

Zmiany zagęszczenia i osiadania gruntu niespoistego wywołane obciążeniem statycznym od fundamentu bezpośredniego

Dr inż. Tomasz Kozłowski

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Badanie zależności osiadanie – obciążenie dla próbki gruntu umieszczonej w edometrze należą do podstawowych badań laboratoryjnych gruntu. Relacje pomiędzy osiadaniami a obciążeniem gruntu są ciągle przedmiotem badań w celu jak najbardziej dokładnego określenia zachowania się obciążonego podłoża gruntowego i sprawdzenia stanu granicznego użyteczności.

Badanie ścisłości w edometrze zgodnie z normą [4] przeprowadzono w płaskich walcowych próbkach gruntu umieszczonych w edometrze, obciążanych skokowo przyrostem pionowego obciążenia osiowego lub odciążenia z możliwością pionowego odpływu wody. Norma ta dopuszcza też przeprowadzanie badań ścisłości gruntu w edometrze z ciągłym obciążeniem – przy stałej prędkości odkształcenia.

Problemem wymagającym badań i analiz jest to, w jaki sposób moduł edometryczny zmienia się wraz ze stopniem zagęszczenia gruntu. Ma to szczególne znaczenie przy określaniu osiadania fundamentów obciążonych statycznie.

OKREŚLENIE MODUŁU ŚCISŁIWOŚCI GRUNTU NA PODSTAWIE BADAŃ PRZY ZMIENNYM OBCIĄŻENIU

Możliwość zmniejszania się porowatości gruntu pod wpływem przyłożonego obciążenia jest zjawiskiem znanym, znajdującym odzwierciedlenie w badaniach edometrycznych, gdzie przyrost osiadania dla coraz większych obciążeń przykładanych na grunt jest coraz mniejszy. Świadczy to o wzroście edometrycznego modułu ścisłości. Mechanizm tego wzrostu wynika z możliwości wzajemnego przemieszczania się ziaren gruntu (lepszego ich upakowania). Typowy wykres osiadania w edometrze pokazano na rys. 1.

Z rysunku tego wynika, że zmienną wartość edometrycznego modułu ścisłości należałoby określać z pochodnej [1, 2]:

$$M(\sigma_0) = H \cdot \left. \frac{d\sigma}{ds} \right|_{\sigma=\sigma_0} \quad (1)$$

gdzie:

H – wysokość próbki w edometrze.

Określenie zmiany modułu ścisłości gruntu wraz z obciążeniem wymaga opisanie krzywej $s = s(\sigma)$. Analizując statystyczne wyniki badań edometrycznych, ustalono, że bardzo wysoki poziom istotności posiada związek pomiędzy naprężeniem a osiadaniami w postaci:

$$\sigma = A_0 \cdot s \cdot A_1^s \quad (2)$$

gdzie:

A_0 i A_1 – stałe, które można wyznaczyć metodami statystycznymi na podstawie wyników badań ścisłości gruntu w edometrze ze zbioru $\{\sigma_p, s_p\}$.

Stąd równanie (1) można zapisać w postaci:

$$M(\sigma) = H \cdot \frac{d(A_0 \cdot s \cdot A_1^s)}{ds} \quad (3)$$

Przy założeniu, że $s \rightarrow 0$ otrzymano początkowy edometryczny moduł ścisłości gruntu:

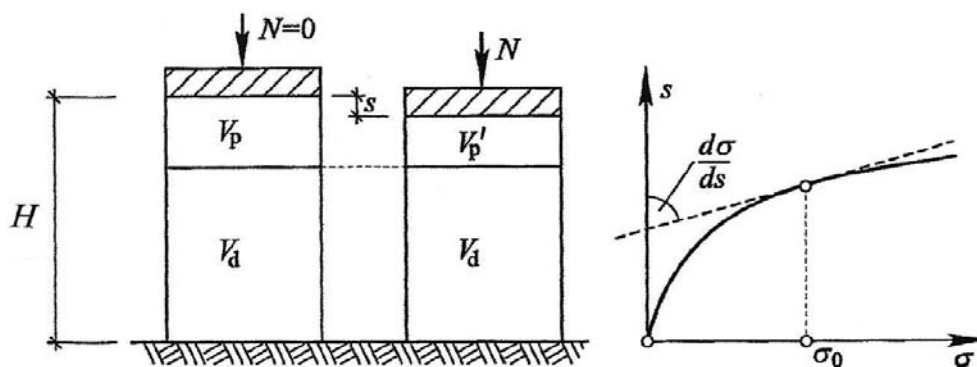
$$M_0 = H \cdot (A_0 \cdot A_1^s + A_1 \cdot A_0 \cdot s \cdot \ln A_1) /_{s=0} \quad (4)$$

