

*Marek Kawa**, *Matylda Tankiewicz***

ZASTOSOWANIE MIKROSTRUKTURALNEGO KRYTERIUM WYTRZYMAŁOŚCI DO OCENY ZABEZPIECZENIA SKARPY WYKONANEJ W ILE WARWOWYM

1. Wstęp

Ośrodki gruntowe bardzo często charakteryzuje wielostopniowość budowy związana z występowaniem w nich mikrostruktur. Wielostopniowość ta ma swoje konsekwencje w opisie materiału. O zachowaniu się konstrukcji wykonanej z takiego ośrodka decydują nie tylko geometria i obciążenia przyłożone w skali makroskopowej, ale również cechy materiału wynikające z jego budowy strukturalnej. Aby uwzględnić obydwie skale opisu należałoby zamodelować dwa poziomy obserwacji. Zadanie takie niejednokrotnie przekracza możliwości współczesnych komputerów. Dla potrzeb projektowych zazwyczaj modelowana jest tylko skala makro — skala zastosowań inżynierskich. Materiałowi w tym ujęciu przypisuje się uśrednione cechy efektywne, określone na drodze badań lub analizy mikrostruktury.

Jedną z najpowszechniej spotykanych w gruntach mikrostruktur jest mikrostruktura warstwowa. Jest to układ periodycznie powtarzających się cienkich warstewek o odmiennych właściwościach. Znanym przykładem ośrodka gruntowego o takiej budowie jest il warwowy występujący w okolicach Poznania. Zróżnicowanie cech wytrzymałościowych poszczególnych warstw skutkuje silną anizotropią wytrzymałości tego materiału. Efekty te są zazwyczaj pomijane przy projektowaniu, gdy tymczasem ich uwzględnienie pozwala niejednokrotnie na duże oszczędności a przede wszystkim poprawia warunki bezpieczeństwa konstrukcji.

W pracy [5] przedstawiono anizotropowe kryterium wytrzymałości stanowiące koniunkcję płaszczyzny krytycznej i kryterium Pariseau. Zaproponowane kryterium bardzo dobrze opisuje wytrzymałość materiałów z mikrostrukturą warstwową. W nawiązaniu do tej w pra-

* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska, Wroclaw

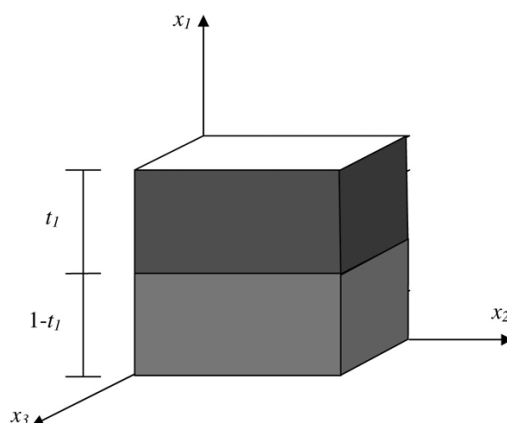
** Studentka V roku, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wroclawska, Wroclaw

cy w niniejszym artykule przedstawia się zastosowanie tego kryterium do obliczeń wytrzymałościowych zabezpieczenia wykopu wykonanego w ośrodku warstwowym.

Zabezpieczenie wykopu zostało wybrane jako jedna z najprostszych i najczęściej spotykanych konstrukcji geotechnicznych. Ośrodek gruntowy z mikrostrukturą warstwową rozpatrywany jest na przykładzie iltu warwowego, dla którego dokonano identyfikacji kryterium. Obliczenia wykonano w programie FLAC, do którego kryterium zostało zaimplementowane jako własny model użytkownika.

2. Mikrostrukturalne kryterium wytrzymałości

Iltu warwowe to, jak już stwierdzono we wstępie, znany przykład materiału z mikrostrukturą warstwową. Ośrodek ten składa się zazwyczaj z dwóch rodzajów periodycznie powtarzających się warstewek o podobnym udziale frakcyjnym. Geometrię komórki periodyczności takiej mikrostruktury przedstawia rysunek 1.

