

Jacek TEJCHMAN
Politechnika Gdańska

SYMULACJA NUMERYCZNA ŚCINANIA W APARATACH BEZPOŚREDNIEGO I PROSTEGO ŚCINANIA

Streszczenie. W artykule porównano dwa różne aparaty ścinania stosowane w mechanice gruntów i mechanice materiałów sypkich: aparat bezpośredniego ścinania i aparat prostego ścinania. Analizę numeryczną pola odkształceń i naprężeń w próbce suchego piasku wykonano na bazie metody elementów skończonych i mikroplarnego konstytutywnego prawa hipoplastycznego. Prawo konstytutywne zawiera długość charakterystyczną w formie średniej średnicy ziarna.

NUMERICAL SIMULATION OF SHEARING IN A DIRECT SHEAR AND SIMPLE SHEAR APPARATUS

Summary. Two different shear apparatuses used in soil mechanics and mechanics of bulk solids are compared: a direct shear tester and a true simple shear tester. The analysis of the deformation and stress field in the specimen of dry sand was performed on the basis of a finite element method and a polar hypoplastic constitutive law. A constitutive law includes a characteristic length in the form of a mean grain diameter.

1. Wprowadzenie

W mechanice gruntów i mechanice materiałów sypkich stosuje się wiele różnych aparatów ścinania w celu określenia najważniejszych parametrów gruntów bądź materiałów sypkich takich jak: funkcja płynięcia, kąt tarcia wewnętrznego, spójność oraz kąt tarcia o konstrukcję. Porównanie wyników dla tego samego materiału z różnych aparatów pokazuje istotne różnice. Różnice te także występują w stanie rezydualnym ścinania, jeżeli nawet wstępne zagęszczenie materiału, proces wstępnej konsolidacji i poziom naprężeń są takie same. Są one spowodowane innym sposobem wymuszenia ścinania w próbkach. Dodatkowo, dużą rolę

odgrywa relacja między wysokością a długością próbki oraz relacja między średnią średnicą ziarna a wysokością próbki z uwagi na wpływ brzegów aparatów dookoła próbki.

Celem artykułu jest pokazanie, jak metoda wymuszenia ścinania wpływa na wytrzymałość na ścinanie materiału. Obliczenia numeryczne wykonano dla suchego piasku w aparacie bezpośredniego ścinania i w aparacie prostego ścinania dla tych samych warunków początkowych [1]. W analizie płaskiego stanu odkształcenia zastosowano metodę elementów skończonych na bazie mikropolarnego hipoplastycznego prawa konstytutywnego.

2. Aparaty ścinania

Test bezpośredniego ścinania [2, 3] jest najbardziej popularnym badaniem laboratoryjnym obok ściskania trójosiowego stosowanym w mechanice gruntów do wyznaczania wytrzymałości gruntów na ścianie. Jego zaletami są: prosty system, łatwe przygotowanie próbki i szybka procedura ścinania. Wady to: niejednorodne pole odkształceń i naprężeń, zmniejszanie się powierzchni ścinania, naprężenia główne są nieznanne, występują silne koncentracje naprężeń na końcach próbki, ma miejsce obrót górnej płyty aparatu, nie można też oddzielić przemieszczeń od poślizgu od przemieszczeń od ścinania.

Test prostego ścinania jest także stosowany w mechanice gruntów [4-6], ale znacznie rzadziej z uwagi na skomplikowaną budowę aparatu. Jego zaletami są: stała powierzchnia ścinania, proste przygotowanie próbki, łatwa procedura oraz bardziej jednorodne pole naprężeń. Niestety i w tym przypadku występują koncentracje naprężeń na końcach próbki i nie można wyznaczyć naprężeń głównych.

3. Prawo konstytutywne

Obliczenia MES wykonano z mikropolarnym prawem hipoplastycznym [7-8]. Mikropolarnie prawo materiałowe jest w stanie opisać najważniejsze właściwości materiałów sypkich podczas lokalizacji odkształceń stycznych z uwzględnieniem wskaźnika porowatości, poziomu naprężeń, kierunku odkształceń, średniej średnicy ziarna i szorstkości ziarna. Zostało sformułowane w ramach mechaniki ośrodka ciągłego Cosserat poprzez rozszerzenie prawa hipoplastycznego

zaproponowanego przez Gudehusa [9] o wielkości mikropolarne: obrót Cosseratów, krzywizny, naprężenia momentowe i średnią średnicę ziarna. Dzięki obecności długości charakterystycznej w postaci średniej średnicy ziarna, wyniki numeryczne są niezależne od siatki elementów skończonych, a problem brzegowy jest matematycznie poprawnie zdefiniowany podczas występowania osłabienia materiałowego. Prawo charakteryzuje się prostotą i szerokim zakresem zastosowania. Stałe materiałowe są kalibrowane przy użyciu standartowych badań laboratoryjnych i prostych obliczeń elementowych [10]. Są one bezpośrednio odniesione do własności ziaren. Analiza numeryczna została wykonana ze stałymi materiałowymi dla tzw. piasku „Karlsruhe” [1].