stąd

$$M_0 = H \cdot A_0 \quad (5)$$

Równanie $M = f(\sigma)$ można zapisać jako:

$$M(\sigma) = H \cdot A_0 \cdot (A_1^s + A_1^s \cdot s \cdot \ln A_1) \quad (6)$$



Rys. 1. Schemat osiadania próbki gruntu w edometrze [1]

z dostateczną, do określania celów projektowych, dokładnością można przyjąć:

$$M(\sigma) = H \cdot A_0 \cdot \left(1 + \frac{\sigma}{A_0} \cdot \ln A_1\right) = M_0 \cdot \left(1 + \frac{\ln A_1}{A_0} \cdot \sigma\right) \quad (7)$$

Obliczenia numeryczne wykazały, że do celów praktycznych można przyjąć uproszczoną postać równania (7):

$$M(\sigma) = M_0 \cdot (1 + c \cdot \sigma) \quad (8)$$

gdzie:

$$c = \frac{\ln A_1}{A_0} \quad (9)$$

Przykładając obciążenie ciągłe na próbkę gruntu w edometrze po wyznaczeniu parametrów A_0 i A_1 , dla każdego σ można wyznaczyć M , korzystając z zależności liniowej (8). Zmiana edometrycznego modułu ścisłości zależy od przyłożonego obciążenia i od początkowego modułu ścisłości edometrycznej gruntu M_0 .

Wraz ze zmianą osiadania próbki gruntu w edometrze podczas ciągłego obciążenia przy stałej prędkości odkształcenia zmienia się stopień zagęszczenia. Znając początkowy stopień zagęszczenia gruntu przed przyłożeniem obciążenia w edometrze oraz e_{\max} i e_{\min} badanego gruntu, jesteśmy w stanie wyznaczyć zmianę stopnia zagęszczenia wraz z osiadaniami próbki [2].

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (10)$$

oraz

$$I_d = \frac{e_{\max} - \frac{\rho_s - m}{A \cdot (H - s)}}{\frac{e_{\max} - m}{A \cdot (H - s)}} \quad (11)$$

Analiza numeryczna wyników badań wskazuje, że bardzo wysoki stopień istotności uzyskuje zależność:

$$M = M_0 \cdot \left(\frac{1 - I_{d0}}{1 - I_d}\right)^n \quad (12)$$

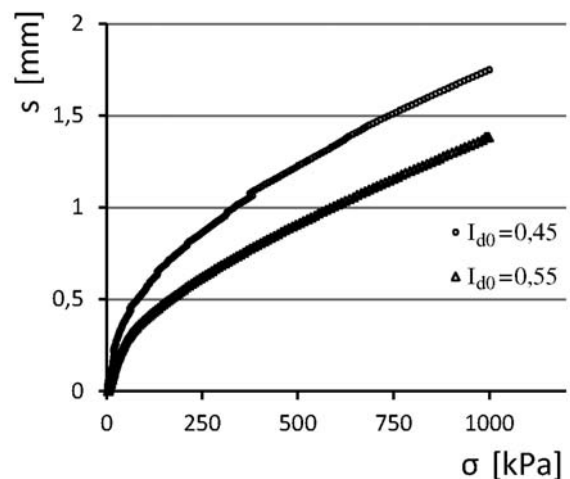
na podstawie której można wyznaczyć zmienność edometrycznego modułu ścisłości w zależności od początkowego edometrycznego modułu ścisłości, początkowego stopnia zagęszczenia gruntu i zmiany stopnia zagęszczenia.

