

ZYGMUNT MEYER¹, ROMAN BEDNAREK², MARIUSZ KOWALÓW³

WPŁYW ZMIAN PARAMETRÓW GRUNTOWYCH NA SZYBKOŚĆ KONSOLIDACJI TORFU

1. Wstęp

Jednoosiowa teoria konsolidacji gruntów została sformułowana przez Terzagiego [3]. Teoria ta zakłada, iż warstwa konsolidowana poddana jest obciążeniu zewnętrznemu, najczęściej nasypem z innego gruntu i w ten sposób uruchamia się zjawisko filtracji wymuszonej w kierunku pionowym. Nadwyżka wody oprowadzona jest na zewnątrz na poziom terenu. Uzyskana w ten sposób objętość przeznaczona jest na osiadanie gruntu poprzez zmniejszenie porowatości. Teoria ta zakłada, że parametry gruntu konsolidowanego nie zmieniają się w czasie. Badania analityczne i terenowe przeprowadzone w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej [1, 2] wskazują, że w miarę jak zmienia się porowatość gruntu, na skutek osiadania, rośnie moduł ściśliwości oraz maleje współczynnik filtracji w torfie. Wzrost modułu ściśliwości wraz z konsolidacją powoduje, że docelowe osiadanie torfu jest mniejsze niż by to wynikało z teorii liniowej, natomiast zmniejszenie się współczynnika filtracji spowolnia proces konsolidacji. Zmiana współczynnika filtracji nie wpływa bezpośrednio na wielkość osiadania ale powoduje, że osiągnięcie pewnego poziomu osiadania następuje później niż przy stałym współczynniku filtracji. Celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu zmian parametrów gruntu na proces konsolidacji.

2. Podstawowe równania

Podstawowe równania, które opisują proces konsolidacji to równanie Terzagiego:

$$s(t) = \frac{\sigma \cdot H_0}{M_0} \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp \left(-(2n+1)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{t}{T_0} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

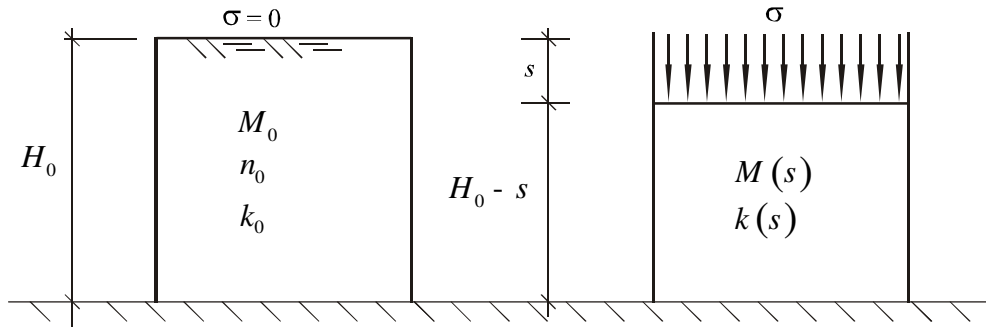
gdzie:

¹ Prof. dr hab.inż.; Politechnika Szczecińska, Katedra Geotechniki

² dr inż., Politechnika Szczecińska, Katedra Geotechniki

³ dr inż., GCO Geotechnical Consulting Office, Szczecin

$$T_0 = \frac{H^2 \cdot \gamma_w}{M_0 \cdot k_0} \quad (2)$$



Rys. 1 Schemat próbki gruntu przyjęty do analizy

Badanie przeprowadzone w Katedrze Geotechniki Politechniki Szczecińskiej wskazuje, że parametry gruntu zmieniają się w następujący sposób:

$$M(s) = M_0 \cdot \left(1 - \frac{s}{n_0 \cdot H_0}\right)^{-\kappa} \quad (3)$$

$$k(s) = k_0 \cdot \left(1 - \frac{s}{n_0 \cdot H_0}\right)^{\kappa_f} \quad (4)$$

Na podstawie tych równań można otrzymać też, że:

$$s(\sigma) = n_0 \cdot H_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0}\right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}}\right] \quad (5)$$