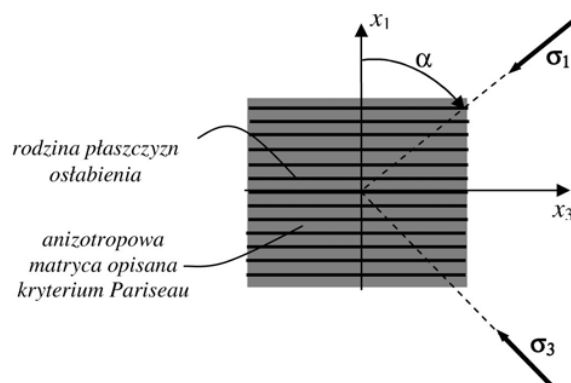


Rys. 1. Układ współrzędnych i geometria komórki periodyczności struktury przyjęta w zadaniu

W pracy [5] dla materiału z mikrostrukturą warstwową zaproponowano, równoważny mikrostrukturalnemu, opis wytrzymałości. Model materiału, odpowiadający temu opisowi, złożony jest z anizotropowej matrycy oraz rodziny płaszczyzn osłabienia. Stanowi on zatem zmodyfikowaną wersję koncepcji płaszczyzny krytycznej.

Klasyczna koncepcja płaszczyzny krytycznej sformułowana przez Jaegera [3] to model wytrzymałości utworzony z izotropowej matrycy oraz wtrąceń w postaci płaszczyzn osłabienia o ustalonym kierunku. Zniszczenie materiału, może nastąpić bądź wskutek przekroczenia wytrzymałości matrycy, bądź poprzez zlokalizowane ścięcie materiału na płaszczyźnie osłabienia. Kryterium wytrzymałości definiowane jest jako koniunkcja warunku wytrzymałości matrycy oraz wytrzymałości na ścinanie płaszczyzny krytycznej.

Zaproponowana w pracy [5] modyfikacja klasycznej wersji koncepcji polega na opisanu matrycy anizotropowym kryterium wytrzymałościowym — kryterium Pariseau (rys. 2).



Rys. 2. Model materiału warstwowego: koniunkcja warunku Pariseau i płaszczyzny krytycznej

Kryterium wytrzymałości materiału jest zatem koniunkcją kryterium Pariseau [6]:

$$A_{ij}^{(m)}\sigma_{ij} + \sqrt{A_{ijkl}^{(m)}\sigma_{ij}\sigma_{kl}} - 1 \leq 0 \quad (1)$$

oraz tarcowego warunku wytrzymałości płaszczyzny krytycznej, zapisanego tutaj jako przekształcony warunek Druckera-Pragera

$$|\sigma_s| + \frac{3a^{(k)}\sigma_n - c^{(k)}}{\sqrt{1 - 12(a^{(k)})^2}} \leq 0, \quad (2)$$

gdzie:

- σ_{ij} — tensor naprężenia,
- $A_{ij}^{(m)}, A_{ijkl}^{(m)}$ — anizotropowe tensory wytrzymałości matrycy,
- σ_s, σ_n — składowa styczna i normalna naprężenia na płaszczyźnie krytycznej,
- $a^{(k)}, c^{(k)}$ — współczynniki tarcia i kohezji dla płaszczyzny.

Zaproponowane kryterium zostało zidentyfikowane tak, aby dokładnie opisywało wytrzymałość dwuskładnikowej mikrostruktury warstwowej o składnikach Druckera-Pragera. Wprowadzona modyfikacja pozwoliła uzyskać znakomitą zgodność pomiędzy zidentyfikowanym kryterium a rzeczywistymi wynikami dla mikrostruktury. Analiza mikrostruktury pozwoliła na zapisanie w pracy [5] wszystkich parametrów materiałowych zidentyfikowanego kryterium w formie analitycznej.

W przypadku płaszczyzny krytycznej identyfikacja jest trywialna — materiał płaszczyzny powinien odpowiadać najłabszemu składnikowi struktury [4]. Identyfikacja sprowadza się zatem do przyjęcia dla płaszczyzny krytycznej parametrów wytrzymałości słabszego składnika materiału. Zdecydowanie bardziej złożoną identyfikację parametrów anizotropowej matrycy [5] można uprościć dla rozważanych w niniejszej pracy ilów warwowych. Charakterystyczną cechą tych ośrodków są stosunkowo niskie i niewiele różniące się między sobą współczynniki tarcia wewnętrznego jego składników.

Zakładając identyczne współczynniki tarcia dla obydwu składników struktury oraz przyjmując kierunek x_1 jako prostopadły do płaszczyzny uwarstwienia (rys. 1) zidentyfikowane kryterium Pariseau można zapisać jako:

$$a(\sigma_{12} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \sqrt{2\sigma_{12}^2 + 2\sigma_{13}^2 + 2\sigma_{23}^2 + \frac{1}{3}(\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{11}\sigma_{33} - \sigma_{22}\sigma_{33})} - \frac{c_2(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)}{c_1 t_1 + c_2(1-t_1)} - (c_1 t_1 + c_2(1-t_1)) \leq 0 \quad (3)$$

gdzie:

- c_1, c_2 — kohezję odpowiednio mocniejszego i słabszego składnika struktury,
- a — współczynnik tarcia Druckera-Pragera wspólny dla obydwu składników,
- t_1 — udział frakcyjny mocniejszego składnika (rys. 2).