BADANIA LABORATORYJNE

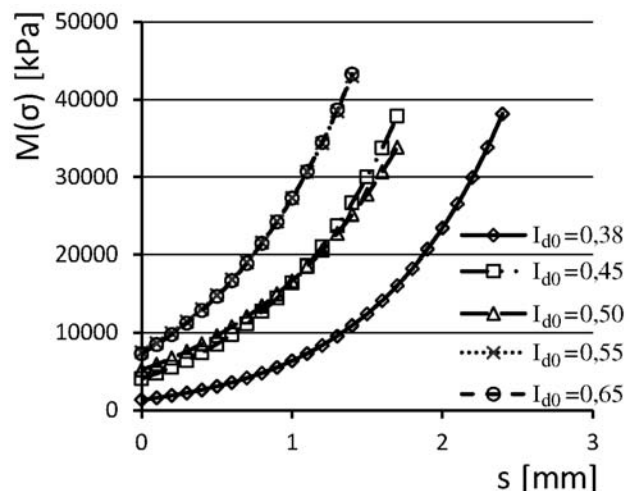
Laboratorium Katedry Geotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego wyposażone jest w prasę do ściskania próbek gruntu UL 25 Wille Geotechnik. Prasą umożliwia ściskanie próbek gruntu w komorach konsolidacyjnych (pierścieniach edometrycznych) przy różnych prędkościach odkształcenia, obciążenia lub zadawania zmiany obciążenia. Prasą wyposażoną jest w 3 wymienne głowice: 1 kN, 10 kN, 20 kN. Zakres prędkości przemieszczania ramy obciążeniowej prasy wynosi od prędkości 0,0005 mm/min do 16 mm/min. Badania ścisłości próbek gruntu można przeprowadzać w pojemnikach



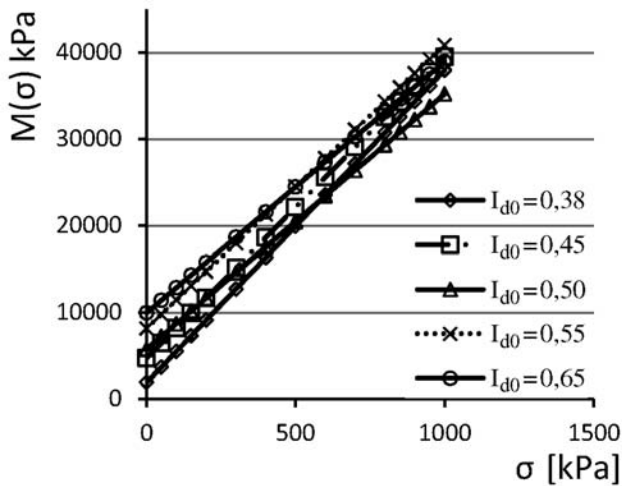
Rys. 2. Badanie ścisłości próbek gruntu w Laboratorium Katedry Geotechniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za pomocą prasy UL 25 Wille Geotechnik



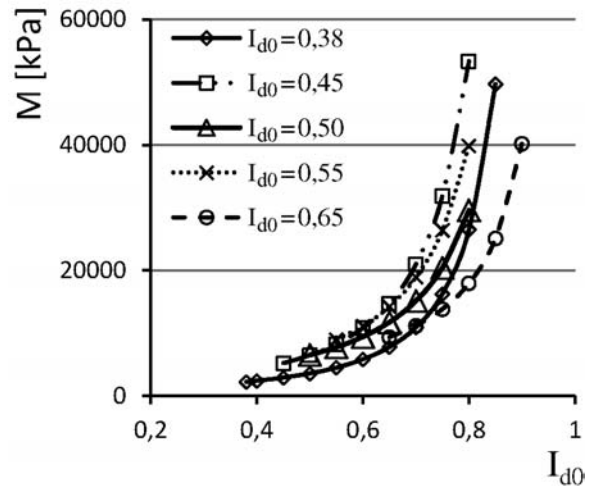
Rys. 3. Przebieg badania ścisłości próbek gruntu piasku dla $I_{d0} = 0,45$ i $I_{d0} = 0,55$ wykonany metodą CRS przy $v = 0,01$ mm/min



