ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ Seria: BUDOWNICTWO z. 111

Nr kol. 1756

2007

Lidia FEDOROWICZ, Jan FEDOROWICZ

Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych Politechnika Śląska

NUMERYCZNA OCENA WYTRZYMAŁOŚCI GRUNTU NA ŚCINANIE W PODŁOŻU PODLEGAJĄCYM DEFORMACJOM GÓRNICZYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono otrzymaną numerycznie (w modelu Modified Cam-Clay) obwiednię wytrzymałości zredukowanej dla podłoża podlegającego deformacjom górniczym. Podano propozycję interpretacji zachowania podłoża górniczego o różnej sztywności i odkształcalności, podlegającego rozluźnieniu ε_x .

SHEAR STRENGTH NUMERICAL EVALUATION FOR SUBSOIL MINING DEFORMED

Summary. In this paper the reduced strength envelope – numerically received – for mining deformed subsoil has been proposed. The behaviour of the mining-foundation of different stiffness has been interpreted for a given ε_x parameter.

1. Wprowadzenie. Specyfika analiz podłoży górniczych

Rozbudowany opis zachowania gruntu w fazie osiągania wytrzymałości na ścinanie wymaga uwzględnienia związku między zmianami w stanie naprężenia a wynikającymi stąd zmianami objętości. Parametry φ' , c' - określone z analizy stanu naprężenia z użyciem kryterium Coulomba-Mohra – są ważne dla danego gruntu tylko przy określonej objętości i mogą różnić się znacząco przy innych objętościach. To oczywiste stwierdzenie rozważone tu zostanie w odniesieniu do stanów pojawiających się w podłożu gruntowym w obszarach eksploatacji górniczej. Wynikiem jest propozycja numerycznej oceny stanów naprężenia i odkształcenia w przypowierzchniowej warstwie gruntu (nazwa przyjęta za [1]) z zastosowaniem modelu stanu krytycznego Modified Cam-Clay (MCC). W modelach stanu krytycznego grunt przechodzi ze stanu sprężystego (a dokładniej quasisprężystego) do stanu sprężysto-plastycznego przy krytycznej wartości specyficznej objętości $V_c=1+e$. Zatem, powierzchnię stanu SBS (State Boundary Surface) w przestrzeni (p',q,V) można zobaczyć jako analogię obwiedni zniszczenia w kryterium Coulomba-Mohra.

Powyższe podejście do analizy stanu podłoża górniczego pozwoli uwzględnić w inżynierskiej ocenie wartości naprężeń ścinających, przekazywanych na fundament budowli posadowionej na podłożu podlegającym deformacjom górniczym, aktualnego stanu gruntu oraz jego historii obciążenia w przeszłości.

Podejście klasyczne powszechnie stosowane zarówno w ocenach inżynierskich [2], jak i analizach badawczych przy określaniu sił ścinających przekazywanych z podłoża ulegającego rozluźnieniu (wywołanemu działaniem odkształceń ε_x) na fundamenty budowli wynika z oceny stanu granicznego (czynnego stanu rankinowskiego) [1]:

- w przypowierzchniowej warstwie gruntu nieobciążonego budowlą, oraz
- w przypadku obciążenia budowlą w warstwie rzeczywistego współdziałania konstrukcji
 - z podłożem gruntowym, gdzie

odkształceniem krytycznym \mathcal{B}_{kr} nazwano odkształcenie warstwy, które w pewnym rozpatrywanym punkcie powoduje powstanie stanu granicznego.

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych, a także badań in situ (np., [3,4,5,6]) stwierdzono, że krytyczne rozluźnienie gruntu zależy od jego pionowego obciążenia – rys.1 (sporządzony zgodnie z [1]) – tak że stan graniczny rozpoczyna się w pobliżu powierzchni warstwy wraz z początkiem jej rozluźniania i postępuje w głąb wraz z postępującym rozluźnianiem.

Współpraca rozluźnianego podłoża z obiektem budowlanym zmienia oczywiście lokalnie obszary występowania stanu granicznego, niemniej uznaje się (m.in. na podstawie [4,5,7]), że w przypadku poziomego rozluźniania przypowierzchniowej warstwy gruntu, przy odkształceniach $2\div4$ mm/m, może wystąpić w obszarze rzeczywistej współpracy obiektu budowlanego z podłożem czynny stan rankinowski, w którym dalszym odkształceniom nie towarzyszy zmiana stanu naprężenia. Konsekwencją powyższego jest przyjęcie stabilizującej się przy ε_{kr} wartości naprężeń stycznych (między fundamentem a niespoistym lub małospoistym, rozluźniającym się podłożem gruntowym), określonej zależnością:

$$\Theta = Ki \cdot \sigma t g \varphi \tag{1}$$

gdzie: φ – kąt tarcia wewnętrznego, σ – naprężenie pionowe, K_i – współczynnik zmniejszający, wynikający z badań modelowych oraz badań terenowych ($K_i \leq 1$), o wartości zależnej od kierunku odkształceń podłoża w stosunku do osi podłużnej fundamentu [1,2].