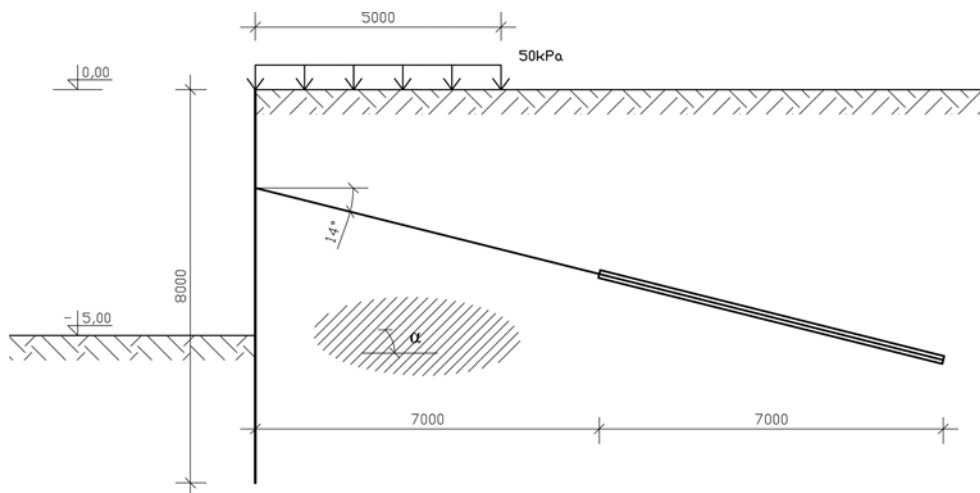
Zapisując w tej samej konwencji warunek (2) otrzymuje się:

$$\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2} + \frac{3a\sigma_{11} - c_2}{\sqrt{1-12a^2}} \leq 0 \quad (4)$$

Koniunkcja warunków (3) i (4) w przypadku ilów warwowych stanowi ostateczną postać kryterium.

3. Ocena zabezpieczenia wykopu

Przedstawione kryterium wytrzymałości zostało zaimplementowane do programu różnic skończonych FLAC jako model użytkownika. Model przyjęto jako sprężysto-idealnie plastyczny (z możliwością wprowadzenia anizotropii w obydwu zakresach) ze stowarzyszonym prawem plastycznego płynięcia. Implementację wykorzystano do oceny zabezpieczenia wykopu wykonanego w ile warwowym. Obliczenia przeprowadzono w płaskim stanie odkształcenia. Geometrię rozwiązywanego zadania przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Geometria wykopu oraz jego zabezpieczenia

Zabezpieczenie wykopu stanowi ścianka szczelna ArcelorMittal AZ 13 10/10 o wskaźniku zginania $1245 \text{ cm}^3/\text{m}$ [1] oraz kotwy z rdzeniem z żerdzi Titan 40/20, z koronką 150 o nośności 300 kN [7] w rozstawie 3 m . Nośność buławy określono jak dla spoistych gruntów plastycznych jako $18,36 \text{ kN/m}$. Sztywność tarciovą na granicy buława-ośrodek gruntowy przyjęto według zaleceń producenta oprogramowania [2] według wzoru:

$$k_t = \frac{2\pi G}{10 \ln\left(1 + \frac{D-d}{d}\right)} \quad (5)$$

gdzie:

