

Jacek TEJCHMAN
Politechnika Gdańska

WPLYW CYKLICZNEGO ŚCINANIA NA PRZEBIEG LOKALIZACJI ODKSZTAŁCEŃ W GRUNTACH PIASZCZYSTYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki wpływu cyklicznego ścinania na przebieg lokalizacji odkształceń stycznych w zagęszczonych gruntach piaszczystych. Proces ścinania wąskiej i nieskończonej długiej warstwy piasku pomiędzy dwoma bardzo szorstkimi brzegami pod obciążeniem stałym w warunkach nieskrępowanej dylatacji modelowany był przy zastosowaniu metody elementów skończonych i mikropolarnego hipoplastycznego prawa konstytutywnego. Obliczenia wykonano dla dużej amplitudy cyklicznego ścinania.

EFFECT OF CYCLIC SHEARING ON THE EVOLUTION OF LOCALISATION OF DEFORMATIONS IN SANDY SOILS

Summary. Paper presents results of the effect of cyclic shearing on the evolution of localization of shear deformations in dense sandy soils. The process of shearing of an infinite narrow layer of sand between two very rough boundaries under constant vertical pressure in conditions of free dilatation is modelled with a finite element method and a polar hypoplastic constitutive law. Numerical calculations were performed with large cyclic shear amplitude.

1. Wprowadzenie

Mechanizm powstawania i propagacji wymuszonych i spontanicznych lokalizacji odkształceń stycznych w gruntach piaszczystych podczas ścinania monotonicznego jest już dobrze rozpoznany na podstawie wyników doświadczeń i obliczeń numerycznych [1-6]. Wyniki te pokazują, że szerokość stref lokalizacji zależy od poziomu naprężenia, wskaźnika porowatości, kierunku odkształcenia, średniej średnicy ziarna, szorstkości, kształtu i sztywności ziaren, wymiaru próbki oraz warunków brzegowych (szorstkość i odkształcalność). Mechanizm powstawania lokalizacji podczas ścinania cyklicznego był do

tej pory bardzo rzadko badany zarówno teoretycznie, jak i doświadczalnie. Z uwagi na to, że lokalizacje odkształceń są prekursorem momentu utraty stateczności gruntów, określenie wpływu cyklicznego ścinania na nośność gruntów jest szczególnie istotne podczas zjawiska trzęsienia ziemi lub dynamicznego oddziaływania maszyn posadowionych na fundamentach.

W artykule przedstawione zostaną wyniki wpływu cyklicznego ścinania wąskiej warstwy piasku pomiędzy dwiema bardzo szorstkimi brzegami w warunkach nieskrępowanej dylatacji i płaskiego stanu odkształcenia. Obliczenia wykonano stosując metodę elementów skończonych i mikropolarne hipoplastyczne prawo konstytutywne, które opisuje najważniejsze własności materiałów sypkich podczas tworzenia się lokalizacji odkształceń stycznych.

2. Prawo konstytutywne

Mikropolarne prawo materiałowe [4-6] 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 [7] 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 [8]. Są one bezpośrednio odniesione do własności ziaren [8]. Zalety tego prawa zostały sprawdzone w wielu różnych problemach brzegowych z lokalizacją odkształceń stycznych. Uzyskano dobrą zgodność wyników teoretycznych z doświadczalnymi.

