



ZYGMUNT MEYER, *meyer@zut.edu.pl*

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Katedra Geotechniki, al. Piastów 50, 70-310 Szczecin

ANALIZA PRZYCZYŃ AWARII OBWAŁOWAŃ POLA REFULACYJNEGO PODCZAS KONSOLIDACJI TORFÓW

THE ANALYSIS OF FAILURE OF DIKE DURING CONSOLIDATION OF PEAT

Streszczenie W pracy przedstawiono analizę warunków konsolidacji torfu w podłożu pola refulacyjnego na Ostrowie Grabowskim w Szczecinie. W szczególności przeanalizowano stateczność wałów opaskowych na refulowanym polu oraz przyczynę awarii wału opaskowego na tym polu.

Abstract The paper presents the analysis of consolidation of peat in foundation of hydraulics fill in Szczecin at Ostrow Grabowski. The analysis of dike stability together with consideration of failure of the dike is also presented.

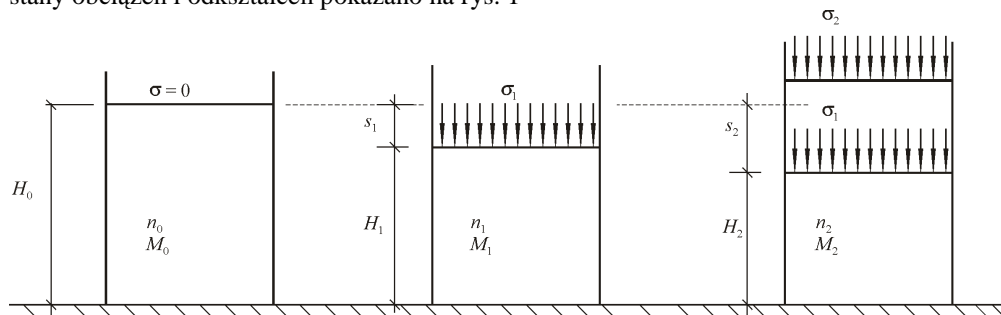
1. Wstęp

Tereny rozwojowe portu w Szczecinie obejmują obszar Ostrowa Grabowskiego. Jest to półwysep, który utworzony został przez odnogi ujścia Odry. Teren ten charakteryzuje się tym, że zbudowany jest z gruntów organicznych. Pierwotnie miąższość torfów wynosiła ok. 4 m do 12 m. Nad torfami znajdowała się warstwa nasypowa o małej miąższości. W celu przygotowania tego terenu pod przyszłe inwestycje, takie jak drogi dojazdowe, place składowe czy terminal kontenerowy – w ostatnich 50 latach przeprowadzono liczne prace refulacyjne. W ten sposób na znacznej części Ostrowa Grabowskiego skonsolidowano torfy. Warstwa refulatu posiada różną miąższość od 2 do 6 m. W efekcie polepszyły się moduły ścisłości torfu i aktualnie wynoszą od 600 do 900 kPa. Z uwagi na ciągle jeszcze dużą miąższość warstwy torfu (nawet 8 m) bezpośrednie posadowienie obiektów nawet lekkich, wywołuje znaczne osiadanie nawet do 0,5 m (nieraz więcej). W związku z tym podjęto decyzję o wykonaniu w wybranych miejscach kolejnej konsolidacji. Istniejąca już wcześniej wykonana warstwa nasypowa umożliwiła wykonanie wałów opaskowych o znacznej wysokości (nawet do 3,0 m). To z kolei miało przyspieszyć zarefulowanie pola pozwalając na zalewanie warstwą pulpy o dużej głębokości. Podczas prac na jednym z odcinków doszło do przzerwania wału opaskowego. W pracy przeanalizowano prawdopodobne przyczyny awarii wału.

2. Matematyczny opis zjawiska

Zjawisko konsolidacji gruntów słabych obciążonych warstwą nasypową posiada bogatą literaturę. Teorię w tym zakresie przedstawił Terzaghi, a następnie badania te były rozwijane przez den Haana, Wiłuna, Lechowicza, Meyera [1, 2, 4, 5,]. Podstawową trudnością w analizie procesu konsolidacji jest opisanie jak zmienia się moduł ścisłości konsolidowanego torfu w miarę jak zwiększa się osiadanie. Do analizy przyjęto zweryfikowaną dla warunków

ujęcia Odry metodę zaproponowaną przez Meyera [1]. Wynik tej metody można przedstawić w postaci wzorów, jak moduł ścisłości oraz osiadanie torfów zależą od naprężeń wywołanych warstwą refulatu (nasypową). Wzory te można również stosować przy obliczaniu dalszego osiadania, jakie zostanie wywołane obciążeniem użytkowym. Schematycznie stany obciążeń i odkształceń pokazano na rys. 1



Rys. 1. Schemat obciążenia kolumny torfu

Na rys. 1 przyjęto następujące oznaczenia: H_0 – miąższość warstwy torfu nieskonsolidowanego; H_1 – miąższość warstwy torfu skonsolidowanego obciążeniem σ_1 ; H_2 – miąższość warstwy torfu ściskanego dodatkowo obciążeniem σ_2 ; wartości M oznaczają odpowiednio moduły ścisłości, natomiast n oznacza odpowiednio porowatość torfu.

