

WSPÓŁCZYNNIK KONSOLIDACJI c_v BARDZO ZWARTYCH PREKONSOLIDOWANYCH IŁÓW

CONSOLIDATION COEFFICIENT c_v FOR VERY STIFF OVERCONSOLIDATED CLAYS

Joanna Stróżyk, Ewa Koszela-Marek - Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Politechnika Wroclawska

W pracy przedstawiono wyniki badań współczynnika konsolidacji c_v dla wybranych pięciu próbek iłów z rejonu Dolnego Śląska. Wartości c_v wyznaczano w edometrach przy różnych obciążeniach konsolidacyjnych mniejszych od pionowych naprężeń pierwotnych *in situ*. Uzyskane wartości współczynnika c_v malały proporcjonalnie do stopnia prekonsolidacji. Zauważono odwrotną zależność pomiędzy wartością współczynnika c_v a powierzchnią właściwą gruntu S_t i pęcznieniem swobodnym FS.

Słowa kluczowe: współczynnik konsolidacji, iły, grunty prekonsolidowane

The research results of the consolidation coefficient c_v for five selected clay samples from Lower Silesia were presented. The values of consolidation coefficient c_v were estimated from oedometer tests conducted at different consolidation loads, lower than *in situ* vertical virgin stress. It was found that the c_v values increased proportional to overconsolidation ratio. The inversely correlation between value of c_v and specific surface area S_t and the free swelling FS was observed.

Key words: consolidation coefficient, clay, overconsolidated soil

Wstęp

Obciążanie podłoża gruntowego prowadzi do jego osiadań. Wielkość osiadań można obliczyć wykorzystując parametry odkształceniowe gruntów. Najczęściej stosowany jest moduł edometryczny E_{oed} , lub wskaźnik ściśliwości C_c . W wielu aspektach inżynierii geotechnicznej i hydrotechnicznej istotną rolę odgrywa również czas osiadań obiektów, który jak zakłada się na drodze teoretycznej [6,8], jest wynikiem zachodzącej w podłożu konsolidacji. Czas ten można oszacować na podstawie wartości współczynnika konsolidacji c_v . Współczynnik konsolidacji definiuje się jako (por.[4,6]):

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (1)$$

gdzie:

- k - współczynnik filtracji
- m_v - współczynnik ściśliwości objętościowej
- γ_w - ciężar wody

Współczynnik ten najczęściej wyznacza się z badania konsolidacji, prowadzonego w edometrze lub konsolidometrze, w warunkach jednoosiowego odkształcenia. Do wyznaczenia c_v wykorzystuje się krzywą osiadania próbki w czasie, przy stałym obciążeniu pionowym. Procedura wyznaczania wartości c_v polegająca na dopasowywaniu krzywej osiadania do różnego rodzaju konstrukcji, budzi szereg wątpliwości [9-11]. Dla gruntów naturalnych, niezwykle trudno jest dopasować krzywą do zakładanej konstrukcji [3,4] i oszacować wartość c_v . Wyniki otrzymane z tych procedur nie zawsze odpowiadają wartościom

oczekiwanym w odniesieniu do obserwacji terenowych [10]. Niektórzy autorzy zakładają [4,10], że dla różnych rodzajów gruntów, różne procedury będą bardziej lub mniej odpowiednie. Typowe wartości współczynnika c_v przedstawiono w tabeli 1 (por.[4,6]).

Zakłada się (por.[6,8]), że wartość c_v silnie wiąże się ze właściwościami filtracyjnymi gruntu, a czas konsolidacji uzależniony jest od prędkości przepływu wody. Dla słabo-przepuszczalnych gruntów drobnoziarnistych, wartość c_v często stanowi podstawę określenia wartości współczynnika filtracji k (por. (1)).

Z uwagi na problemy, jakie stwarza poprawne wyznaczenie wartości c_v wynikające z braku dopasowania krzywej eksperymentalnej, a także ograniczeniami w badaniach podejmuje się próby skorelowania wartości c_v z innymi parametrami gruntów drobnoziarnistych [6,8,9-11]. Najczęściej korelowanymi parametrami są: granice Atterberga, parametry konsystencji, plastyczności i skurczalności. Zauważyć można, że poszukiwania wzajemnych zależności koncentrują się na udziale frakcji iłowej w składzie ziarnowym i składzie mineralnym.