3. Dane wyjściowe do obliczeń MES

Analiza numeryczna została wykonana dla następujących stałych materiałowych (dla tzw. piasku „Karlsruhe”): $e_{10}=1.3$ (maksymalny wskaźnik porowatości przy ciśnieniu równym zero), $e_{d0}=0.51$ (minimalny wskaźnik porowatości przy ciśnieniu równym zero), $e_{c0}=0.82$ (krytyczny wskaźnik porowatości przy ciśnieniu równym zero), $\phi_c=30^\circ$ (krytyczny kąt tarcia wewnętrznego), $h_s=190$ MPa (wskaźnik twardości), $\alpha=0.3$ (współczynnik), $n=0.5$ (współczynnik), $d_{50}=0.5$ mm (średnia średnica ziarna) i $a_c=a_1^{-1}$ (a_c – mikropolarna stała opisująca szorstkość ziarna), a_1 – współczynnik opisujący kształt powierzchni naprężeń w stanie krytycznym, $a_1^{-1}=3-4.5$). Parametry h_s and n są wyznaczana na podstawie jednego testu w edometrze z luźną próbką; h_s oznacza nachylenie krzywej w interpretacji logarytmicznej, a n jej krzywiznę. Stała a jest określona z jednego testu trójosiowego z zagęszczoną próbką. Ustala ona wysokość i pozycję wierzchołka na krzywej naprężenia w funkcji odkształcenia. Kąt ϕ_c jest równy naturalnemu kątowi nachylenia zbocza. Wartości e_{10} , e_{d0} , e_{c0} i d_{50} otrzymuje się na podstawie normowych doświadczeń.

Obliczenia MES dla cyklicznego ścinania w warunkach nieskrępowanej dylatacji wykonano dla warstwy suchego piasku o wysokości $h=20$ mm ($h/d_{50}=40$). Zastosowano prostokątne elementy skończone złożone z 4 elementów trójkątnych, aby uniknąć tzw. przeszywnienia elementów. W celu symulacji ścinania nieskończenie długiej warstwy, obliczenia wykonano dla jednej kolumny elementów o szerokości 0.1 m złożonej z 20 elementów prostokątnych o wysokości $5d_{50}$ stosując tzw. okresowe warunki brzegowe. Przyjęto, że przemieszczenia i obroty Cosseratów są takie same wzdłuż pionowych brzegów. Przyjęto liniowe funkcje kształtu dla przemieszczeń i obrotu Cosseratów. W obliczeniach uwzględniono duże odkształcenia i krzywizny (podejście tzw. „updated Lagrangian”). W analizie pominięto ciężar warstwy. Dolny i górny brzeg przyjęto jako bardzo szorstki. W ten sposób warunki brzegowe wzdłuż dolnego brzegu były następujące: $u_1=0$, $u_2=0$ i $\omega^c=0$, a wzdłuż górnego brzegu: $u_1=n\Delta u$, $\omega^c=0$ i $\sigma_{22}=p$ (u_1 – przemieszczenie poziome, u_2 - przemieszczenie pionowe, ω^c - obrót Cosseratów, n - numer kroku czasowego, Δu - stały przyrost przemieszczenia w każdym kroku, p - pionowe ciśnienie wzdłuż górnego brzegu). Odkształcenia warstwy piasku były wymuszone poprzez przyjęcie poziomych przyrostów przemieszczenia Δu węzłów górnego brzegu. Wstępnie piasek był poddany ścisnaniu od ciśnienia p i ścinaniu $u_1^f/h=100\%$ w kierunku poziomym w celu osiągnięcia stanu krytycznego (rezidualnego) (u_1^f - całkowite poziome przemieszczenie górnego brzegu, h – wysokość

