

Zbigniew SIKORA, Rafał OSSOWSKI
Politechnika Gdańska

UWAGI NA TEMAT ZASADY NAPRĘŻEŃ EFEKTYWNYCH DLA GRUNTÓW CZĘŚCIOWO NASYCONYCH

Streszczenie. W artykule zawarto krytyczny przegląd stosowalności klasycznego wzoru naprężeń efektywnych Bishopa oraz propozycję rozszerzenia tej zasady w zastosowaniu do gruntów częściowo nasyconych z uwzględnieniem zjawisk kapilarności, ciśnienia osmotycznego i wytrzymałości strukturalnej.

SOME COMMENTS ON EFFECTIVE STRESS PRINCIPLE FOR UNSATURATED SOILS

Summary. A critical discussion on the classic Bishop principle of effective stress is presented. Subsequently a new proposal for extending of the classical Bishop's equation for unsaturated soils is given. The extension includes influence of capillarity, osmotic suction and soil structural strength behaviours.

1. Uwagi w odniesieniu do definicji Bishopa

Zasada naprężeń efektywnych sformułowana przez Karla Terzaghiego stanowi jeden z fundamentów nowoczesnej mechaniki gruntów. Stworzona w oryginale dla gruntów nasyconych była, począwszy od Bishopa [1], wielokrotnie modyfikowana i rozszerzana na ośrodki nienasycone. We wzorze Bishopa

$$\mathbf{T}' = (\mathbf{T} - u_a \mathbf{I}) + \chi(u_a - u_w) \mathbf{I} \quad (1)$$

kluczową rolę odgrywa parametr χ , który jest funkcją stopnia wilgotności ośrodka. Dla $\chi=0$ definiuje się ośrodek suchy, a dla $\chi=1$ ośrodek nasycony. Poza tymi skrajnymi przypadkami $0 < \chi < 1$. Najczęściej stosuje się aproksymację parametru $\chi = S_r$, jednak jak wynika z prac [2,3], wartość χ zależy nie tylko od zawartości wody w gruncie, ale też od rodzaju gruntu i jego

charakterystycznej krzywej suszenia i zawilgocenia. Fakt ten wskazuje na to, że definicja parametru χ z fizycznego punktu widzenia jest niejednoznaczna [4]. Jeżeli parametr ten określimy jako współczynnik wilgotności powierzchniowej $\chi = S_w/S_s$, gdzie S_w jest polem powierzchni styku wody ze szkieletem gruntu, zaś S_s całkowitą powierzchnią szkieletu, to wartość χ jest różna w różnych miejscach analizowanej próbki gruntu, a zatem można ją zdefiniować jedynie w sensie średnim.

Istotne jest, że wyprowadzenie wzoru Bishopa z pominięciem efektów osmotycznego ssania i napięcia powierzchniowego nie daje wytłumaczenia ujemnego ciśnienia porowego. Składniki po prawej stronie wzoru Bishopa mają zawsze wartość dodatnią, a przyłożenie podciśnienia porowego powoduje, że naprężenia efektywne są większe od naprężeń całkowitych netto ($\mathbf{T}-p_a\mathbf{I}$). Fakt ten skłania wielu badaczy do traktowania podciśnienia porowego jako składnika obniżającego wytrzymałość gruntu na ścinanie w gruntach nienasyconych.

We wzorze Bishopa, oprócz ciśnienia wody p_w , występuje ciśnienie powietrza w porach p_a . Podciśnienie porowe, będące różnicą ciśnienia obu faz płynnych $p^* = p_a - p_w$, jest z definicji aksjatorową miarą naprężenia, a zatem może powodować jedynie zmianę odkształcenia objętościowego. Tyle teoria. Okazuje się jednak, że wypadkowe podciśnienie porowe p^* posiada część dewiatorową [4], co może prowadzić do odkształceń postaciowych, a co za tym idzie, wywoływać dylatację lub kontrakcję masy gruntu. Dzieje się tak, ponieważ powietrze i woda pozostaje w kontakcie ze szkieletem jedynie częściowo i to w sposób niesymetryczny. Zatem kierunki działania sił wypadkowych są bardzo złożone, zgodnie ze stopniem wilgotności i strukturą porów w różnych punktach ośrodka gruntowego. W takim przypadku można stwierdzić, że założenie o aksjatorowej naturze podciśnienia porowego jest założeniem niedoskonałym, a zatem istnieje potrzeba przynajmniej jakościowej oceny wpływu naprężeń dewiatorowych w analizie ośrodka gruntowego.