Rys. 4. Zmiana edometrycznego modułu ścisłości $M(\sigma) = H \cdot A_0 \cdot (A_1^s + A_1' \cdot s \cdot \ln A_1)$ w zależności od osiadania



Rys. 5. Zmiana edometrycznego modułu ścisłości $M(\sigma) = M_0 \cdot (1 + c \cdot \sigma)$ w zależności od przyłożonego obciążenia i od początkowego stopnia zagęszczenia gruntu



Rys. 6. Zmiana edometrycznego modułu ścisłości $M = M_0 \cdot \left(\frac{1 - I_{d0}}{1 - I_d} \right)^n$ w zależności od zmiany stopnia zagęszczenia gruntu i od wartości początkowej stopnia zagęszczenia gruntu

do konsolidacji o polu powierzchni 20, 50, 100 cm² – zgodnych z CEN ISO/TS 17892-5. Pojemniki konsolidacyjne przystosowane są również do badania współczynnika filtracji badanych gruntów oraz do pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu.

W prasie UL 25 przeprowadzono badania ścisłości suchego piasku średniego metodą stałej prędkości odkształcenia (*CRS constant rate of strain*) przy założonej prędkości $v = 0,01$ mm/min. Badania wykonywano w pierścieniu edometrycznym o polu powierzchni 100 cm² i wysokości 2,80 cm.

W badanym piasku zgodnie z normą [5] wyznaczono wskaźniki porowatości $e_{\max} = 0,737$ i $e_{\min} = 0,448$.

Znając wskaźniki porowatości oraz ρ_s , można obliczyć masę gruntu umieszczoną w pierścieniu edometrycznym dla założonego początkowego stopnia zagęszczenia. Badania ścisłości piasku przeprowadzono dla 5 próbek gruntu o początkowym stopniu zagęszczenia $I_{d0} = 0,38, 0,45, 0,50, 0,55, 0,65$, obciążając je w zakresie od 0 do 1000 kPa. Dla każdej próbki do równania (2) wyznaczono parametry równania A_0 i A_1 , osiągając korelacje rzędu $R = 0,99$. Przykładowe uzyskane wyniki pokazano na rys. 3 i 4.

Wykorzystując równanie (5), można wyznaczyć M_0 . Znając wartość $M(\sigma)$ dla danego obciążenia σ , można, korzystając z równania (8), określić parametr c . Stąd można wykazać, w jaki sposób zmienia się edometryczny moduł ścisłości badanego gruntu w zależności od wartości obciążenia i edometrycznego modułu ścisłości początkowej (rys. 5).

Wraz z osiadaniem próbki gruntu podczas obciążania zmienia się stopień zagęszczenia gruntu (11). Stąd, znając wartość M_0 dla danego I_d i dla początkowego stopnia zagęszczenia gruntu i korzystając z równania (12), określono zmianę wartości edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej. Stąd można wskazać, w jaki sposób zmienia się edometryczny moduł ścisłości gruntu w zależności od jego początkowego stopnia zagęszczenia (rys. 6).

Obliczone wartości początkowych modułów ścisłości gruntu i wykładnika n według przeprowadzonych badań ścisłości suchego piasku średniego metodą stałej prędkości odkształcenia dla $v = 0,01$ mm/min i w pierścieniu edometrycznym o polu powierzchni 100 cm² i wysokości $H = 2,8$ cm przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Obliczone wartości M_0 , n dla przeprowadzonych badań ścisłości piasku o różnym początkowym stopniu zagęszczenia gruntu

I_{d0}	M_0 [kPa]	n
0,38	2229,87	2,187
0,45	5206,69	2,3
0,5	6515,24	1,651
0,55	8965,15	1,839
0,65	9350,64	1,164

Obliczając n i M_0 dla każdej z obciążanych próbek o różnym początkowym stopniu zagęszczenia I_{d0} , można wyznaczyć zależność edometrycznego modułu ścisłości od początkowego stopnia zagęszczenia gruntu i stopnia zagęszczenia $M = f(I_{d0}, I_d)$. Na podstawie danych z tabl. 1 określono zależność pomiędzy M_0 a I_{d0} w postaci równania $M_0 = 27069 \cdot I_{d0} - 7243,5$ kPa natomiast relację pomiędzy n a I_{d0} można przedstawić w postaci równania $n = -3,9728 \cdot I_{d0} + 3,8387$ (rys. 7 i 8).