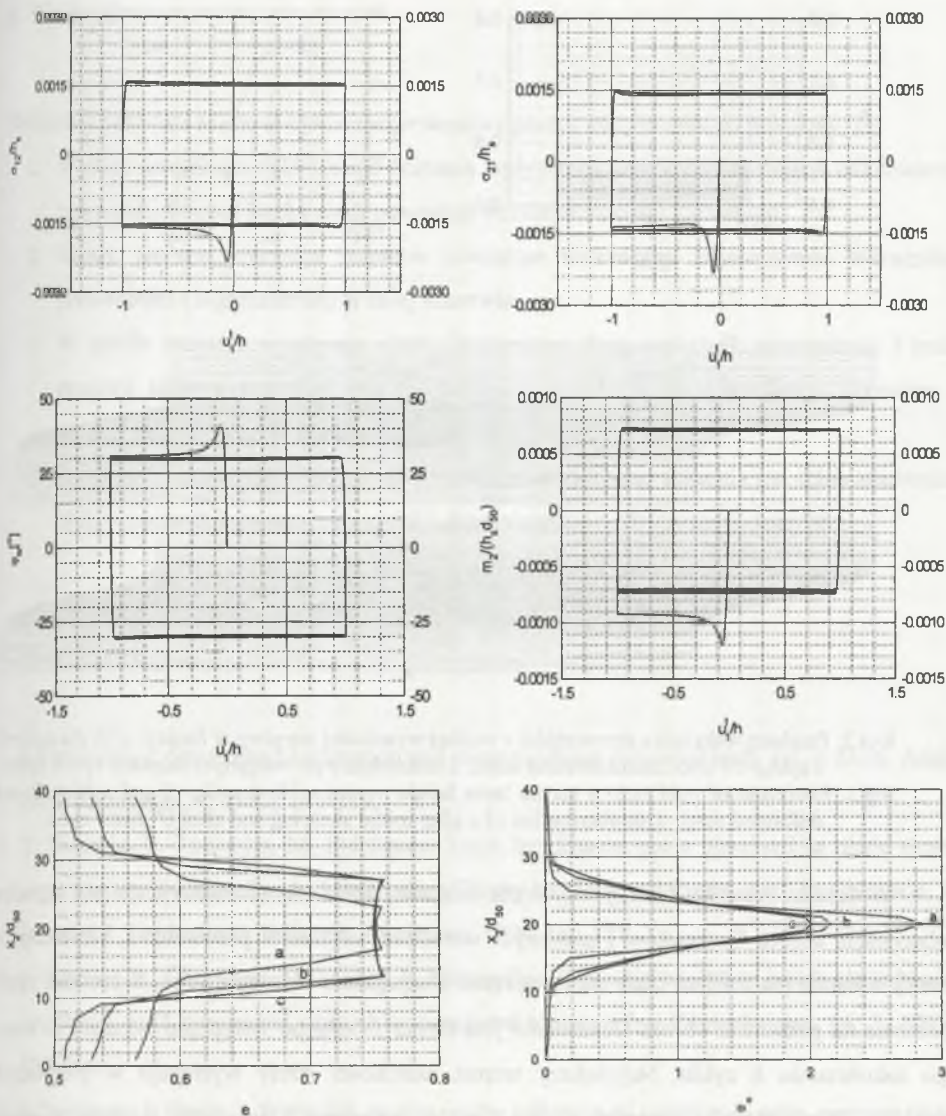
warstwy). Następnie kierunek ścinania był cyklicznie zmieniany z amplitudą ścinania równą $u_1'/h = \pm 200\%$.

4. Wyniki numeryczne

Rys.1 i 2 opisują wyniki numeryczne cyklicznego ścinania dla piasku wstępnie zagęszczonego $e_0=0.60$ ($h=20$ mm, $d_{50}=0.5$ mm, $h/d_{50}=40$, $p=500$ kPa). Rys.1 przedstawia przebieg znormalizowanych naprężeń stycznych σ_{12}/h_s i σ_{21}/h_s (h_s – wskaźnik twardości) w środku warstwy, mobilizowanego kąta tarcia $\varphi_w = \arctan(\sigma_{12}/\sigma_{22})$ w całej warstwie oraz znormalizowanego naprężenia momentowego przy obu brzegach $m_2/(h_s d_{50})$ w funkcji znormalizowanego poziomego przemieszczenia górnego brzegu u_1'/h (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). Kąt tarcia odnosi się do całej warstwy, ponieważ naprężenia σ_{12} i σ_{22} nie zależą od współrzędnej poziomej x_1 i pionowej x_2 . Dodatkowo pokazano rozkład obrotu Cosseratów i wskaźnika porowatości e wzdłuż znormalizowanej wysokości warstwy x_2/h po wstępnym ścinaniu (a), po trzecim cyklu (b) i po 6 cyklu (c).

