculation of correction Δh_0 .

Po około 70 minutach od chwili rozpoczęcia stale rosnącego obciążenia, wartości odkształcenia względnego w pięciominutowych przedziałach czasu wynoszą ok. 1,8—2,0%, a tempo wzrostu ciśnienia porowego jest znacznie mniejsze. Jednocześnie (jak wynika z materiałów analitycznych), napężenie efektywne osiąga wartość ok. 0,7—0,8 MN/m² i od tego miejsca krzywa ściśliwości wykazuje prawie prostoliniowy przebieg (por. ryc. 3).

Na rycinie 5 zamieszczono również wykres zmian odkształcenia względnego próbki gliny piaszczystej przewarstwionej piaskiem gliniastym (próbka 228/2,5). Stabilizacja prędkości odkształcenia występuje przy badaniu próbki 228/2,5 nieco wcześniej niż przy badaniu próbki 98/61. Ustalenie prędkości odkształcenia względnego jest uzależnione od charakteru gruntu oraz prędkości badania. Jest to zagadnienie z tego względu istotne, że po ustaleniu prędkości odkształcenia otrzymujemy wyniki obarczone mniejszym błędem.

Przedstawiony sposób opracowania wyników jest stosowany, jeśli wykonuje się jedno badanie (dla danego gruntu) przy niewielkiej stałej prędkości odkształcenia rzędu 10⁻⁶/s. Wyznaczanie wartości modułu ściśliwości przy wykonaniu dla danego gruntu 3 badań z różną prędkością przedstawiono w osobnym artykule (6).

Jak wyżej wspomniano, oprócz badań w konsolidometrze wykonywano również tradycyjne badania edometryczne dla wybranych gruntów. Moduły ściśliwości pierwotnej otrzymane z tradycyjnych badań edometrycznych obliczono w celach porównawczych różnymi sposobami i podano w osobnych rubrykach. Sposoby obliczeń modułów ściśliwości są następujące:

I moduł, zdefiniowany jako stosunek przyrostu naprężenia do odkształcenia jednostkowego próbki bez żadnych poprawek

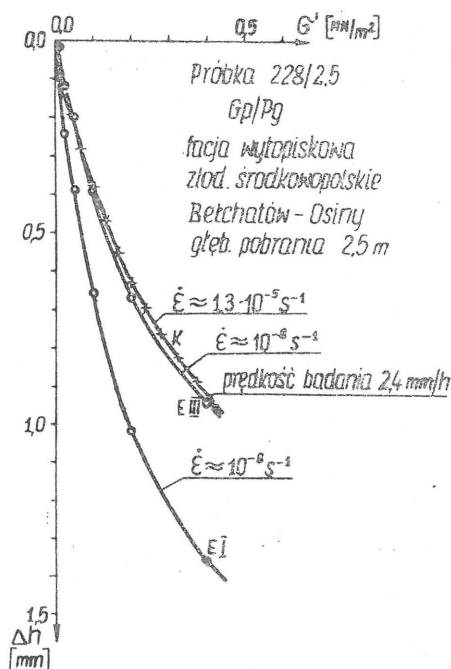
$$M_I = \frac{\Delta\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta\sigma \cdot h_{i-1}}{\Delta h_i} \quad (\text{MN/m}^2) \quad [7]$$

gdzie: $\Delta\sigma$ — przyrost obciążenia jednostkowego próbki (MN/m²)

ε — odkształcenie jednostkowe,

Δh_i — odkształcenie próbki w danym zakresie obciążeń (cm),

h_{i-1} — wysokość początkowa próbki przed przyłożeniem rozpatrywanego stopnia obciążenia (cm);



Ryc. 7. Ściśliwość próbek gruntu badana różnymi metodami.

K — badania w konsolidometrze, EI — tradycyjne badania edometryczne (odkształcenia próbek naniesione bez żadnych poprawek), EIII — tradycyjne badania edometryczne (odkształcenia próbek z uwzględnieniem poprawek otrzymanych z analizy wykresów konsolidacji).

Fig. 7. Compressibility of soil samples studied by different methods.

K — studies in consolidometer, EI — classic oedometer studies (sample deformations plotted without any corrections), EIII classic oedometer studies (sample deformations plotted taking into account corrections obtained from analysis of consolidation graphs).

II edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej wg wzoru:

$$M_{II} = \frac{\Delta\sigma}{\varepsilon} \cdot \kappa \quad (\text{MN/m}^2) \quad [8]$$

gdzie: κ — współczynnik poprawkowy zależny od

wartości $\frac{\Delta\sigma}{\varepsilon}$, przyjmowany z nomogramu zamieszczonego w PN-75/B-0448,

— pozostałe oznaczenie — jak we wzorze [7]. Zgodnie z normą wartości $M_{II} > 100$ kG/cm² należy uznać za niemiarodajne.