W praktyce często badania miąższości oraz parametrów gruntowych prowadzimy dla stanu „1” tj. po zakończeniu konsolidacji warstwą nasypową, która wywołuje obciążenie stanu torfów σ_1 . W takiej sytuacji znaczenie posiada znalezienie związku, który pozwoli na określenie parametrów torfu nieskonsolidowanego, czyli fazy „0”. Podstawowa zależność opisująca te zmiany wynika z propozycji Glazera [3]

$$M(s) = M_0 \cdot \left[\frac{e_0}{e(s)} \right]^\kappa \quad (1)$$

gdzie:

e_0 – wskaźnik porowatości torfu nieskonsolidowanego,

$e(s)$ – wskaźnik porowatości torfu po wymuszeniu osiadania s ,

κ – bezwymiarowy parametr określony w edometrze na podstawie krzywej ściskania torfu.

Zależność (1) można przedstawić jako:

$$M(s) = M_0 \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{s}{n_0 H_0}} \right]^\kappa \quad (2)$$

Z drugiej strony na podstawie literatury Wiłun [5] przyjmuje się związek pomiędzy zmianami osiadania i obciążenia jako:

$$M(s) = \frac{1}{H_0} \cdot \frac{d\sigma}{ds} \quad (3)$$

Z zależności tych otrzymamy podstawowe wzory opisujące zmianę modułu ścisłości i osiadania, jako funkcję obciążenia σ . Otrzymamy:

$$S = n_0 \cdot H_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] \quad (4)$$

oraz

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

Badania przeprowadzone na próbkach torfu pobranych z Ostrowa Grabowskiego wskazują, że z dostateczną dla celów praktycznych obliczeń dokładnością, można przyjąć parametr κ jako

$$1,68 < \kappa < 1,83$$

W praktycznych obliczeniach najczęściej przyjmuje się $\kappa = 1,75$. Parametr ten zależy głównie od porowatości początkowej n_0 i dla torfów o porowatości $n_0 = 0,66$ mamy $\kappa = 1,68$, natomiast dla torfów o porowatości $n_0 = 0,80$ mamy $\kappa = 1,83$. Dokładną zależność analityczną trudno jest ustalić. Należałoby dodatkowo uwzględnić stopień rozłożenia oraz zawartość części mineralnych w torfie. Wydaje się również, że parametr ten zależy od obciążenia σ . Dotychczasowe badania wskazują na możliwość wykorzystania poniższej zależności w obliczeniach przybliżonych

$$\kappa = 2,2 \cdot \sigma^{-\frac{1}{18}} \quad (6)$$

gdzie: σ [kPa] – jest obliczeniem konsolidacyjnym. Zależność pomiędzy porowatością n_0 oraz n można określić w postaci przybliżonej (rys. 1)

$$n_1 = n_0 - \frac{S_1}{H_0} \quad (7)$$

Ponadto z zależności geometrycznych mamy:

$$H_0 = H_1 + S_1 \quad (8)$$

Jeżeli znane jest obciążenie warstwą refulatu, które powoduje miąższość H_1 , to możemy zapisać:

$$S_1 = n_0 \cdot H_0 \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_0} \cdot \frac{\sigma}{M_0} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] \quad (9)$$

Jeśli znamy parametry torfu po pierwszej konsolidacji: H_1 , n , M , to możemy obliczyć parametry torfu pierwotnego (przed obciążeniem) cofając się w obliczeniach tj. $\sigma = \sigma_1$. Wtedy otrzymamy:

$$S_1 = n_1 \cdot H_1 \left[1 - \left(1 - \frac{\kappa - 1}{n_1} \cdot \frac{\sigma_1}{M_1} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] \text{ i wtedy } s_1 < 0; \quad (10)$$

$$M_0 = M_1 \left[1 - \frac{\kappa - 1}{n_1} \cdot \frac{\sigma_1}{M_1} \right]^{\frac{-1}{\kappa - 1}}$$