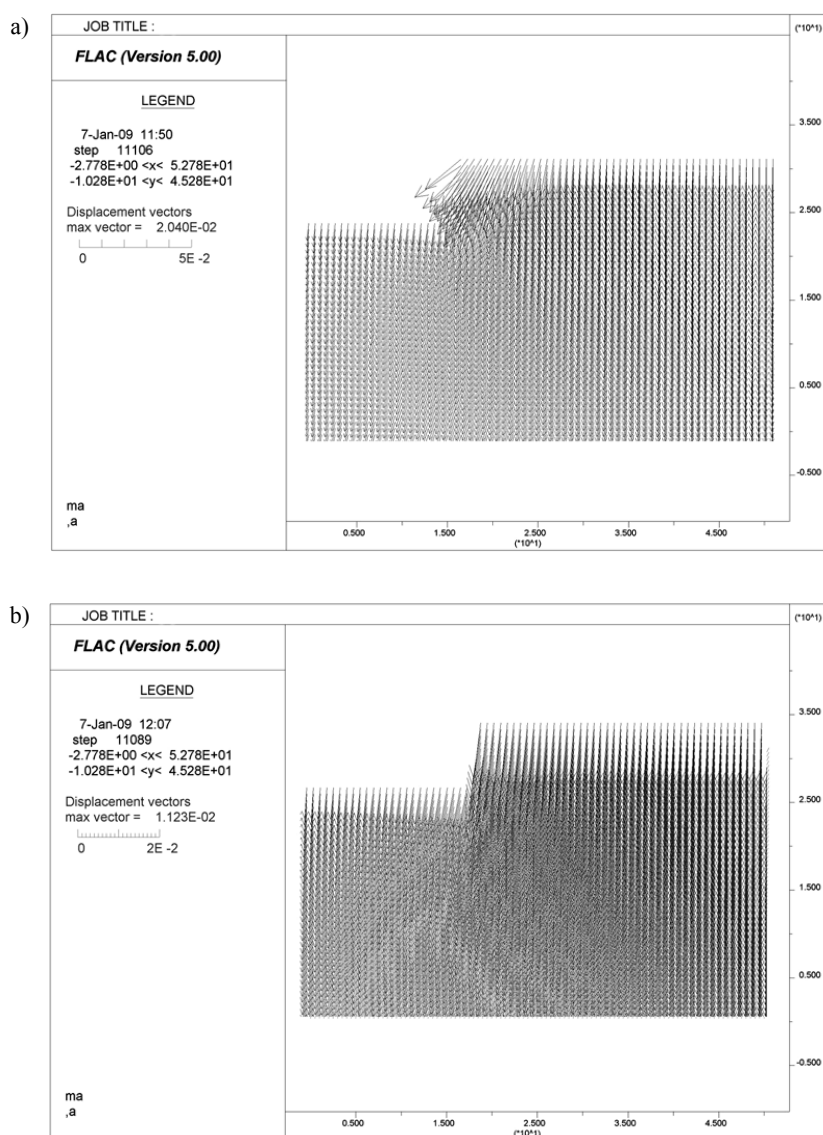
- k_t — oznacza sztywność tarciovą,
- G — moduł odkształcalności postaciowej torkretu (przyjęto 9 GPa),
- D — średnica zewnętrzna buławy ($0,21 \text{ m}$),
- d — zewnętrzna średnica żerdzi ($0,04 \text{ m}$).

Obliczona sztywność tarciova wyniosła $3,42 \text{ GPa}$. Zabezpieczenie przyjmowano jako ciągle przeliczając cechy pojedynczej kotwi na odcinek trzymetrowy a otrzymaną w wyniku analizy siłę ponownie przeliczając na pojedynczą kotew.

W zakresie sprężystym ośrodek gruntowy przyjęto jako izotropowy o wartościach modułów odkształcalności objętościowej i postaciowej odpowiednio jako $K = 1 \text{ GPa}$ i $G = 0,1 \text{ GPa}$. Parametry wytrzymałości składników mikrostruktury przyjęto jako $c_1 = 80 \text{ kPa}$, $c_2 = 10 \text{ kPa}$ oraz $a = 0,045$. Zagadnienie brzegowe rozwiązano dwuetapowo, w pierwszym kroku odtwarzano pierwotny stan naprężenia w ośrodku — w drugim modelowano wykop i jego za-

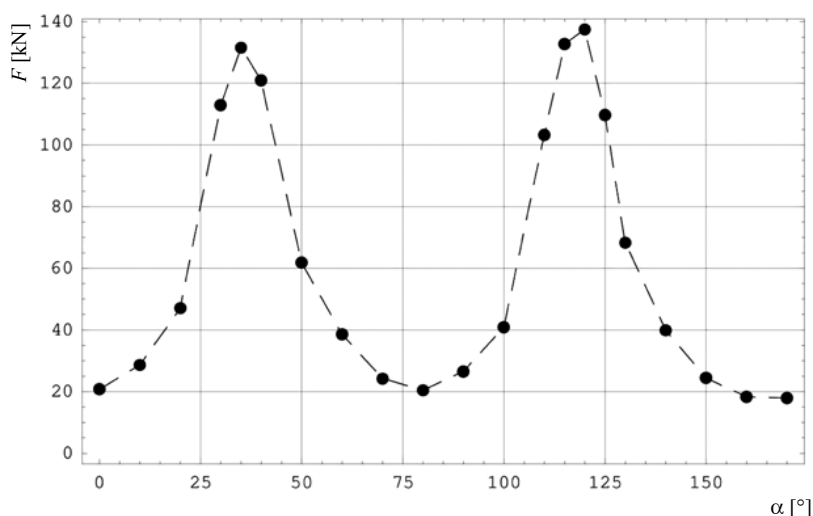
bezpieczeństwo. Zadanie rozwiązano zmieniając kąt uwarstwienia α , mierzony od poziomu (rys. 3), w zakresie od 0 do 180°.