W pracy przedstawiono wyniki badań współczynnika konsolidacji c_v prekonsolidowanych iłów. Przedstawiono wartości współczynnika c_v i jego zmienność w zależności od stopnia prekonsolidacji. Podjęto próbę odniesienia uzyskanych wartości współczynnika c_v do wartości wskaźnika porowatości gruntu e oraz powierzchni właściwej S_t i pęcznienia swobodnego FS. Przyjęto założenie, że powierzchnia właściwa S_t oraz pęcznienie swobodne FS można uznać za wskaźnik składu mineralnego frakcji iłowej.

Tab. 1. Wartości współczynnika konsolidacji c_v dla gruntów drobnoziarnistych [4,6]Tab. 1. The values of consolidation coefficient c_v for fine-grained soils [4,6]

Rodzaj gruntu Soil type		Współczynnik konsolidacji Consolidation coefficient c_v	Wskaźnik plastyczności Plasticity index I_p
[-]		m^2/rok	[-]
iły	o wysokiej plastyczności	0,1-1	>25
	średnio plastyczne	1-10	25-5
	mało-plastyczne	10-100	<15
pyły		>100	-

Metodyka badań

Do badań wytypowano pięć próbek gruntu z rejonu Dolnego Śląska. Wszystkie próbki były iłami o zawartości frakcji iłowej powyżej 30%. W ramach badań podstawowych wykonano analizę granulometryczną i badanie podstawowych cech fizycznych. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Badania podstawowe gruntów (w_n - wilgotność naturalna, ρ - gęstość objętościowa, e_0 - wskaźnik porowatości)Tab. 2. The general tests of soils (w_n - water content, ρ - bulk density, e_0 - porosity index)

Próba Sample	Rodzaj gruntu Soil type	Konsystencja Consistency	w_n [%]	ρ [g/cm ³]	e_0 [-]
P1	Cl	bzw / very stiff	25,4	1,89	0,63
P2	Cl	bzw / very stiff	16,1	2,08	0,46
P3	Cl	bzw / very stiff	20,6	2,18	0,46
P4	Cl	bzw / very stiff	27,4	2,06	0,65
P5	Cl	bzw / very stiff	23,8	2,07	0,51

Badania współczynników konsolidacji c_v prowadzono w standardowych edometrach. Przed rozpoczęciem obciążania, próby wstępnie poddawano nasycaniu poprzez zalewanie komór edometrycznych wodą destylowaną. W trakcie zalewania kontrolowano ciśnienie pęcznienia gruntów, uniemożliwiając próbom zwiększanie objętości (zwiększono obciążenia aż do zrównoważenia ciśnienia pęcznienia σ_{sp}). Po ustabilizowaniu ciśnienia pęcznienia, notowano jego wartość i rozpoczynano obciążenia procedurą przyrostową. Każdy kolejny stopień obciążenia był dwukrotnie większy od wcześniejszego. Pierwszy etap konsolidacji, dla każdej próby, prowadzony był przy wartości obciążenia równej podwojonemu ciśnieniu pęcznienia ($2x\sigma_{sp}$), kolejne stopnie obciążenia zwiększano dwukrotnie ($4x\sigma_{sp}$, $8x\sigma_{sp}$). Dla każdego stopnia obciążenia obliczano wartość współczynnika konsolidacji c_v wykorzystując metodę Taylora (por. [4,6]):

$$c_v = 0,848 \frac{h^2}{t_{90}} \quad (2)$$

gdzie:

 h^2 - długość drogi filtracji t_{90} - czas 90% konsolidacji

Współczynnik c_v wyznaczano przy obciążeniach w edometrze mniejszych niż naprężenia pierwotne *in situ*, a więc tylko dla gruntów w stanie prekonsolidowanym. Wartość współczynnika c_v podawano w m^2/rok .

Wielkość współczynnika c_v odnoszono do stopnia prekonsolidacji gruntu, określanego dla każdego etapu badania, ze wzoru:

$$OCR = \frac{\sigma_{vo}}{\sigma_{oed}} \quad (3)$$

gdzie:

 σ_{vo} - naprężenie pionowe *in situ* σ_{oed} - naprężenie pionowe konsolidujące w edometrze

Badania powierzchni właściwej S_t wykonano metodą sorpcji błękitu metylenowego i przeprowadzono zgodnie z normą PN-88/B-04481 (por. [2]). Wykorzystano również opis metody i uwagi zawarte w literaturze [3].