Dla gruntów nawodnionych, gdzie wszystkie pory są wypełnione wodą, oraz przy założeniu braku ściśliwości wody ($K^w \gg K^s$), wyklucza się możliwość ścinania w warunkach bez odpływu. Stąd też żadna siła nie jest przekazywana na szkielet gruntowy, a w związku z tym nie występuje deformacja ośrodka. Grunt może podlegać deformacji tylko wtedy, gdy ciśnienie w porach zmienia się, co w wyniku daje zmianę naprężeń efektywnych. Dla gruntu nienasyconego istnieje możliwość deformacji, ponieważ pory napełnione jednocześnie wodą i powietrzem są ściśliwe. Przyłożone obciążenie jest przejmowane jednocześnie przez szkielet

jak i przez oba płyny wypełniające pory, a w związku z tym deformacja występuje natychmiast po przyłożeniu obciążenia. Jeśli wytrzymałość gruntu pochodząca ze struktury gruntu (szkielet) jest większa niż przykładane naprężenie, zmiana deformacji nie może być obserwowana, chociaż szkielet przejmuje część obciążenia. Stąd ten rodzaj naprężenia przenoszony przez szkielet może być scharakteryzowany jako ten, który nie daje deformacji gruntu i w związku z tym nie może być rozważany jako naprężenie efektywne w pełnym sensie, tj. zgodnie z definicją. Istotne jest, że to zjawisko występuje również w gruntach nasyconych, w których wytrzymałość gruntu jest zazwyczaj pomijalnie mała w analizie zagadnień praktycznych. Wzór Bishopa nie uwzględnia efektu wytrzymałości strukturalnej, bierze on pod uwagę tylko efekty podciśnienia, co jest zbyt dużym uproszczeniem dla opisu gruntów nienasyconych mających dużą wytrzymałość strukturalną. Zjawisko wytrzymałości strukturalnej ma szczególne znaczenie dla mechaniki gruntów zapadowych i pęczniejących (ekspansywnych); w dalszej części przedstawimy uogólnienie zasady naprężeń efektywnych, uwzględniające ww. zjawiska.

2. Propozycja zasady naprężeń efektywnych dla gruntów nienasyconych

2.1. Uwagi wstępne

Rozważając zachowanie gruntów nienasyconych i złożone efekty opisane w poprzednim podrozdziale, należy zwrócić uwagę na podobieństwa i różnice w zachowaniu gruntów nasyconych i nienasyconych. Wychodząc z klasycznej definicji naprężeń efektywnych (1), możemy bezpiecznie przyjąć, że całkowite naprężenie \mathbf{T} zdefiniowane na dowolnym przekroju w masywie gruntów nienasyconych dzieli się na składowe: naprężenie przekazywane przez szkielet gruntu \mathbf{T}_s i naprężenie przekazywane przez mieszaninę powietrza i wody w porach gruntu p_F (tzw. równoważne ciśnienie porowe), tj:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_s + p_F \mathbf{I} \quad (2)$$

Naprężenia efektywne w gruncie rozumie się tutaj nie tylko w sensie naprężeń przenoszonych przez szkielet gruntowy, ale również - a może przede wszystkim - w sensie tych naprężeń, które powodują deformację gruntu. Jeśli w gruncie występuje całkowite naprężenie, mniejsze od strukturalnej wytrzymałości, to aktualny stan naprężenia jest całkowicie przejmowany przez szkielet gruntu, podczas gdy ciśnienie porowe jest równe zeru.