Gdy do równania (12) podstawimy wyznaczone zależności $n = f(I_{d0})$ oraz $M_0 = f(I_{d0})$, wówczas równanie to można zapisać w postaci:

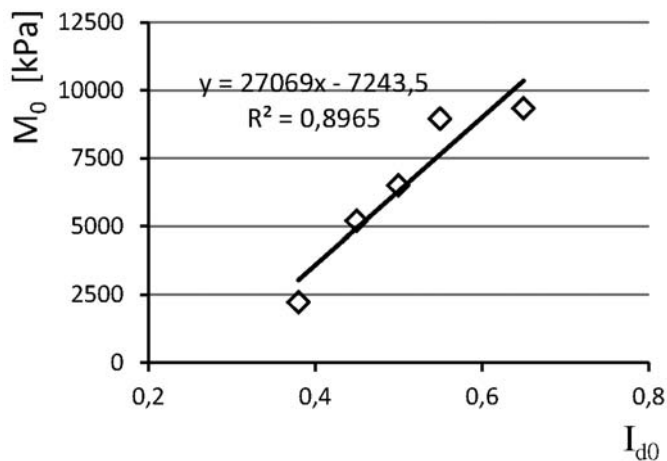
$$M = (27069 \cdot I_{d0} - 7243,5) \cdot \left(\frac{1 - I_{d0}}{1 - I_d} \right)^{(-3,9728 I_{d0} + 3,8387)} \quad (13)$$

Równanie to pozwala określić zależność między edometrycznym modułem ścisłości gruntu a zmianą stopnia zagęszczenia gruntu w stosunku do początkowego stopnia zagęszczenia gruntu.

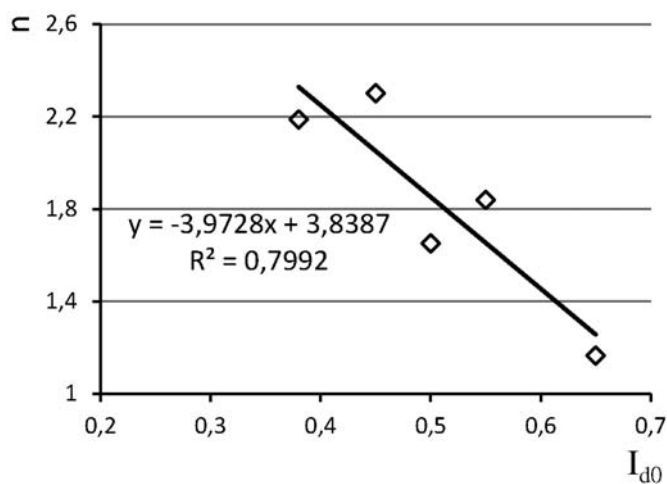
Z badań ścisłości gruntu w edometrze otrzymano σ_0 i $I_{d'}$, stąd można wyznaczyć zależność $I_d = f(\sigma)$.

Zakładając zależność pomiędzy stopniem zagęszczenia gruntu a obciążeniem $I_d = a \cdot \sigma^2 + b \cdot \sigma + c$ dla próbki gruntu o $I_{d0} = 0,55$ otrzymano równanie: $I_d = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma^2 + 0,0004 \cdot \sigma + 0,5643$ przy $R^2 = 0,99$.

Równanie to pozwala określić zmianę stopnia zagęszczenia gruntu w zależności od zmiany naprężenia.