Badania pęcznienia swobodnego przeprowadzono metodą H.J. Gibbsa i W.G. Holtza [3,4,5]. Próby gruntów o masie 50 g suszono w temperaturze 105-110°C do stałej masy, rozcierano i przesiano przez sito o wymiarze oczek 0,425 mm. Odmierzoną w cylindrze miarowym objętość gruntu równą 10 cm³ przesypywano do cylindra z wodą destylowaną. Czekano na zakończenie procesu sedymentacji cząstek gruntu w wodzie i ustalenie objętości końcowej gruntu w cylindrze. Następnie, na skali cylindra odczytywano końcową objętość spęczniałego gruntu. Swobodne pęcznienie oznaczono według wzoru:

gdzie:

$$FS = \frac{V-10}{10} \times 100 \quad (4)$$

FS - swobodne pęcznienie (%)

10 - początkowa objętość próbki (cm³)V - objętość końcowa próbki (cm³)

Wyniki badań

Wyniki badań przeprowadzonych w edometrach w celu wyznaczenia współczynników konsolidacji c_v zestawiono w tabeli 3. Wyniki badań powierzchni właściwej S_t i pęcznienia swobodnego FS podano w tabeli 4. Na rysunkach przedstawiono zależności pomiędzy współczynnikiem konsolidacji c_v a stopniem prekonsolidacji OCR (rys. 1), wskaźnikiem porowatości e (rys. 2), powierzchnią właściwą S_t (rys. 3) i pęcznieniem swobodnym FS (rys. 4).

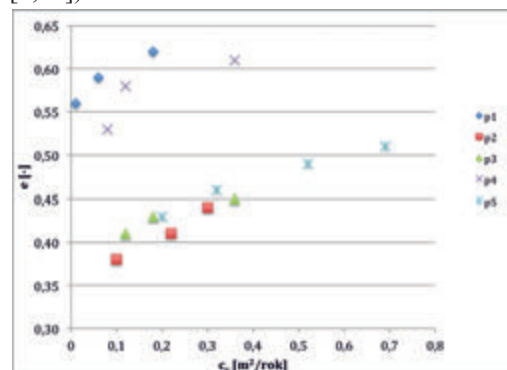
Tab. 3. Zestawienie wyników badań w edometrze (σ_{vo} - napężenie pionowe *in situ*, σ_{sp} - ciśnienie pęcznienia, σ_{oed} - obciążenie konsolidujące w edometrze, e - wskaźnik porowatości, c_v - współczynnik konsolidacji, OCR - stopień prekonsolidacji na danym etapie badania (2))
 Tab. 3. The results from oedometer tests (σ_{vo} - vertical virgin stress *in situ*, σ_{sp} - swelling pressure, σ_{oed} - oedometer consolidation pressure, e - porosity index, c_v - consolidation coefficient, OCR - overconsolidation ratio at given test stage (2))

Próba sample	σ_{vo} [kPa]	σ_{sp} [kPa]	$\sigma_{oed} = 2 \times \sigma_{sp}$			$\sigma_{oed} = 4 \times \sigma_{sp}$			$\sigma_{oed} = 8 \times \sigma_{sp}$			$\sigma_{oed} = 16 \times \sigma_{sp}$		
	e [-]	c_v [m ² /rok]	OCR [-]	e [-]	c_v [m ² /rok]	OCR [-]	e [-]	c_v [m ² /rok]	OCR [-]	e [-]	c_v [m ² /rok]	OCR [-]	e [-]	c_v [m ² /rok]
P1	2457,0	125,0	0,63	0,18	9,8	0,62	0,06	4,9	0,56	0,01	2,7			
P2	1618,5	113,2	0,46	0,30	6,4	0,44	0,22	3,2	0,38	0,1	1,8			
P3	585,0	115,0	0,46	0,36	2,5	0,45	0,18	1,3	0,41	0,12	0,6			
P4	1540,5	62,5	0,65	0,37	13,3	0,64	0,36	6,6	0,58	0,12	3,3	0,53	0,08	1,7
P5	3861,0	112,7	0,51	0,69	18,4	0,51	0,52	9,2	0,46	0,32	4,6	0,43	0,2	2,3