Aby można było uwzględnić zmienne parametry gruntu możemy wyprowadzić następujące podstawienia. Za występujący w równaniu Terzaghi (1) człon stały, który mnoży nawias:

$$H_0 \frac{\sigma}{M_0} \quad (6)$$

podstawiamy człon zależny od osiadania s w postaci:

$$H_0 \frac{\sigma}{M_*(s)} \quad (7)$$

Obliczenie wielkości $M_*(s)$ odbywa się zgodnie z zależnością (3). Mamy:

$$M_*(s) = M_{0*} \cdot \left(1 - \frac{s}{n_0 \cdot H_0}\right)^{-\kappa} \quad (8)$$

Wielkość zastępczego modułu obliczeniowego $M_*(s)$ otrzymamy z warunku $t \rightarrow \infty$ kiedy $\lim_{t \rightarrow \infty} s = s_\infty$. Mamy wtedy z zależności (5)

$$s_{\infty}(\sigma) = n_0 \cdot H_0 \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] \quad (9)$$

Natomiast z zależności (7) otrzymamy:

$$s_{\infty}(\sigma) = H_0 \frac{\sigma}{M_*(s_{\infty})} \quad (10)$$

Po porównaniu zależności (9) i (10) otrzymamy:

$$M_*(s_{\infty}) = \frac{\frac{1}{n_0} \cdot \sigma}{\left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right]} \quad (11)$$

Możemy teraz wrócić do określenia stałej M_{0*} i do obliczenia zmiennego zastępczego modułu $M_*(s)$. Porównując zależności (8) i (11) i podstawiając za $s = s_{\infty}$ we wzorze (8) tak jak to wynika z równania (9) otrzymamy:

$$M_{0*} = \frac{\frac{1}{n_0} \cdot \sigma}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right]} \quad (12)$$

Ponadto uzmienniamy stałą czasową:

$$T_0(s) = \frac{H^2 \cdot \gamma_w}{M(s) \cdot k(s)} = T_0 \cdot \left(1 - \frac{s}{n_0 \cdot H_0} \right)^{\kappa - \kappa_f} \quad (13)$$

gdzie funkcje $M(s)$ oraz $k(s)$ są opisane wzorami (3) i (4). Pionowe osiadanie s jest funkcją czasu i mamy $s = s(t)$. Wielkości $M(s)$ oraz $k(s)$ są rzeczywistym chwilowym modułem ściśliwości oraz chwilowym współczynnikiem filtracji.

Przy założeniu (7) oraz (8) równanie konsolidacji staje się nieliniowe i nie można go rozwiązać w postaci zamkniętej funkcji analitycznej. Ponieważ jest to równanie typu parabolicznego względem czasu uzyskanie dobrej zbieżności przy zastosowaniu metod numerycznych jest bardzo skomplikowane. Dlatego autorzy zaproponowali poniższe rozwiązanie, które z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością pozwala uwzględnić zmiany parametrów gruntu w procesie konsolidacji. Rozwiązanie, to zasada się na uproszczeniu, że w następnym kroku czasowym t_{i+1} moduł ściśliwości oraz współczynnik filtracji bierzemy z korku poprzedniego t_i . Jeżeli krok czasowy nie jest zbyt duży, to możemy uzyskać satysfakcjonującą dla celów praktycznych obliczeń dokładność.

Mamy dla kroku czasowego t_{i+1} :

$$M_{i+1} = M(s_i) \quad (14)$$

$$k_{i+1} = k(s_i) \quad (15)$$

$$T_{i+1} = T_0 \cdot \left(1 - \frac{s_i}{n_0 \cdot H_0}\right)^{\kappa - \kappa_f} \quad (16)$$

i wtedy

$$s_{i+1} = H_0 \cdot \frac{\sigma}{M_{0*}} \cdot \left(1 - \frac{s_i}{n_0 \cdot H_0}\right)^{\kappa} \left\{1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp\left(- (2n+1)^2 \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{t}{T_{i+1}}\right)\right]\right\} \quad (17)$$

W ten sposób ustalając krok czasowy otrzymamy naszą wartość s_i .

3. Przykład obliczeniowy

Przedstawioną w niniejszej pracy metodę przedstawiono w przykładzie obliczeniowym. Do obliczeń przyjęto następujące dane wejściowe:

$H_0 = 8m$, $n_0 = 0,6$, $M_0 = 200kPa$, $k_0 = 10^{-6}m/s$, $\sigma = 50kPa$. Dodatkowo przyjęto: $\kappa = 1,86$ oraz $\kappa_f = 7,5$.