Możemy również obliczyć efekt drugiej konsolidacji po wykonaniu kolejnej warstwy przeciążającej oraz przyłożeniu w ten sposób dodatkowych obciążeń σ_2 :

$$S_2 = n_1 \cdot H_1 \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_1} \cdot \frac{\sigma_2}{M_1} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right]; \quad M_2 = M_1 \left[1 + \frac{\kappa - 1}{n_1} \cdot \frac{\sigma_2}{M_1} \right]^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \quad (11)$$

Jeżeli po wykonaniu drugiej konsolidacji przyłożymy obciążenia użytkowe np. od obciążenia budowlą $\Delta\sigma$, wówczas obciążenie to wywoła osiadanie ΔS równe

$$\Delta S = n_1 \cdot H_1 \left[\left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_1} \cdot \frac{\sigma_2}{M_1} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{n_1} \cdot \frac{\sigma_2 + \Delta\sigma}{M_1} \right)^{\frac{-1}{\kappa - 1}} \right] \quad (12)$$

W dalszej części pracy przedstawiono przybliżoną postać tego wzoru przy założeniu, że druga konsolidacja zakończyła się.

Planowanie drugiej konsolidacji ma na celu takie dobranie ciężaru nakładki σ_2 , aby dla planowanych obciążeń $\Delta\sigma$, osiadanie spowodowane tymi obciążeniami dodatkowymi ΔS było mniejsze od dopuszczalnych

$$\Delta S < \Delta S \text{ dop.}$$

3. Przykład obliczeniowy

Dla warunków Ostrowa Grabowskiego na podstawie badań laboratoryjnych po pierwszej konsolidacji otrzymano następujące parametry torfu: $n_1 = 0,68$; $M_1 = 600$ kPa; $\sigma_1 = 75$ kPa; $H_1 = 5,5$ m. Przyjmując, że $\kappa = 1,75$ otrzymamy: $S_1 = 0,73$ m, co daje nam $H_0 = 6,23$ m oraz $M_0 = 550$ kPa.

Ponieważ przedmiotem projektu jest budowa placu składowego oraz drogi, przyjmując obciążenie użytkowe $\Delta\sigma = 50$ kPa otrzymamy osiadanie od tego obciążenia $S_2 = 0,40$ m. Jest to osiadanie za duże, dlatego postanowiono przeprowadzić drugą konsolidację. Wykonano warstwę nasypową o wysokości 3÷4 m z refulatu. Oznaczało to przyłożenie dodatkowego obciążenia $\sigma_2 = 50$ kPa.

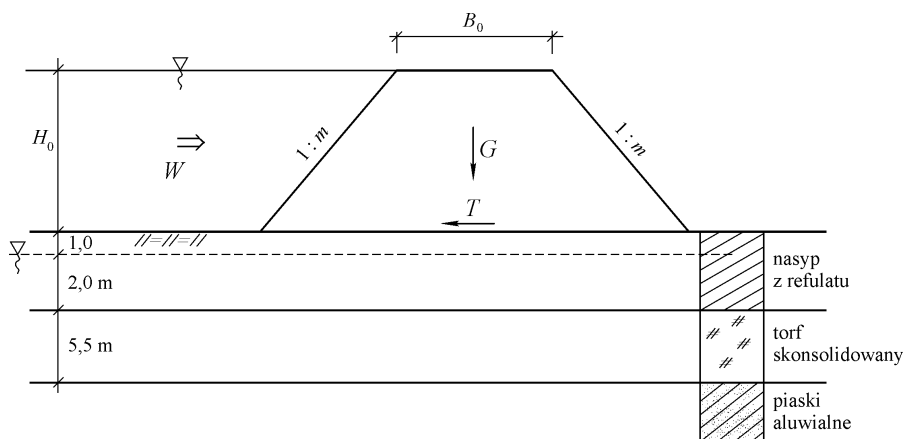
Zakładając, że konsolidacja druga zakończyła się po wybudowaniu drogi lub placu manewrowego od obciążenia użytkowego dodatkowe osiadanie wyniesie:

$$\Delta S = H_1 \cdot \frac{\Delta \sigma}{M_1} \left[1 - \frac{\kappa}{2} \cdot \frac{\Delta \sigma + \sigma_2}{n_1 \cdot M_1} \right] \quad (13)$$

po podstawieniu za $\Delta \sigma = 50$ kPa; $\sigma_2 = 60$ kPa; otrzymamy $\Delta S = 0,1$ m. Oznacza to, że można rozważać posadowienie bezpośrednio tego rodzaju lekkich konstrukcji.