Oszacowane wartości współczynników konsolidacji c_v badanych ilów zmieniają się w przedziale od 0,69 do 0,01 m²/rok i ogólnie odpowiadają wartościom spodziewanym dla ilów o wysokiej plastyczności (tab. 1). Wartość najwyższą $c_v = 0,69$ zaobserwowano przy najwyższym stopniu prekonsolidacji OCR=18,4 - wartość najniższą przy jednym z niższych OCR = 2,7. Porównując wartości OCR i c_v (tab. 2) można zauważyć, że wraz ze wzrostem stopnia prekonsolidacji rośnie wykładniczo wartość współczynnika c_v . Zależność ta słabiej jest widoczna jeśli porównamy wszystkie otrzymane wyniki razem (rys. 1a). Znacznie lepiej jest zauważalna, gdy odniesiemy się osobno do poszczególnych prób gruntów (rys. 1b), co sugeruje wpływ innych czynników na uzyskaną korelację. Uzyskane korelacje rys. 1b) są wysokie, należy jednak pamiętać, że uzyskano je dla bardzo niewielkiej ilości oznaczeń.

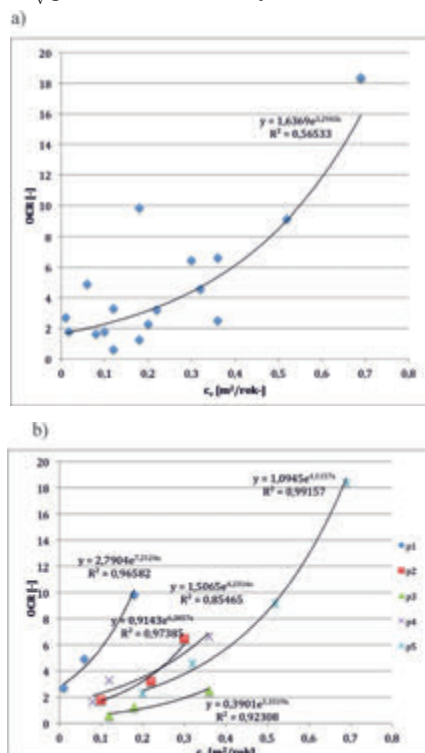
Zależności pomiędzy wskaźnikiem porowatości e , a współczynnikiem c_v przedstawiono na rysunku 2. Jak oczekiwano,

wzrost wartości wskaźnika e wiąże się ze wzrostem wartości c_v (por.[9,10]).



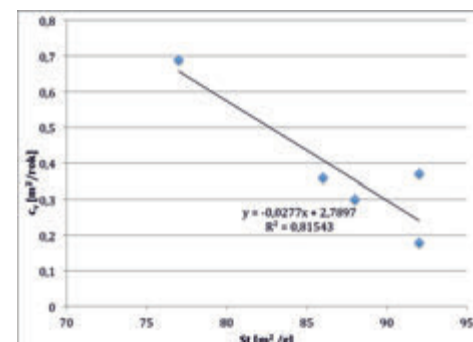
Rys.2. Zależność pomiędzy wskaźnikiem porowatości e , a współczynnikiem konsolidacji c_v

Fig.2. Relationship between porosity index e and coefficient of consolidation c_v



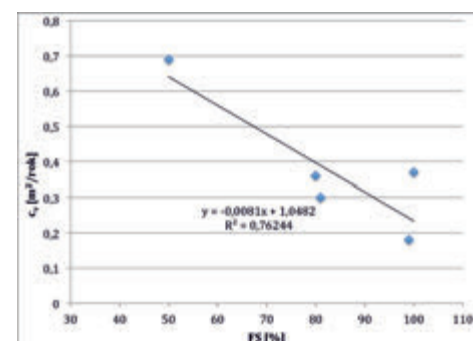
Rys.1. Zależność pomiędzy stopniem prekonsolidacji OCR a wartością współczynnika konsolidacji c_v (a) dla wszystkich wyników razem; (b) osobno dla poszczególnych prób gruntów

Fig.1. Relationship between overconsolidation ratio OCR and consolidation coefficient c_v (a) for all obtained results (b) separately for each soil samples