Rys. 7. Zależność pomiędzy M_0 a I_{d0} według przeprowadzonych badań ścisłości suchego piasku średniego metodą stałej prędkości odkształcenia



Rys. 8. Zależność pomiędzy n a I_{d0} według przeprowadzonych badań ścisłości suchego piasku średniego metodą stałej prędkości odkształcenia

OBLICZENIE OSIADANIA PŁYTY KOŁOWEJ NA PODŁOŻU JEDNORODNYM

W literaturze dla rozkładu naprężenia pod osią stopy fundamentowej o kształcie koła podaje się rozwiązanie w postaci [1, 2]:

$$\sigma_z(z) = \sigma_0 \cdot \left[1 - \frac{z^3}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \right] \quad (14)$$

Klasyczna metoda oszacowania osiadań pod fundamentem polega na sumowaniu pionowych odkształceń warstw podłoża. Założono również, że bryła odkształcającego się podłoża gruntowego jest ograniczona u góry podstawą fundamentu, a po bokach pionowymi powierzchniami przechodzącymi wzdłuż krawędzi podstawy fundamentu.

Osiadanie poszczególnych warstw wyznacza się przyjmując, że naprężenie w nich jest równomiernie rozłożone i są równe naprężeniom pod środkiem warstwy. Znając grubość danej warstwy, naprężenie w połowie grubości warstwy i edometryczny moduł ścisłości, można wyznaczać osiadań danej warstwy.

$$s = \frac{\Delta\sigma_{0i} \cdot h_i}{M_i} \quad (15)$$

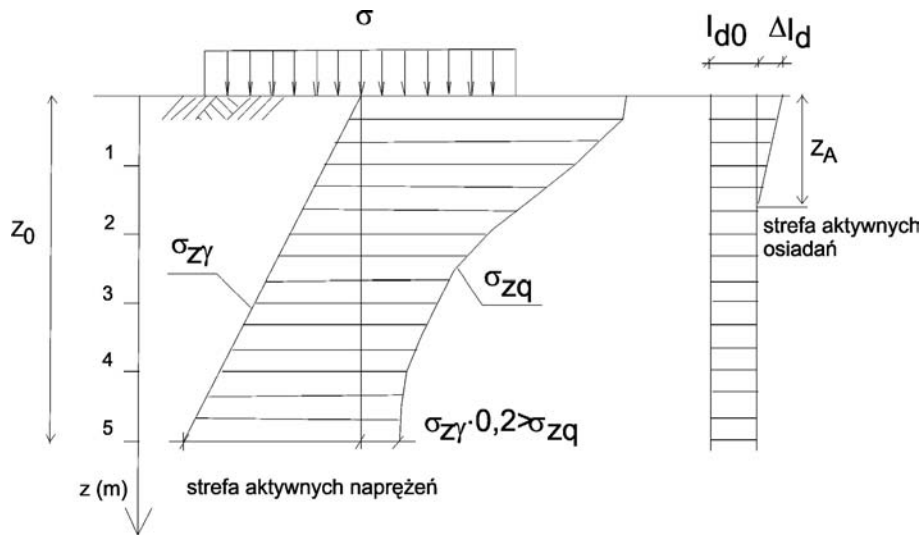
Obliczenie osiadań z reguły kończy się na głębokości, na której składowa pionowa efektywnego naprężenia pochodzącego od obciążenia fundamentu osiąga 20% efektywnego naprężenia pierwotnego pochodzącego od ciężaru nadkładu gruntu [3].

$$0,2 \cdot \sigma_{z\gamma} > \sigma_{zq} \quad (16)$$

Zakładając, że fundament kołowy o średnicy $d = 3,0$ m przekazuje obciążenie 150 kPa na powierzchnię gruntu o $I_{d0} = 0,6$ i $\gamma = 20$ kN/m³, można obliczyć rozkład naprężenia dodatkowego pod fundamentem, rozkład naprężenia pierwotnego i osiadań. Warunek ten dla osiadań podłoża pod fundamentem kończy się na głębokości 5 m p.p.t.