Obliczenia przeprowadzono wykorzystując wcześniejsze zależności:

$$s_{\infty}(\sigma) = n_0 \cdot H_0 \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0}\right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}}\right] = 1,438m$$

Odpowiednie zastępcze moduły obliczeniowe do prognozy osiadania w czasie wynoszą:

$$M_{0*} = \frac{\frac{1}{n_0} \cdot \sigma}{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0}\right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}}\right]} = 143,42kPa$$

$$M_*(s_{\infty}) = \frac{\frac{1}{n_0} \cdot \sigma}{\left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0}\right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}}\right]} = 278,14kPa$$

Można też sprawdzić ze wzoru (10) czy otrzymamy zgodność:

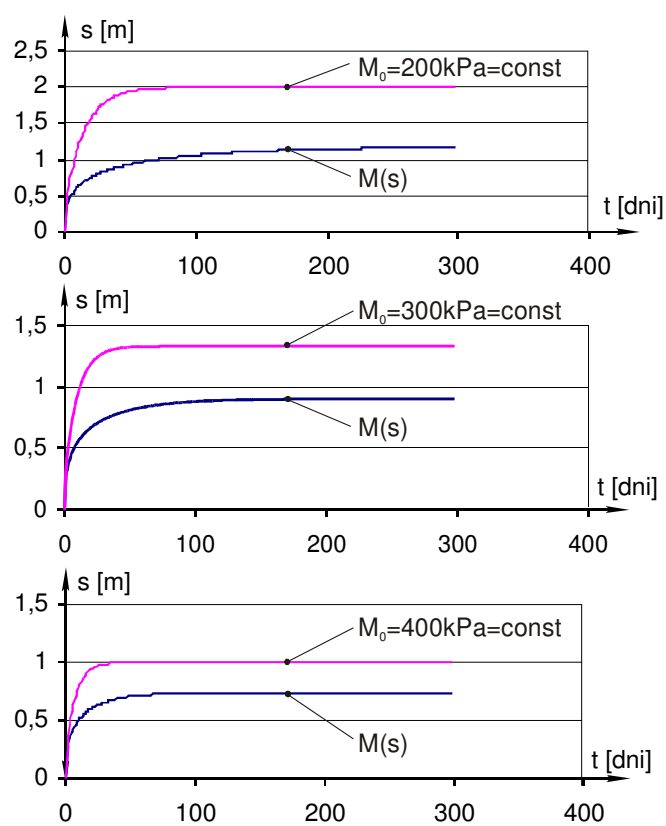
$$H_0 \frac{\sigma}{M_{0*}} \left(1 - \frac{s_{\infty}}{n_0 \cdot H_0}\right)^{\kappa} = 1,438m = s_{\infty}$$

Ponadto należy zaznaczyć, że zastępczy moduł ściśliwości gruntu po zakończeniu konsolidacji będzie wynosił:

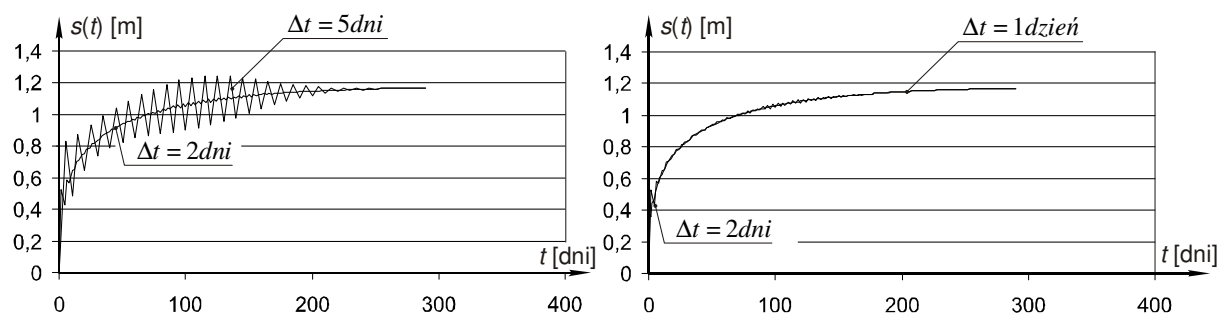
$$M(s_\infty) = M_0 \cdot \left(1 - \frac{s_\infty}{n_0 \cdot H_0}\right)^{-\kappa} = 390 \text{ kPa}$$

Oznacza to, że obliczenia zostały przeprowadzone poprawnie. Dla przyjętych na wstępie wielkości wejściowych oraz zastępczego modułu obliczeniowego M_{0*} przeprowadzono obliczenia numeryczne zgodnie z zależnościami (13, 14, 15, 16, 17).