III moduł ściśliwości pierwotnej (ogólnej), zdefiniowany jako stosunek przyrostu naprężenia do odkształcenia jednostkowego próbki pomniejszonego o poprawkę

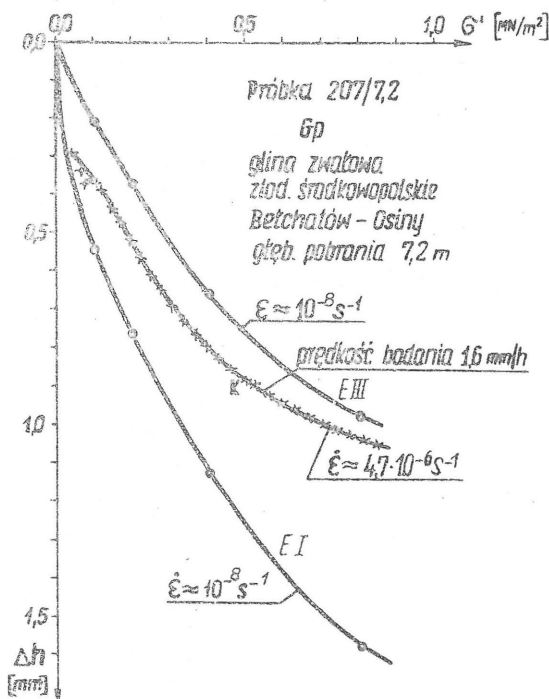
$$M_{III} = \frac{\Delta\sigma \cdot h_{n-1}}{\Delta h_n - \Delta h_0} \quad (\text{MN/m}^2) \quad [9]$$

gdzie: Δh_0 — poprawka (cm),

Δh_n — odkształcenie próbki w danym zakresie rejestrowania na czujniku (cm),

h_{n-1} — wysokość początkowa próbki przed przyłożeniem rozpatrywanego stopnia obciążenia z uwzględnieniem poprawek z poprzednich zakresów (cm).

Wartość poprawki Δh_0 , wynikającej z odkształcenia własnego edometru i sączków filtracyjnych oraz ewentualnych przesunięć czujnika podczas obciążenia, odczytywano z wykresu konsolidacji (w układzie $\Delta h - \sqrt{t}$) w miejscu przecięcia początkowego prostoliniowego odcinka krzywej konsolidacji z pionową osią odkształceń 0 — Δh (ryc. 6). Oprócz tego w tab. II zamieszczono wartości modułu ściśliwości M_{IV}



Ryc. 7a.

Fig. 7a.

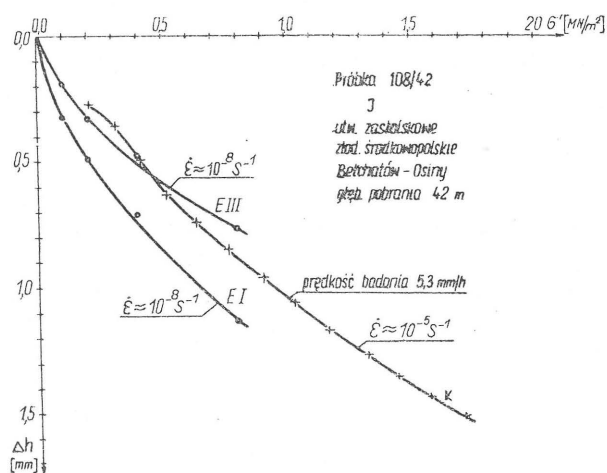
uzyskane w laboratorium Zakładu Projektów i Dokumentacji Geologicznych w Łodzi KG „Północ”. Wartości te otrzymano na podstawie badań innych próbek gruntu, należących jednak do tej samej serii inżyniersko-geologicznej i pobranych w tym samym rejonie. Przy obliczeniu modułów ścisłości M_{IV} uwzględniono wyłącznie poprawki na odkształcenia własne edometru.

Badania ścisłości, przeprowadzone w konsolidometrze oraz metodą tradycyjną, pozwalają na porównanie odkształceń próbek oraz uzyskanych wartości modułów ścisłości. Na ryc. 7, 7a i 7b przedstawiono wykresy ścisłości próbek gruntów pochodzących z serii wytopiskowej, zastoiiskowej oraz glin zwalowych.

Dla każdego z przebadanych gruntów odkształcenia uzyskane z badań w konsolidometrze są niższe od wartości z tradycyjnego badania edometrycznego (krzywa EI i K). Natomiast odkształcenia uzyskane z badań w konsolidometrze są większe lub zbliżone do wartości naniesionych z uwzględnieniem poprawki otrzymanej z analizy wykresu konsolidacji dla tradycyjnych badań edometrycznych (krzywe K i EIII). Przebieg analizowanych krzywych ścisłości sugeruje, że różnice między odkształceniami uzyskanymi podczas badań w konsolidometrze oraz badań tradycyjnych w edometrze nie są większe niż wynikające z rozmaitych sposobów interpretacji wyników tradycyjnego badania edometrycznego.