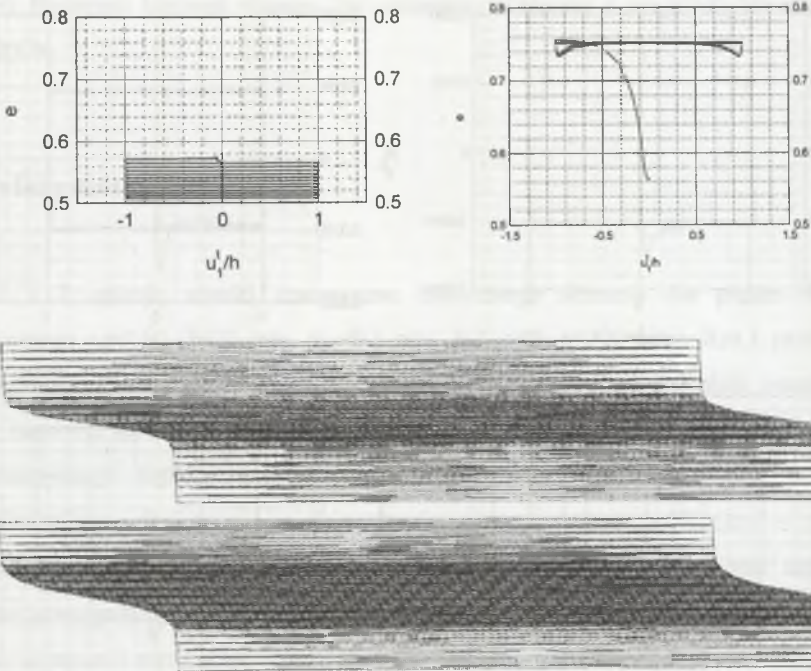
Na rys.2 przedstawiono rozwój wskaźnika porowatości przy dolnym brzegu na wysokości $x_2/d_{50}=3$ i w środku warstwy na wysokości $x_2/d_{50}=19$ oraz zdeformowana siatkę elementów skończonych wraz z rozkładem wskaźnika porowatości po wstępnym ścinaniu i po 6 pełnych cyklach. Ciemniejszy kolor oznacza wyższy wskaźnik porowatości.

Wszystkie zmienne (naprężenia σ_{ij} , naprężenie momentowe m_2 , wskaźnik porowatości e i kąt tarcia φ_w zmierzają do wartości asymptotycznych. Naprężenia styczne zmniejszają się nieznacznie podczas kolejnych cykli. Naprężenie styczne σ_{12} w środku warstwy jest minimalnie większe niż σ_{21} . Maksymalny kąt tarcia jest równy 42° , a rezydualny około 30° . Wskaźnik porowatości przy brzegach warstwy ($x_2/d_{50} \leq 9$ i $x_2/d_{50} \geq 31$) ulega stalemu zmniejszaniu, natomiast w środku warstwy ($x_2/d_{50} \geq 13$ i $x_2/d_{50} \leq 27$) wzrasta globalnie podczas każdego cyklu aż do osiągnięcia wartości krytycznej ($e=e_c \approx 0.75$). Podczas każdej zmiany kierunku ścinania występuje nieznaczne zagęszczanie w całej warstwie.



Rys.1. Przebieg znormalizowanych naprężeń stycznych σ_{12}/h_s i σ_{21}/h_s , mobilizowanego kąta tarcia φ_w i znormalizowanego naprężenia momentowego $m_2/(h_s d_{50})$ w funkcji u_1'/h oraz rozkład obrotu Cosseratów ω^c i wskaźnika porowatości e wzdłuż znormalizowanej wysokości x_2/d_{50}

Fig.1. Evolution of normalised shear stresses σ_{12}/h_s and σ_{21}/h_s , mobilised friction angle φ_w and normalised couple stress $m_2/(h_s d_{50})$ versus u_1'/h , and distribution of Cosserat rotation ω^c and void ratio e across normalised height x_2/d_{50}