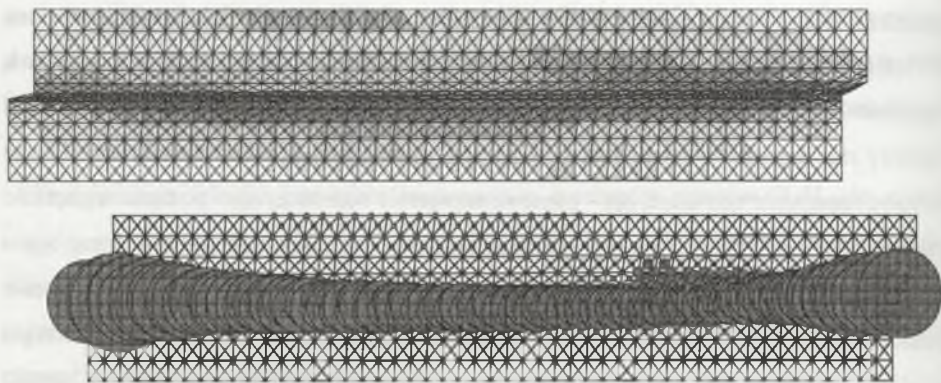
4. Implementacja numeryczna

Do symulacji numerycznych obu testów ścinania przyjęto próbkę piasku o długości $l=0.10$ m, szerokości $b=1.0$ m i wysokości $h=20$ mm (płaski stan odkształcenia). Próbkę zdyskretyzowano 2400 elementami prostokątnymi złożonymi z elementów trójkątnych. W obliczeniach uwzględniono duże odkształcenia i krzywizny (podejście tzw. „updated Lagrangian”). Jako wyjściowy stan naprężeń przyjęto stan K_0 ($\sigma_{22}=\gamma_d x_2$, $\sigma_{11}=\sigma_{33}=K_0 \gamma_d x_2$, $\sigma_{12}=\sigma_{21}=m_1=m_2=0$), σ_{11} – poziome naprężenie normalne, σ_{22} – pionowe naprężenie normalne, σ_{33} – poziome naprężenie normalne prostopadłe do płaszczyzny odkształcenia, σ_{12} – poziome naprężenie styczne, σ_{21} – pionowe naprężenie styczne, m_1 – poziome naprężenie momentowe, m_2 – pionowe naprężenie momentowe, γ_d – ciężar objętościowy, x_2 – współrzędna pionowa mierzona od górnego brzegu, $K_0=0.45$ – współczynnik parcia spoczynkowego. Stałe obciążenie $p=100$ kN/m zostało przypisano wzdłuż całego górnego brzegu. Dolny brzeg był bardzo szorstki ($u_1=0$, $u_2=0$ i $\omega^c=0$); u_1 – poziome przemieszczenie, u_2 – pionowe przemieszczenie, ω^c – obrót Cosseratów. Dwa pionowe brzegi były gładkie. W teście bezpośredniego ścinania przyjęto te same poziome przyrosty przemieszczeń w górnej części obu brzegów: $u_1=n\Delta u_1$, $\sigma_{21}=0$ i $m_1=0$ (Δu_1 – poziome przyrosty przemieszczeń, n – numer kroku obliczeniowego). Wzdłuż dolnej części pionowych brzegów przyjęto: $u_1=0$, $\sigma_{21}=0$ i $m_1=0$. W przypadku prostego ścinania przypisano wzdłuż pionowych boków poziome przemieszczenia wzrastające liniowo: $u_1=n\Delta u_1(1-x_2/h)$, $\sigma_{21}=0$ i $m_1=0$. Poziome i pionowe przemieszczenia górnego brzegu były takie same: $u_1=n\Delta u_1$, $m_2=0$, $u_2=\text{const}$.