Podobny wniosek nasuwa się przy analizie modułów ścisłości przytoczonych w tab. II. Moduły M_k , otrzymane z badań w konsolidometrze, są zazwyczaj wyższe od wartości modułów M_I , M_0 , M_{III} oraz M_{IV} dla niższych zakresów naprężeń. Natomiast wartości M_k dla wyższych zakresów naprężeń okazują się czasami nawet niższe od modułów M_{III} lub M_{IV} . Porównując otrzymane wyniki należy pamiętać, że badane grunty są już makroskopowo dość zróżnicowane, niejednokrotnie nawet w obrębie jednej próbki NNS pobranej w otworze wiertniczym.

Istniejące nieregularne przewarstwienia (np. w utworach zastoiiskowych lub gruntach należących do facji wytopiskowej) zmieniają warunki konsolidacji w obrębie każdej badanej próbki. W związku z tym przebieg konsolidacji, nawet przy zastosowaniu jednolitej metodyki badania, może być odmienny dla różnych próbek tego samego gruntu. W związku ze znacznym zróżnicowaniem strukturalnym i teksturalnym gruntów utrudnione jest prawidłowe wycięcie próbek i tym samym całkowite zachowanie nienaruszonej, naturalnej struktury gruntu.



Ryc. 7b.

Fig. 7b.

Oprócz zróżnicowania poszczególnych próbek gruntu, znaczny wpływ na otrzymane wartości mają czynniki metodyczne. W tradycyjnych badaniach edometrycznych przyczyną znacznych błędów są zmiany warunków badania, szczególnie zaś przypadkowe wstrząsy, zmiany temperatury, wszelkie przesunięcia czujników przy zmianach kolejnych stopni obciążenia.

Nowa metodyka wymaga dużej staranności i dokładności. Złe wycięta próbka, nie przylegająca do pierścienia może uniemożliwić pomiar prawidłowej wartości ciśnienia wody w porach. Wymagana jest obserwacja zmian wartości ciśnienia wody w porach i prędkości odkształcenia, gdyż dokładność wyników wiąże się ściśle z fazą ustaloną. Należy również sprawdzać aparaturę, a zwłaszcza szczelność układu pomiarowego ciśnienia wody w porach, dokładność wskazań czujników i manometrów we wszystkich zakresach ciśnienia oraz prędkość przesuwu podstawy zespołu napędzającego.

Dotychczas wykonane badania własne wskazują, że przy zastosowaniu nowej metodyki, w zależności od rodzaju gruntu i programu, badanie można wykonać w czasie od kilkudziesięciu minut do kilku godzin.

LITERATURA

- Kaczyński R. — Inżyniersko-geologiczna ocena wpływu powierzchni osłabienia w ilach krakowieckich na stateczność zboczy rejonu Tarnobrzega. Pr. doktorska, 1971. Biul. Geol. Wydz. Geol. UW 1977 nr 22.
- Skempton A. W., Bjerrum L. — A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. Geotechnique vol. 7 no. 4.
- Szydeł R. — Charakterystyka utworów zastoiiskowych i zmienność ich parametrów fizyczno-mechanicznych pod wpływem zmian wilgotności i udrabiania. Pr. magisterska. Maszynopis Arch. IHGI UW 1976.
- Wiłun Z. — Zarys geotechniki. Wyd. Kom. i Łączn. 1976.
- Vu Cao Minh — Jednoosiowa konsolidacja gruntów z uwzględnieniem pełzania. Pr. doktorska. Maszynopis Bibl. Geol. UW 1976.
- Vu Cao Minh, Z. Glazer — Nowa metoda wyznaczania edometrycznego modułu ścisłości ogólnej. Inżynieria i Budownictwo 1977 nr 1.
- PN-58/B-04495 — Grunty budowlane. Oznaczanie edometrycznych modułów ścisłości i edometrycznych modułów odprężenia. Wyd. Normalizacyjne 1958.
- PN 74/B-03020 — Grunty budowlane. Projektowanie i obliczenia statyczne posadowień bezpośrednich. Ibidem 1974.
- PN 75/B-04481 — Grunty budowlane. Badania laboratoryjne. Ibidem 1975.

S U M M A R Y

The developments in building result in increase in need for estimations of parameters characterizing foundation soils. Oedometric modulus of general compressibility is the basic parameter for calculating subsidence values, obtainable from laboratory studies. The method of estimating the modulus, accepted by the Polish Normatives, remains unchanged for years despite of the fact that the obtained results are influenced by various errors.

The paper presents theoretical premises for a new method of estimating the modulus and the methodology of studies and interpretation of obtained results.

Р Е З Ю М Е

Развитие строительства вызывает повышение требований в области определения параметров, характеризующих грунтовое основание. Основным параметром для вычисления величины осадки, определяемым в лаборатории, является эндометрический модуль общей объёмной упругости. Метод определения этого модуля, по польским стандартам, не изменяется много лет, так что получаемые результаты вмещают разные ошибки.

В статье представлены теоретические основы новой методики определения эндометрического модуля, описан способ проведения исследований и интерпретации полученных результатов.