Rys. 1. Wyniki badań laboratoryjnych – stabilizacja naprężeń poziomych w gruncie rozluźnianym Fig. 1. Laboratory findings –horizontal stress stabilization on the loosening mining-foundation

2. Wybrane aspekty przedstawianego problemu

W analizach inżynierskich stan zniszczenia w podłożu gruntowym oceniany jest zazwyczaj w układzie $\tau \sigma$ lub $\tau \epsilon_s$ ($\tau \gamma$). Pojawienie się naprężeń ścinających w gruncie sprzęgnięte jest bowiem z wystąpieniem odkształceń postaciowych (oraz odwrotnie).

W przedstawionym we wstępie podejściu stosowanym w analizach na terenach górniczych [2] przyjmujemy, że zmobilizowana wytrzymałość na ścinanie staje się wartością umownie stałą, pozornie niezależną od ε , bowiem wartość Θ oceniana jest (zgodnie z (1)) dla przyjętej a priori wartości ω_{rr} , ustalonej laboratoryjnie.



Rys. 2.a) Przykłady ścieżek naprężenia, b) Zmiany modułu G w modelu MCC(OC) Fig. 2.a) Examples of the stress paths, b) G modulus-alteration for MCC(OC) model

Pomimo że zniszczenie materiału zachodzi zawsze na obwiedni zniszczenia, mamy jednak świadomość, iż w rzeczywistym zadaniu brzegowym będziemy mieli do czynienia z różnymi ścieżkami naprężenia dochodzącymi do obwiedni zniszczenia w różnych miejscach, rys. 2a. W analizach numerycznych wykorzystujących zaawansowane modele konstytutywne gruntu pojawia się problem właściwego przygotowania stanu in situ, związany ściśle z relacjami między sztywnością a odkształcalnością, oraz odkształcalnością i wytrzymałością na ścinanie gruntu w numerycznym modelu obliczeniowym. Odpowiedniość tych relacji wpływa na adekwatność otrzymywanego rozwiązania numerycznego – rys. 2b stanowiący przykład zmian modułu G w modelu MCC, zachodzących w danym punkcie w trakcie obciążania podłoża, przy zmianie stanu z quasi-sprężystego na stan sprężysto-plastyczny.

3. Badania numeryczne. Określenie wytrzymałości gruntu na ścinanie w obszarach rozluźnianych podłoża górniczego

W badaniach laboratoryjnych oraz badaniach in situ pojawia się zwykle problem wyraźnego określenia odkształcenia, które towarzyszy zniszczeniu. Przeprowadzenie numerycznego badania ścinania w modelu Modified Cam-Clay (MCC) pozwala na:

- uniknięcie powyższego problemu,
- właściwe ujęcie rzeczywistych relacji zachodzących w podłożu między wytrzymałością, odkształcalnością oraz sztywnością gruntu,
- przedstawienie implikacji inżynierskich tych związków dla określonego zagadnienia brzegowego.

Rozważmy stan podłoża zgodny z rys. 3. Załóżmy, że w wyniku dodatkowego obciążenia o charakterze statycznym lub kinematycznym wystąpiły przemieszczenia w określonej płaszczyźnie, np. równoległej do płaszczyzny (X,Z). Przedmiotem analizy będzie odpowiedź podłoża w wybranym punkcie "i", reprezentowanym przez pojedynczy element MES, na zaistniałe dodatkowe obciążenie w postaci przemieszczeń węzłów górnej krawędzi elementu "i". Przyjęta numeryczna realizacja czystego ścinania poprzez wymuszenie odkształcenia postaciowego (przy $d\varepsilon_v=0$) jest założeniem sposobu realizacji w przypowierzchniowym obszarze podłoża rozluźnianego w wyniku działania deformacji górniczych stanu rzeczywistego poślizgu, w warstwie o pomijalnej grubości.



Rys. 3. Podłoże stanowiące przedmiot analizy numerycznej Fig. 3. Subsoil-foundation numerically analysed

Wyraźmy stan początkowy naprężenia w rozważanym elemencie "i" przez naprężenia izotropowe p_i , gdzie wartość p_i związana jest z przyjętym stanem prekonsolidacji gruntu. Rysunek 4 pokazuje zachowanie ścinanego gruntu prekonsolidowanego w modelu MCC(OC), gdzie przy przyjętym rozkładzie p_{co} z głębokością (dla $p_{co}^{\alpha-\alpha}=202$ kPa) możemy rozważyć dwie możliwe drogi dojścia ścieżek (p,q) do linii CSL; ścieżka (1) reprezentuje profil K_a^{OC} o wartościach mniejszych od profilu K_o^{OC} odpowiadającego ścieżce (2).