Tabl. 2. Rozkład składowej pionowej naprężenia pod fundamentem kołowym wraz z osiadań fundamentu o średnicy $d = 3$ m, $I_{d0} = 0,6$

z [m]	σ_{zq} [kPa]	$\sigma_{z\gamma}$ [kPa]	$I_d = f(\sigma_{zq}, I_{d0})$ [-]	$I_d - I_{d0}$ [-]	σ_{zq}^{sr} [kPa]	I_d^{sr} [-]	$I_d^{sr} - I_{d0}$ [-]	E [kPa]	s normowo [mm]	S proponowane [mm]
0	150,00	0	0,620	0,020						
0,5	145,26	10	0,618	0,018	137,2	0,615	0,015	11944,5	11,5	11,5
1	124,40	20	0,611	0,011						
1,5	96,97	30	0,601	0,001	98,80	0,602	0,002	11236,8	8,8	8,8
2	73,20	40	0,593							
2,5	55,42	50	0,586		57,93			11133,6	5,2	
3	42,67	60	0,581							
3,5	33,52	70	0,577		34,77			11133,6	3,1	
4	26,87	80	0,575							
4,5	21,93	90	0,573		22,53			11133,6	2,0	
5	18,19	100	0,572							
								Suma s	30,6	20,3



Rys. 9. Schemat aktywnych stref osiadań podłoża pod fundamentem do przykładu obliczeniowego

Zgodnie z założeniem istotne znaczenie w osiadaniu fundamentu ma podłoże gruntowe o miąższości 5 metrów.

Z równania (14) wyznaczono przyrost naprężenia w gruncie od obciążenia zewnętrznego.

Korzystając natomiast z zależności wyznaczonej podczas obciążania próbki gruntu (dla $I_{d0} = 0,55$) w edometrze $I_d = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \sigma_0^2 + 0,0004 \cdot \sigma_0 + 0,5643$, można określić, w jaki sposób zmienia się stopień zagęszczenia gruntu pod fundamentem kołowym przy obciążeniu $\sigma_0 = 150$ kPa. Znany jest również pierwotny stopień zagęszczenia gruntu przed obciążeniem. Odejmując od stopnia zagęszczenia gruntu pod obciążeniem początkowy stopień zagęszczenia, określono przyrost zagęszczenia – zmianę stopnia zagęszczenia gruntu. Zmiana ta w rozpatrywanym przykładzie obliczeniowym możliwa jest tylko do głębokości $1,5 \div 2$ m p.p.t.

Oznacza to, że przy statycznym obciążeniu fundamentu na osiadanie ma wpływ warstwa gruntu o miąższości około 2 m a nie 5 m jak wynika z zależności (16). Do obliczeń przyjęto zmianę modułu ściśliwości wyznaczoną podczas obciążania próbki gruntu (dla $I_{d0} = 0,55$) w edometrze $M = 8965,15 \cdot \left(\frac{1 - I_{d0}}{1 - I_d} \right)^{1,8392}$. Stąd przy obciążeniu statycznym fundament osiadzie 2,03 cm, a nie 3,06 cm, jak w klasycznej metodzie wyznaczana osiadań.

Schemat aktywnych stref osiadań podłoża pod fundamentem do obliczonego przykładu metodą klasyczną i metodą związaną ze zmianą stopnia zagęszczenia przedstawiono na rys. 9.

WNIOSKI

1. W pracy przedstawiono obliczenia osiadania podłoża pod fundamentem metodą klasyczną (normową) oraz metodą zaproponowaną przez Autora pracy, związaną ze zmianą stopnia zagęszczenia gruntu.

Na podstawie przeanalizowanego przykładu okazuje się, że klasyczna metoda osiadań daje około 50% większe osiadania. Wynika z tego, że strefa aktywnego naprężenia pod fundamentem nie musi pokrywać się ze strefą aktywnych osiadań. W klasycznej metodzie przyjmujemy,

że zasięg aktywnej strefy osiadań gruntu pod fundamentem zależy od stosunku wartości naprężenia pierwotnego do naprężenia w gruncie od obciążenia zewnętrznego $0,2 \cdot \sigma_{z\gamma} > \sigma_{zq}$. Natomiast, aby wywołać osiadanie warstw gruntu pod fundamentem, musi istnieć fizyczna możliwość zmiany porowatości gruntu w tych warstwach. Nie zawsze dodatkowe naprężenie od obciążenia zewnętrznego jest w stanie wywołać (lub spowodować) osiadania tej warstwy gruntu. Dlatego Autor proponuje mówić o aktywnej strefie naprężenia i aktywnej strefie osiadań. Aktywna strefa naprężenia w gruntach niespoistych jest zależna od początkowego stopnia zagęszczenia gruntu i od możliwości zmian zagęszczenia w warstwie ściskającego gruntu.