5. Wyniki MES

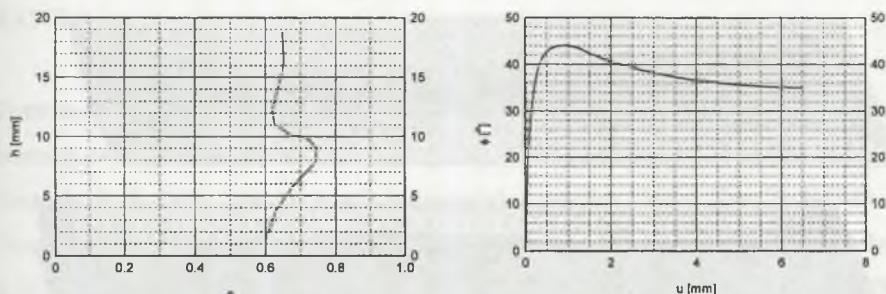
Wyniki numeryczne dla piasku wstępnie zagęszczonego ($e_0=0.60$) są pokazane na rys.1 i 2 dla bezpośredniego ścinania i na rys.3 i 4 dla prostego ścinania. rys.1 i 3 przedstawiają zdeformowane siatki z rozkładem obrotu Cosseratów i wskaźnika porowatości w stanie rezydualnym. Wielkość obrotu jest zaznaczona kółkiem. Ciemniejszy obszar oznacza z kolei wyższy wskaźnik porowatości. Rozkład wskaźnika porowatości wzdłuż wysokości próbki i przebieg wewnętrznego kąta tarcia $\phi = \arctan(\sigma_{12}/\sigma_{22})$ w środku próbki w funkcji przemieszczenia górnego brzegu u jest przedstawiony na rys.2 i 4 (σ_{12} – poziome naprężenie styczne, σ_{22} – pionowe naprężenie normalne).

Rozkład wskaźnika porowatości e i naprężeń σ_{ij} jest niejednorodny [1], szczególnie w aparacie bezpośredniego ścinania. Wpływ pionowych brzegów na rozkład obrotu Cosseratów jest widoczny w obu aparatach.



Rys. 1. Zdeformowana siatka MES z rozkładem i wskaźnika porowatości e obrotu Cosseratów ω^f podczas ścinania bezpośredniego

Fig. 1. Deformed FE-mesh with the distribution of void ratio e and Cosserat rotation ω^f during a direct shear test

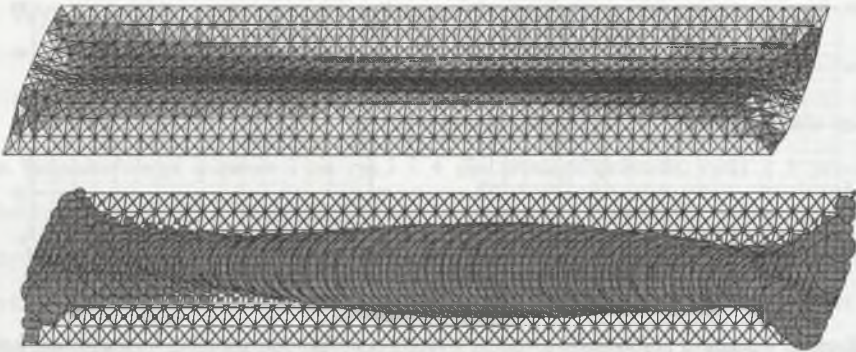


Rys.2. Rozkład wskaźnika porowatości e wzdłuż wysokości próbki oraz przebieg wewnętrznego kąta tarcia $\phi = \arctan(\sigma_1/\sigma_2)$ w środku próbki w funkcji poziomego przemieszczenia górnego brzegu podczas bezpośredniego ścinania

Fig.2. Distribution of Cosserat rotation ω^ϕ and void ratio e along the height and evolution of the internal friction angle $\phi = \arctan(\sigma_1/\sigma_2)$ in the middle of the specimen versus the horizontal displacement of the upper boundary during direct shearing

Kąt tarcia wewnętrznego osiąga maksimum dla $u=0.5$ mm, pokazuje następnie wyraźne osłabienie i osiąga stan rezydualny dla $u=8-12$ mm. Kąty tarcia są wyższe w aparacie bezpośredniego ścinania: maksymalny kąt tarcia ϕ jest równy 44° (w wierzchołku) i 35° (w stanie rezydualnym). Dla prostego ścinania maksymalny kąt tarcia wewnętrznego jest równy 42° , a rezydualny 30.0° . Kształt krzywych $\phi=f(u)$ jest także różny.

W środku próbki piasku powstaje strefa ścinania, która charakteryzuje się obecnością obrotu Cosseratów i wysokim wskaźnikiem porowatości. Jej szerokość zmienia się na długości wskutek efektu brzegowego. W aparacie bezpośredniego ścinania strefa ścinania jest lekko wygięta. Jej szerokość w środku próbki wynosi $t_s=6-7$ mm ($12-14 \times d_{50}$) podczas bezpośredniego ścinania i $t_s=6-8$ mm ($12-16 \times d_{50}$) podczas ścinania prostego. Pionowe przemieszczenia górnego brzegu wynoszą 0.8 mm (bezpośrednie ścinanie) oraz 0.55 mm (proste ścinanie) dla $u=6$ mm.