4. Obliczenie stateczności wału osłonowego

Wykonanie dodatkowego nadkładu na rozpatrywanym polu refulacyjnym odbywało się klasycznie poprzez wykonanie wałów opaskowych z materiału lokalnego, a następnie wypełnienie kwater urobkiem z pogłębienia. Schematycznie na rys. 2 pokazano przekrój poprzeczny przez wał opaskowy, który miał służyć do wykonania nadkładu.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przez wał opaskowy posadowiony na nasypie z refulatu

Do obliczenia stateczności wału przyjęto, że poziom zalania kwater sięga korony nasypu oraz że siłą przesuwającą nasyp jest napór poziomy wody na wał. Równanie równowagi na przesuw ma znaną postać:

$$T = G \cdot \operatorname{tg} \phi > W \quad (14)$$

gdzie: G – jest siłą ciężkości wału z uwzględnieniem wyporu wody, która przesiąka przez wał, W – jest poziomym naporem wody na wał, natomiast T – to siła tarcia w powierzchni poślizgu, a ϕ – kąt tarcia wewnętrzznego gruntu w poziomie ścięcia.

Poszczególne siły składowe występujące w równaniu równowagi (14) mają postać:

$$G = (1 - n) \cdot (B_0 + m_1 H_0) \cdot H_0 (\gamma_s - \gamma_w) \quad (15)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w H_0^2 \quad (16)$$

Po podstawieniu powyższych zależności otrzymamy równanie, na obliczenie współczynnika pewności N wynosi:

$$N = \frac{T}{W} = \frac{2(1-n) \cdot (B_0 + M_H)(\gamma_s - \gamma_w) \cdot \operatorname{tg} \phi}{\gamma_w \cdot H_0} \quad (17)$$

W rozpatrywanym przypadku wystąpiły następujące warunki ścięcia $H_0 = 3$ m; $B_0 = 1,0$ m; $m = 1$; $n = 24\%$; $\gamma_s = 26,5$ kN/m³; $\gamma_w = 10$ kN/m³; $\phi = 16^\circ$. Po podstawieniu otrzymamy $N = 0,96$ co oznacza, że zostało przekroczone kryterium ścięcia.

Można również rozważyć kryterium ścięcia jako $N = 1$ i wtedy otrzymamy równanie, które podaje jak należy dobrać wymiary wału w przekroju poprzecznym aby zachować równowagę. Mamy:

$$\frac{B_0}{H} = \frac{N \cdot \operatorname{ctg} \phi}{2(1-n) \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)} - m \quad (18)$$

Wzór ten pozwala przyjąć przekrój poprzeczny wału opaskowego w zależności od założonego współczynnika pewności N . W rozpatrywanym przypadku dla np. $N = 1,5$ należało przyjąć $B_0 = 3,0$ m.

5. Wnioski

1. W pracy przedstawiono analizę warunków powstania awarii wału opaskowego podczas prac związanych z konsolidacją gruntów organicznych.
2. Szczegółowej analizie poddano efekt konsolidacji, który miał doprowadzić do poprawy gruntu słabego, tak aby obiekty liniowe można było posadzić bezpośrednio.
3. Okazuje się, że dopiero po zakończeniu drugiej konsolidacji można uzyskać takie wzmocnienie gruntów organicznych, że istnieje możliwość bezpośredniego posadowienia obiektów lekkich o nacisku od 30 do 50 kPa.
4. W pracy przeanalizowano również przyczyny awarii wału opaskowego, który umożliwił wykonanie nadkładu na kwaterze poprzez zalanie urobkiem z prac refulacyjnych. Bezpośrednią przyczyną było utrzymywanie się przez długi okres czasu wysokiego napełnienia kwatery, co pozwoliło na uruchomienie mechanizmu ścięcia wału w podstawie. Matematyczny opis tego przypadku przedstawiono w pracy.
5. Przeprowadzone badania zmiany parametrów gruntowych torfu w wyniku konsolidacji wskazują na potrzebę dalszych badań terenowych, które umożliwią głębszą weryfikację wzorów przedstawionych w rozdziale 2. W szczególności wydaje się, że parametr K jest funkcją σ i maleje w miarę wzrostu tych naprężeń, natomiast parametr M_0 , który występuje w tych wzorach jest większy od edometrycznego modułu ściśliwości nawet o 50%.

Literatura

1. Meyer Z.: Estimation of Soil Parameters for Consolidated Layer. The Second International Seminar on Environment Protection – Regional Problems, Kalmar Sweden 1992.
2. Den Haan E. J., Termaat R., Edil T.: Advances in Understanding and Modelling the Mathematical Behaviour of Peat. A. A. Belkna, Rotterdam 1994.
3. Glazer Z.: Mechanika gruntów. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1985.
4. Lechowicz Z.: Współczesne kierunki badań gruntów organicznych. Seminarium Naukowo-Techniczne „Współczesne Problemy Geoinżynierii w Regionie Szczecińskim 1996.
5. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.