Taki stan naprężenia trudno nazwać efektywnym, z uwagi na brak deformacji gruntu. Jeżeli naprężenie całkowite jest większe niż wytrzymałość strukturalna gruntu nienasyconego T_0 , wtedy naprężenie efektywne T_s' równe jest różnicy między naprężeniem przyjmowanym przez szkielet gruntu T_s i wytrzymałością strukturalną gruntu T_0 :

$$T_s' = T_s - T_0 \mathbf{I}, \quad (3)$$

gdzie wytrzymałość strukturalna T_0 jest rozumiana jako ogólna wytrzymałość gruntu, będąca sumą składowych pochodzących od sił podciśnienia, sił cementyzacji i sił wewnętrznych. Podciśnienie jest wypadkową zjawisk fizykochemicznych zachodzących na powierzchni granicznej cząstek gruntu. Na wartość całkowitego podciśnienia wpływ mają:

- o siła potencjału elektrokinetycznego, jej efektem jest przyciąganie spolaryzowanych molekuł wody, kompensujących ładunek elektryczny cząstek gruntu (zazwyczaj ujemny),
- o siła przyciągania wody związanej wokół ziarna mineralnego gruntu (wody błonkowej),
- o zjawisko kapilarności (adhezja i napięcie powierzchniowe),
- o zjawisko osmozy - tzw. osmotyczne podciśnienie spowodowane aktywnością powierzchni granicznej cząstek gruntu, której koncentracja jonów jest większa niż wody na zewnątrz.

Pierwsze trzy siły są zwykle nazywane siłami ssania matrycowego [5], zaś czwarta siła nazywana jest podciśnieniem osmotycznym. Wartości wszystkich składników podciśnienia są ujemne, co oznacza, że ich energia potencjalna jest mniejsza od energii potencjalnej wody swobodnej na tym samym poziomie.

Ciśnienie porowe przenoszone przez płyny w porach gruntu (woda + powietrze) p_F jest różne od ciśnienia wody w porach gruntu nasyconego. Ciśnienie wody w porach gruntu nasyconego działa na cząstki gruntu izotropowo i nie może wywoływać przemieszczenia cząstek i co za tym idzie, generować deformacji szkieletu gruntowego, podczas gdy ciśnienie mieszaniny płynów w gruntach nienasyconych składa się z ujemnego ciśnienia wody w porach i dodatniego ciśnienia powietrza. Obydwa ciśnienia działają po przeciwnych stronach powierzchni brzegowej na styku faz woda-powietrze i przekazują swój udział do naprężeń efektywnych poprzez ich powierzchniowy kontakt z cząsteczkami gruntu. Końcowa wartość p_F reprezentująca wypadkowy efekt ciśnienia wody i powietrza na ziarna szkieletu może być rozumiana jako równoważne ciśnienie porowe. Trudność polega na wyznaczeniu

rzeczywistego udziału ciśnienia wody, powietrza w porach oraz przełożeniu tych udziałów na ciśnienie przekazywane przez szkielet i równoważne ciśnienie porowe:

$$\mathbf{T} - T_0 \mathbf{I} = \mathbf{T}_s + p_F \mathbf{I}. \quad (4)$$

Wyrażenie (4) dla warunków gruntów nasyconych z uwzględnieniem efektów struktury gruntu ma postać:

$$\mathbf{T} - T_0 \mathbf{I} = \mathbf{T}_s + p_w \mathbf{I}, \quad (5)$$

którą można uprościć do klasycznej definicji naprężeń efektywnych w przypadku, gdy wytrzymałość strukturalna gruntu jest pomijalnie mała.

2.2. Nowe sformułowanie zasady naprężeń efektywnych

Zgodnie z powyższymi rozważaniami rozszerzona zasada naprężeń efektywnych musi spełniać następujące warunki: wykazywać zgodność z podstawową zasadą naprężeń efektywnych i w sposób ciągły być przekształcalną do wyrażenia naprężeń efektywnych dla gruntów nasyconych, opisywać specjalne właściwości gruntów zapadowych i pęczniejących, w połączeniu z teorią wytrzymałości gruntu i z teorią konstytutywną.