Gdyby przyjąć przy obliczeniu osiadania fundamentów aktywną strefę osiadań zamiast aktywnej strefy naprężenia, wtedy w obliczeniach można wykazać osiadania, które odzwierciedlałyby osiadania rzeczywistych obiektów budowlanych.

2. W pracy przedstawiono metodę określania edometrycznego modułu ściśliwości gruntu na podstawie badań ściśliwości przy stałej prędkości odkształcenia. Ustalono, że zmiana edometrycznego modułu ściśliwości zależy od początkowego edometrycznego modułu ściśliwości gruntu i od przyłożonego naprężenia $M = f(M_0, \sigma)$.

Wskazano, że podczas edometrycznych badań ściśliwości gruntu przy stałej prędkości odkształcenia można uzyskać zależność zmiany edometrycznego modułu ściśliwości w zależności od pierwotnego stopnia zagęszczenia gruntu, stopnia zagęszczenia i pierwotnego edometrycznego modułu ściśliwości $M = f(M_0, I_{d0}, I_d)$.

W przeprowadzonych seriach badań ściśliwości dla kilku próbek tego samego gruntu o różnym początkowym stopniu zagęszczenia wskazano metodę wyznaczania edometrycznego modułu ściśliwości w zależności od stopnia zagęszczenia gruntu i od początkowego stopnia zagęszczenia gruntu $M = f(I_{d0}, I_d)$.

3. W pracy przeprowadzono również analizę osiadania fundamentu kołowego według metody tradycyjnej – nor-

mowej, przy założeniu, że zasięg strefy aktywnej nie zależy od zmiany stopnia zagęszczenia gruntu, a jedynie od zależności pomiędzy naprężeniem pierwotnym a naprężeniem w gruncie od obciążenia zewnętrznego $0,2 \cdot \sigma_{zq} > \sigma_{zd}$.

Z badania ściśliwości gruntu można wyznaczyć zależność między stopniem zagęszczenia gruntu a zmianą naprężenia $I_d = f(\sigma_0)$. Zależność ta umożliwia określenie zmiany stopnia zagęszczenia gruntu w zależności od zmiany naprężenia w gruncie wynikającego z obciążenia zewnętrznego. Znając początkowy stopień zagęszczenia i stopień zagęszczenia w gruncie po przyłożeniu obciążenia (przez fundament), obliczono przyrost stopnia zagęszczenia w danej warstwie gruntu. Dopiero na tej podstawie obliczono osiadanie danej warstwy gruntu. Podłoże gruntowe może osiadać przy statycznym obciążeniu tylko do głębokości, w której możliwy jest wzrost stopnia zagęszczenia gruntu. Do głębokości, w której możliwe jest zmniejszenie porowatości. Strefa aktywna przy określaniu osiadań w zależności od możliwości zmiany porowatości gruntu przy obciążeniu statycznym

jest mniejsza w analizowanym przykładzie od strefy aktywnej wyznaczanej w zależności od naprężenia pierwotnego i naprężenia w gruncie od obciążenia zewnętrznego.

4. Propozycja dalszych badań przewiduje analizę tego zjawiska dla gruntów sypkich o różnej granulometrii (piaski drobne, średnie, grube, żwiry) oraz wpływ wymiaru poziomego fundamentu na osiadanie.

LITERATURA

1. Meyer Z.: Obliczenia Inżynierskie. Osiadania Fundamentów. Zapol, Szczecin 2012.
2. Wiłun Z.: Zarys Geotechniki. WKiŁ, Warszawa 1987.
3. PN-EN 1997-1: Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
4. PN-EN 1997-2: Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
5. PN-88/B-04481: Grunty budowlane badania próbek gruntu.