Rys. 4. Odpowiedź na zadany stan odkształceń postaciowych w modelu MCC(OC) Fig. 4. Response for non-dilatational strain state imposed in MCC(OC) model

Zauważmy, że dopóki ścieżka naprężenia znajduje się pod powierzchnią plastyczności, stan naprężenia w elemencie "i" w płaszczyźnie (x,y) ma postać: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p$, $d\tau$ jest natomiast wynikiem narastających odkształceń postaciowych $d\gamma$ – rys. 5. Wartości wytrzymałości na ścinanie τ_j , odpowiadające ścieżkom (1) i (2) z rys. 4 pokazuje rys. 5a. Powyższe rozważania można powtórzyć dla nowego, kolejno przyjętego rozkładu p_{co} i nowej wartości $p_{co}^{\alpha-\alpha}$, otrzymując odpowiednie wartości wytrzymałości na ścinanie τ_j – rys. 5b.



Rys. 5a, b. Wytrzymałości gruntu na ścinanie τ_f przy ustalonych wartościach p_{ce} Fig. 5a, b. Shear strength τ_f in subsoil for the determined p_{ce} values



Rys. 6. Obwiednia wytrzymałości zredukowanej Fig. 6. Reduced strength envelope

Analizy zachowania gruntu w stanach prekonsolidacji (OC) oraz normalnej konsolidacji (NC) pozwoliły na utworzenie obwiedni wytrzymałości zredukowanej – rys. 6, utworzonej przez korektę wartości wytrzymałości określanych dla prostych ścieżek dewiatorowych (otrzymaną przez zrzutowanie na ścieżki dewiatorowe wartości krytycznych τ_f , towarzyszących poślizgowi w warstwie ścinanej). Ścieżka zewnętrzna (NC) utworzyła nieliniowe zamknięcie obwiedni wytrzymałości dla danego p_{co} .

Otrzymujemy zatem, zgodnie z rys.6, sposób oceny wytrzymałości gruntu na ścinanie w poziomo rozluźnianym podłożu górniczym, otrzymany przy zastosowaniu opisu podłoża modelem stanu krytycznego MCC:

$$\tau_f = (p_i \pm \Delta p_i) \cdot \mathrm{tg} \varphi'_{cv}$$

lub

Tr-qCSL tg q'cv





Zapis powyższy daje obraz:

- zgodny z wynikami badań laboratoryjnych zależność (1), ze współczynnikiem K_i zmniejszającym wartości "dewiatorowe" wytrzymałości na ścinanie, a równocześnie
- 2) wzbogacony o możliwość uwzględnienia prekonsolidacji o różnych wartościach OCR.

Uzupełnieniem przedstawionych rozważań są poniższe rysunki. Rysunek 7 stanowi obwiednię stanów zniszczenia określonych w przeprowadzonych testach numerycznych dla różnych wartości prekonsolidacji p_{co} .



Rys. 8. Efekt rozluźnienia gruntu w podłożach o różnych sztywnościach Fig. 8. Effect of the loosening for subsoils of the different stiffness

Rysunek 8 przedstawia, możliwą dzięki zastosowaniu analizy numerycznej, interpretację zachowania dwóch podłoży o różnej sztywności i odkształcalności w momencie wejścia

155

(3)

analizowanych ścieżek na powierzchnię stanu SBS (punkty oznaczone Y).

Przyjmując, że dla bezwymiarowej, ścinanej warstwy podłoża możemy zapisać $\gamma = (dx \cdot \varepsilon_x)/dy = \varepsilon_x$, to odkształcenie ε_x (wyrażające rozluźnienie podłoża górniczego), które nie powoduje powstania wartości naprężeń ścinających τ_f , wynosi dla:

- podłoża (1) $\varepsilon_x \leq 0,004$,
- podłoża (2) $\varepsilon_x \leq 0,006$.

Literatura

- 1. Kwiatek J.: Obiekty budowlane na terenach górniczych. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2002.
- 2. Projektowanie budynków na terenach górniczych, Instrukcje, Wytyczne, Poradniki nr 416, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2006.
- Rosikoń A.: Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górniczymi. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
- Kwiatek J. i inni: Badania terenów wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na budowle eksperymentalne. Prace GIG, Komunikat nr 620, Katowice 1974.
- Budzyński H.: Wpływ rozpełzania podłoża górniczego na wiotkie ławy fundamentowe usytuowane równolegle do kierunku rozpełzania. Praca doktorska, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1974.
- Litwinowicz L.: Wpływ rozluźnienia nasypów znajdujących się w zasięgu oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na ich stateczność. Prace Instytutu Inżynierii Budowlanej i Sanitarnej Politechniki Lubelskiej, seria A, Monografie, nr 7, 1982.
- Zawora J.: Wpływ poziomych odkształceń podłoża na ławy fundamentowe usytuowane poprzecznie do kierunku tych odkształceń. Praca doktorska, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 1974.

Recenzent: Dr hab. inż. Zenon Szypcio, prof. Pol. Białostockiej