Wyniki w postaci pól przemieszczeń dla dwóch przykładowo wybranych wartości kąta α oraz wykresu siły w kotwi w funkcji kąta α przedstawiono na rysunku 3 i 4. Wyniki te pokazują silnie anizotropowe zachowanie ośrodka.



Rys. 4. Anizotropowe zachowanie się materiału na przykładzie wektorowych pól przemieszczeń. Kierunki przemieszczenia różnią się istotnie dla kąta uwarstwienia 120° (a) i 80° (b)

Szczególnie istotny z punktu widzenia projektowania jest wykres przedstawiony na rysunku 5, który obrazuje anizotropię wytrzymałości materiału. Z wykresu wyraźnie wynika bardzo silna zależność pomiędzy siłą w kotwi a kierunkiem uwarstwienia. Nawet drobna zmiana tego kierunku może wywołać duży skok wartości siły. Fakt ten ma silne konsekwencje przy doborze zabezpieczenia wykopu — właściwe rozpoznanie mikrostruktury pozwala na duże oszczędności materiałowe, błędy w rozpoznaniu skutkować mogą zniszczeniem konstrukcji.



Rys. 5. Wykres siły w kotwi w funkcji kąta nachylenia kierunku uwarstwienia mikrostruktury

4. Wnioski

W artykule przedstawiono zastosowanie mikrostrukturalnego kryterium wytrzymałości zaproponowanego we wcześniejszej pracy [5] do oceny zabezpieczenia wykopu wykonanego w ile warwowym. W szczególności omówiono uproszczoną postać kryterium dla łąków warwowych oraz przedstawiono wyniki dla zagadnienia brzegowego rozwiązane w programie FLAC przy zastosowaniu własnej implementacji numerycznej kryterium.

Wyniki przedstawiono w postaci pól przemieszczeń oraz wykresu siły w kotwi w zależności od kąta uwarstwienia ośrodka. Interesujący jest zwłaszcza silnie anizotropowy charakter zależności pomiędzy siłą w kotwi a kierunkiem uwarstwienia ośrodka — nawet drobne zmiany kąta uwarstwienia mogą wywoływać silną zmianę wartości siły w kotwi.

W przypadku wyników przedstawionych na rysunku 5 zabezpieczenie dobrano tak, żeby zapewnić stateczność wykopu w całym zakresie zmienności kąta uwarstwienia. Patrząc na rysunek 5, łatwo wyobrazić sobie sytuację, gdy oszczędniej dobrane zabezpieczenie zapewni stateczność konstrukcji tylko w pewnym zakresie tych kątów.

Przedstawione rozwiązanie pokazuje istotność uwzględnienia anizotropii w obliczeniach inżynierskich. Dokładna informacja o ośrodku stwarza możliwości dużych oszczędności materiałowych. Z drugiej strony brak dokładnej informacji może prowadzić do poważnych błędów projektowych — drobna pomyłka przy określaniu kierunku uwarstwienia doprowadzić może do katastrofy budowlanej. Tym samym przy projektowaniu konstrukcji z ośrodków anizotropowych zachować należy szczególną ostrożność.

LITERATURA

- [1] ArcelorMittal. Steel Sheet Piling. Materiały promocyjne, 2007
- [2] FLAC. Fast Lagrangian Analysis of Continua. Itasca, 2007
- [3] *Jaeger J.C.*: Shear failure of anisotropic rocks. Geological Magazine, t. 27, nr 1, 1960
- [4] *Kawa M.*: Stany Graniczne ośrodków gruntowych i skalnych z mikrostrukturą warstwową. Wrocław, 2007 (rozprawa doktorska)
- [5] *Kawa M., Łydźba D.*: Kryterium wytrzymałości geomateriałów z mikrostrukturą warstwową. Kwartalnik UWND AGH Górnictwo i Geoinżynieria, z. 2, 2008
- [6] *Pariseau W.G.*: Plasticity theory for anisotropic rocks and soils. Proceedings of 10th Symposium on Rock Mechanics (AIME), 1972
- [7] Titan Polska. System iniekcyjnych mikropali kotew i gwoździ. Materiały Promocyjne