Rys.3. Zależność pomiędzy współczynnikiem konsolidacji c_v a powierzchnią właściwą S_t

Fig. 3. Relationship between coefficient of consolidation c_v and specific surface area S_t



Rys. 4. Zależność pomiędzy współczynnikiem konsolidacji c_v a pęcznieniem swobodnym FS

Fig. 4. Relationship between coefficient of consolidation c_v and free swelling FS

Tab. 4. Powierzchnia właściwa S_t i pęcznienie swobodne FS
 Tab. 4. Specific surface area S_t and free swelling FS

Próba sample	FS [%]	S_t [m ² /g]
P1	99	92
P2	81	88
P3	80	86
P4	100	92
P5	50	77

Na rysunkach przedstawiono zależności pomiędzy współczynnikiem c_v a powierzchnią właściwą S_t (rys. 3) oraz pęcznieniem swobodnym FS (rys. 4). Wartość współczynnika c_v uwzględniona w korelacji, jest wartością uzyskaną z pierwszego stopnia obciążenia w edometrze, dla obciążenia $\sigma_{\text{oad}} = 2 \times \sigma_{\text{sp}}$. Dla innych obciążeń uzyskiwano podobne korelacje. Wartości S_t i FS można potraktować jako wskaźnik procentowego udziału frakcji ilowej oraz składu mineralnego. Jak zauważa wielu autorów [4,8,9,10] czynniki te mają znaczący wpływ na wartość współczynnika c_v . Wyniki badań wskazują na korelację pomiędzy c_v a S_t i FS (rys. 3 i rys. 4). Zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna, podobnie jak opisywana przez innych autorów w przypadku zależności pomiędzy wskaź-

nikiem skurczalności I_s [9] i plastyczności I_p [1,6] (tab. 1). Parametry te mogą być brane pod uwagę przy wyprowadzaniu zależności empirycznych dla wskaźnika c_v . Wniosek ten należy jednak poddać dalszemu sprawdzeniu ze względu na zbyt małą ilość punktów poddanych statystyce.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono wartości współczynników konsolidacji c_v ilów znajdujących się w stanie prekonsolidowanym. Uzyskane wartości współczynników c_v mieszczą się w spodziewanym zakresie (tab. 1). Zauważono, że wraz ze wzrostem wartości stopnia prekonsolidacji OCR gruntu badanego w edometrze, rośnie wartość współczynnika c_v . Zależność ta jest wykładnicza (rys.1). Niezbędne byłyby jednak dalsze badania potwierdzające to założenie, dla większego zbioru danych.

Zauważono korelację pomiędzy współczynnikiem c_v a powierzchnią właściwą S_t i pęcznieniem swobodnym FS. Zależności te, podobnie jak opisywane w literaturze w odniesieniu do wskaźników plastyczności i skurczalności [1,6,9-11] są odwrotnie proporcjonalne. Parametry S_t i FS są parametrami, które mogą posłużyć do wyznaczenia wzorów empirycznych dla współczynnika c_v .

Literatura

- [1] Carrier W.D., *Consolidation parameters derived from index tests*. Geotechnique, vol.35, n.2, 211-213
- [2] Grabowska-Olszewska B., *Metody badań gruntów spoistych*, Wyd. Geologiczne, Warszawa 1990
- [3] Head K.H., *Manual of Soil Laboratory Testing*. Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests. 2nd ed. Pentech Press, London, 1992
- [4] Head, K.H., *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 1994
- [5] Holtz W.G., Gibbs H.J., *Engineering properties of expansive clays*. Transactions of ASCE 121, 641-667, 1956
- [6] Lambe T.H., Whitman R.V., *Soil Mechanics*, John Willey and Sons 1979, New York
- [7] Myslińska E., *Laboratoryjne badania gruntów*, 2001, PWN Warszawa
- [8] Mitchell J.K., Soga K., *Fundamental of soil behavior*, John Willey & Sons, New York, 2005
- [9] Sridharan A., Nagaraj H., *Coefficient of consolidation and its correlation with index properties of remoulded soils*, GTJ, vol 27, nr5
- [10] Sridharan A., Nagaraj H., *Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index properties*. CGJ, vol37, n.3, 712-722
- [11] Sridharan A., Prakash K., *Classification procedures for expansive soils*. Proc. Instn Civ. Engng, No 143, pp. 235-340, 2000