Oryginalny wzór Bishopa nie uwzględnienia takich efektów, jak: napięcie powierzchniowe, podciśnienie osmotyczne czy wytrzymałość strukturalna gruntu. Całkowite naprężenie \mathbf{T} rozumie się jako wypadkowa sił masowych oraz obciążeń zewnętrznych. W związku z tym równanie równowagi sił działających na dowolny przekrój gruntu można zapisać w postaci:

$$\mathbf{T}A = \mathbf{T}_s A_s + p_w A_w \mathbf{I} + p_a A_a \mathbf{I} \quad (6)$$

gdzie A_s , A_w , A_a oznaczają powierzchnie kontaktów - odpowiednio dla cząstek szkieletu, wody i powietrza; A jest całkowitą powierzchnią cząstek szkieletu, zaś $\chi = A_w/A$. Zatem:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_s \frac{A_s}{A} + p_w \frac{A_w}{A} \mathbf{I} + p_a \frac{A_a}{A} \mathbf{I} = \mathbf{T}'_s + p_a \mathbf{I} - \chi(p_a - p_w) \mathbf{I}. \quad (7)$$

Jeśli uwzględni się siły napięcia powierzchniowego, ciśnienia osmotycznego oraz wytrzymałości strukturalnej gruntu, to równanie (7) – p.[4] przybierze postać:

$$(\mathbf{T} - T_0 \mathbf{I})A = \mathbf{T}_s A + p_w A_w \mathbf{I} + p_a A_a \mathbf{I} + \alpha T_t A + A_w \gamma_w (-h_c) \mathbf{I} \quad (8)$$

gdzie α jest wielkością graniczną powierzchni styku wody z powietrzem na jednostkę powierzchni ziaren gruntu, h_c potencjałem ciśnienia osmotycznego, T_0' - częścią wytrzymałości strukturalnej generowanej przez siły cementyzacji oraz siły wewnętrzne, \mathbf{T}_t - napięciem powierzchniowym, które wyrazić można w funkcji współczynnika R_s , zależnego od średnicy porów:

$$\mathbf{T}_t = \frac{1}{2}(p_a - p_w)\mathbf{I}R_s \quad (9)$$

Jeśli podstawić równanie (9) do (8), otrzymamy:

$$\mathbf{T} - T_0'\mathbf{I} = \mathbf{T}'_s + p_a\mathbf{I} - \chi(p_a - p_w)\mathbf{I} + \frac{1}{2}\alpha R_s(p_a - p_w)\mathbf{I} - \chi\gamma_w h_c\mathbf{I}, \quad (10)$$

lub po przekształceniu:

$$\mathbf{T}'_s = (\mathbf{T} - T_0'\mathbf{I}) - \left(p_a - \chi(p_a - p_w) + \frac{1}{2}\alpha R_s(p_a - p_w) - \chi\gamma_w h_c \right) \mathbf{I}. \quad (11)$$

Porównując wyrażenie (11) z (4), równoważne ciśnienie porowe płynu można wyrazić w sposób następujący:

$$p_F = p_a - \chi(p_a - p_w) + \frac{1}{2}\alpha R_s(p_a - p_w) - \chi\gamma_w h_c, \quad (12)$$

natomiast naprężenia efektywne:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}'_s &= (\mathbf{T} - p_a\mathbf{I}) - \left(T_0' - \chi(p_a - p_w) + \frac{1}{2}\alpha R_s(p_a - p_w) - \chi\gamma_w h_c \right) \mathbf{I} = \\ &= (\mathbf{T} - p_a\mathbf{I}) - \left(\frac{T_0'}{(p_a - p_w)} - \chi + \frac{1}{2}\alpha R_s - \frac{\chi\gamma_w h_c}{(p_a - p_w)} \right) (p_a - p_w)\mathbf{I} \end{aligned} \quad (13)$$

Przyjmując oznaczenia

$$\chi_0 = \frac{T_0'}{(p_a - p_w)}, \quad \chi_1 = \chi, \quad \chi_2 = \frac{1}{2}\alpha R_s, \quad \chi_3 = \frac{\chi\gamma_w h_c}{(p_a - p_w)},$$

równanie (13) przyjmuje postać:

$$\mathbf{T}'_s = (\mathbf{T} - p_a)\mathbf{I} - (\chi_0 - \chi_1 + \chi_2 - \chi_3)(p_a - p_w)\mathbf{I} \quad (14)$$