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 2 i rys. 3.



Rys. 2 Wykresy zależności $s = s(t)$ dla wybranych wielkości M_0 dla modułu stałego i zmieniającego się wraz z osiadaniem



Rys. 3 Wpływ długości kroku czasowego na obliczenia osiadań $s(t)$

Wyniki obliczeń przedstawione na rysunkach 2 oraz 3 potwierdzają możliwość wykorzystania proponowanej metody rozwiązania zadania konsolidacji przy zmiennych parametrach. Uzyskane wyniki oznaczają, że w czasie konsolidacji moduł zwiększa się

$$200kPa < M < 390kPa$$

natomiast współczynnik filtracji maleje:

$$10^{-6} m/s > k > 0,7 \cdot 10^{-7} m/s$$

stała czasowa T_0 zmienia się w granicach:

$$37dni < T_0 < 272dni$$

Krok czasowy Δt przyjęty do obliczeń nie powinien przekraczać jednego dnia. Wiadomo, że filtracja praktycznie ustaje i konsolidacja kończy się po czasie $t = T_0(s_\infty)$. Oznacza to w rozpatrywanym przypadku, że $T_0(s_\infty) = 272dni$ obliczone przy pomocy wzoru (13).

4. Wnioski

– W pracy przedstawiono metodę obliczania osiadania warstwy torfów w czasie konsolidacji z uwzględnieniem zmian parametrów gruntu w procesie konsolidacji.

– Przeprowadzone obliczenia, które stanowią przykład zmian osiadania wskazują, że dla celów praktycznych obliczeń kroczy czasowy Δt , który odpowiada skali logarytmicznej $\frac{1}{10} \log_{10} T_0$, aby uzyskać dokładność rzędu 3 cm.

– Z przeprowadzonej analizy i przykładowych obliczeń wynika, że w praktycznych obliczeniach inżynierskich można stosunkowo szybko uzyskać wielkość osiadania warstwy konsolidowanej z uwzględnieniem zmian parametrów gruntu.

– Osiadanie uwzględniające zmiany parametrów gruntu jest mniejsze od tego, które wynika z przyjęcia $M_0, k_0 = const$, w praktycznych obliczeniach nawet o 30%. Ma to znaczenie przy projektowaniu przeciążeń, które powinny spoziomować powierzchnię terenu po konsolidacji.

Oznaczenia

- H_0 – miąższość warstwy konsolidowanej ,
 i – indeks sumowania,
 k – współczynnik filtracji,
 k_0 – współczynnik filtracji gruntu przed przystąpieniem do konsolidacji,
 M – moduł ścisłości gruntu konsolidowanego w chwili t ,
 M_0 – moduł ścisłości gruntu konsolidowanego przed obciążeniem,
 M_* – zastępczy moduł obliczeniowy,
 M_{0*} – zastępczy stały moduł obliczeniowy,
 n_0 – porowatość warstwy konsolidowanej przed przeciążeniem,
 s – osiadanie warstwy konsolidowanej pod obciążeniem,
 s_∞ – docelowe osiadanie warstwy konsolidowanej,
 t – czas,
 κ – wykładnik potęgi we wzorze na zmianę modułu ścisłości,
 κ_f – wykładnik potęgi we wzorze na zmianę współczynnika filtracji,
 σ – obciążenie warstwy konsolidowanej

Literatura

- [1] Dereczenik M., Seul C.: Wpływ konsolidacji na zmianę współczynnika filtracji dla gruntów organicznych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/1992
- [2] Meyer Z., Dereczenik M.: Effect of consolidation on compressibility modulus in organic soil. The second international seminar on environment protection – regional problems. Kalmar, Sweden, September 7-8 1992
- [3] Terzaghi K.: Theoretical Soil Mechanics, New York 1948

Streszczenie

W artykule autorzy opisują wpływ zmian parametrów gruntu na proces konsolidacji. Przedstawiono metodę obliczania osiadania warstwy torfów w czasie konsolidacji z uwzględnieniem zmian parametrów gruntu w procesie konsolidacji. W praktycznych obliczeniach inżynierskich można stosunkowo szybko uzyskać wielkość osiadania warstwy konsolidowanej z uwzględnieniem zmian parametrów gruntu.