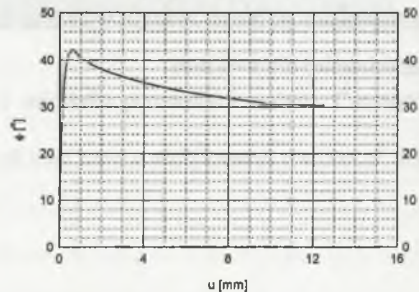
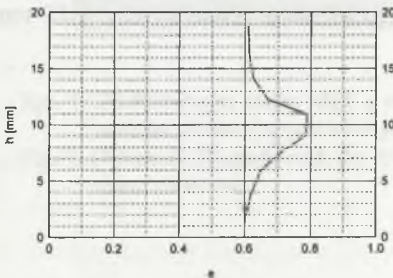
Rys.3. Zdeformowana siatka MES z rozkładem wskaźnika porowatości e i obrotu Cosseratów ω^c podczas prostego ścinania

Fig.3. Deformed FE-mesh with the distribution of void ratio e and Cosserat rotation ω^c during simple shearing

6. Wnioski

Symulacje numeryczne zachowania się próbki piasku podczas ścinania bezpośredniego i prostego przyniosły następujące wyniki:

1. Metoda wymuszenia ścinania wpływa na wytrzymałość materiałów na ścinanie.
2. Odkształcenia i naprężenia są niejednorodne w obu aparatach, szczególnie w aparacie bezpośredniego ścinania.
3. Maksymalny i rezydualny kąt tarcia wewnętrzny jest wyższy w aparacie bezpośredniego ścinania.
4. Szerokość i kształt strefy ścinania są niejednorodne na długości próbki.



Rys.4. Rozkład wskaźnika porowatości e wzdłuż wysokości próbki i przebieg wewnętrznego kąta tarcia $\phi = \arctan(\sigma_{12}/\sigma_{22})$ w środku próbki w funkcji poziomego przemieszczenia górnego brzegu podczas prostego ścinania

Fig.4. Distribution of Cosserat rotation ω^c and void ratio e along the height and evolution of the internal friction angle $\phi = \arctan(\sigma_{12}/\sigma_{22})$ in the middle of the sand specimen versus the horizontal displacement of the upper boundary during simple shearing

LITERATURA

1. J. Tejchman: FE-simulations of a direct and a true simple shear test, *Powder Handling and Processing*, 14, 2, 2002, 86-91.
2. K. Terzaghi, R. B. Peck: *Soil mechanics in engineering practice*, Wiley, New York 1948.
3. G. Scarpelli, D. M. Wood: Experimental observations of shear band patterns in direct shear test, *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*, Delft, 1982, 473-484.
4. K. H. Roscoe: An apparatus for the application of simple shear to soil samples, *Proc. 3rd Intern. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng.*, Zurich, 58, 1953, 1009-1012.
5. L. Bjeruum, A. Landva: Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, 16, 1, 1966, 1-20.
6. M. Budhu: Nonuniformities imposed simple shear apparatus, *J. Can. Geotech.*, 20, 1984, 25-137.
7. J. Tejchman, G. Gudehus: Shearing of a narrow granular strip with polar quantities, *Int. Journ. Num. and Anal. Methods in Geomechanics*, 25, 2001, 1-28.
8. J. Tejchman: Patterns of shear zones in granular materials within a polar hypoplastic continuum, *Acta Mechanica*, 155, 1-2, 2002, 71-95.
9. G. Gudehus: A comprehensive constitutive equation for granular materials, *Soils and Foundations*, 36, 1, 1996, 1-12.
10. I. Herle, G. Gudehus: Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies, *Mech. of Cohesive-Frictional Materials*, 4, 5, 1999, 461-486.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

Two different shear testers used in soil mechanics and mechanics of bulk solids are compared: a direct shear tester and a true simple shear tester. The FE-analysis was performed with a sand specimen on the basis of a finite element method and a polar hypoplastic constitutive law. The calculations show that the deformation fields are non-uniform in both testers, in particular in a direct shear device. The effect of side boundaries is pronounced. The internal friction angles at peak and in the residual state are different.

[The following text is extremely faint and largely illegible, appearing to be a continuation of the abstract or the beginning of the main text.]



[The caption text is extremely faint and illegible, likely describing the diagrams and the finite element analysis results.]