Równanie (14), uwzględniające efekty ciśnienia osmotycznego, naprężenia powierzchniowego i wytrzymałości strukturalnej, redukuje się do wzoru Bishopa (1) wtedy, gdy spełniony jest warunek: $\chi_0 = \chi_2 = \chi_3 = 0$. Współczynnik χ_0 odpowiada za wytrzymałość strukturalną gruntu, jako efekt działania sił cementacji oraz sił wewnętrznych. Współczynnik χ_1 , jest „klasycznym” współczynnikiem Bishopa. Współczynnik χ_2 przedstawiający udział sił napięcia powierzchniowego, ma wartość dodatnią i zmienia się w niewielkim przedziale wartości z uwagi na fakt, że R_s jest o rząd wielkości mniejsze od p_w . Współczynnik χ_3 jest zależny od wielkości podciśnienia osmotycznego. Jego zmiany można analizować na przykładzie gruntów pęczniejących.

Powyższa dyskusja nad mechanizmami przenoszenia naprężeń w nienasyconym ośrodku gruntowym może być istotna dla rozszerzenia zasady naprężeń efektywnych na ośrodki nienasycone. Propozycja wzoru oparta na wielkościach charakteryzujące skalę mikroskopową

prowadzi jednak do skomplikowanych procedur wyznaczenia poszczególnych współczynników równania (14) - generalnie na drodze badań laboratoryjnych. Stąd wynika potrzeba przeformułowania zasady naprężeń efektywnych na użytek praktyki inżynierskiej. Grupując współczynniki równania (14) w jeden współczynnik zastępczy:

$\bar{\chi} = \chi_0 - \chi_1 + \chi_2 - \chi_3$, możemy napisać:

$$\mathbf{T}'_s = (\mathbf{T} - p_o \mathbf{I}) - \bar{\chi}(p_o - p_w) \mathbf{I} \quad (15)$$

Współczynnik $\bar{\chi}$ przyjmuje w ten sposób zupełnie inny sens fizyczny niż oryginalny współczynnik χ Bishopa. Na podstawie badań Bligha [6] pokazano zależność $\bar{\chi}$ od ścieżki deformacji, co świadczy o złożoności struktury tego współczynnika. Dingyi [4] proponuje dodatkowo uwzględnić zależność od ścieżki naprężenia, co pozwala na praktyczne zastosowania nowej definicji (15).

3. Podsumowanie

W analizie numerycznej rzeczywistych rozwiązań konstrukcji inżynierskich, posadowionych na częściowo nasyconym podłożu gruntowym, wykorzystanie zasady naprężeń efektywnych jest sprawą kluczową. Na podstawie własnych analiz oraz wyników współpracy z Prof. Xie Dingyi i Dr Liu Fengyin z Uniwersytetu w Xian, dokonano przeglądu własności zasady naprężeń efektywnych w opisie gruntów częściowo nasyconych. Wstępne symulacje numeryczne wykazują stosowalność wymienionych propozycji w stopniu zadowalającym.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania Prof. Xie Dingyi i Dr Liu Fengyin z Uniwersytetu w Xian w Chinach za współpracę i bezcenne uwagi oraz dyskusję, a także KBN za wsparcie finansowe w ramach projektu 1578/T07/2001/20.

LITERATURA

1. Bishop, A.W.: The principle of effective stress. Tek. Ukebl. 39, 859-863, 1959.
2. Jiang, P.: A brief introduction of engineering properties of unsaturated soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 11(6), 1989, 39-59.
3. Shen, Z.: Extended suction and general deformation theory of unsaturated soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 18(2), 1996.
4. Dingyi, X & Fengyin, L.: Effective stress principle and effective stress expression of unsaturated soils. Wykład na Politechnice Gdańskiej, Gdańsk 2000.
5. Grabowska-Olszewska, B.: Właściwości gruntów nienasyconych. Praca zbiorowa. PWN, Warszawa 1998.
6. Blight, G.: Effective stress evaluation for unsaturated soils. Int. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 93, 1967, 125-148.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

The effective stress principle for unsaturated soils, regarding important forces, such as capillarity, osmotic suction and soil structural strength is presented. A short discussion about selected shortcomings of classical Bishop's formula is given.

Subsequently proposal for a new version of the extending classical equation for unsaturated soils is given. The extension includes influence of capillarity, osmotic suction and soil structural strength.