Rys.2. Przebieg wskaźnika porowatości e wzdłuż wysokości warstwy w funkcji u_1'/h dla $x_2/d_{50}=3$ i $x_2/d_{50}=19$ oraz zdeformowana siatka z rozkładem e po wstępnym ścinaniu i po 6 cyklu
 Fig.2. Evolution of void ratio e across layer height versus u_1'/h at $x_2/d_{50}=3$ and $x_2/d_{50}=19$, and deformed mesh with distribution of e after initial shearing and after 6th shear cycle

W środku warstwy tworzy się strefa ścinania, która się charakteryzuje się wyraźną obecnością obrotu Cosseratów i znacznym wzrostem wskaźnika porowatości. Na brzegach strefy ścinania ma miejsce duży skok naprężeń i naprężenia momentowego. Szerokość strefy ścinania na podstawie obrotu Cosseratów jest równa $14 \times d_{50}$ po wstępnym ścinaniu i $18 \times d_{50}$ po zakończeniu 6 cyklu. Największy wzrost szerokości strefy występuje w pierwszych cyklach. Współczynniki naprężeń σ_{11}/σ_{22} i σ_{11}/σ_{33} są równe 1 w strefie ścinania w stanie rezydualnym.

5. Wnioski

Obliczenia MES dla ścinania cyklicznego warstwy piasku zagęszczonego pokazały, że:

1. Wysoka amplituda cyklicznego ścinania wpływa na szerokość lokalizacji odkształceń stycznych. Wzrost liczby cykli powoduje wzrost szerokości lokalizacji.
2. Każda zmiana kierunku ścinania powoduje nieznaczne zmniejszenie wskaźnika porowatości (zagęszczenie) w całej warstwie.
3. W strefie ścinania występuje obrót Cosseratów, duży wskaźnik porowatości i brak symetrii tensora naprężeń. Na jej brzegach występują duże gradienty krzywizn i naprężeń.
4. Znajomość zachowania się gruntów podczas cyklicznego ścinania ma duże znaczenie praktyczne podczas trzęsienia ziemi i dynamicznego oddziaływania maszyn.

LITERATURA

1. I. Vardoulakis: Shear band inclination and shear modulus in biaxial tests, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 4, 1980, 103-119.
2. T. Yoshida, F. Tatsuoka, M. Siddiquee: Shear banding in sands observed in plane strain compression, *Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, eds.: R. Chambon, J. Desrues, I. Vardoulakis, Balkema, Rotterdam, 1994, 165-181.
3. J. Desrues, R. Chambon, M. Mokni, F. Mazerolle: Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography, *Géotechnique*, 46, 3, 1996, 529-546.
4. J. Tejchman, I. Herle, J. Wehr: FE-studies on the influence of initial void ratio, pressure level and mean grain diameter on shear localisation, *Int. Journ. Num. Anal. Methods Geomechanics*, 23, 15, 1999, 2045-2074.
5. 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.
6. J. Tejchman: Patterns of shear zones in granular materials within a polar hypoplastic continuum, *Acta Mechanica*, 155, 1-2, 2002, 71-95.
7. G. Gudehus: A comprehensive constitutive equation for granular materials, *Soils and Foundations*, 36, 1, 1996, 1-12.

8. I. Herle, G. Gudehus: Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 4, 5, 1999, 461-486.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

Paper deals with numerical simulations of the behaviour of granular bodies under cyclic shearing. Shearing of an infinite narrow layer of cohesionless sand between two very rough boundaries under constant vertical pressure is numerically modelled with a finite element method using a polar hypoplastic constitutive relation. The constitutive relation is obtained through an extension of a non-polar one by polar quantities, viz. rotations, curvatures, couple stresses using the mean grain diameter as a characteristic length. This relation can reproduce the essential features of granular bodies during shear localisation. The material constants can be easily determined from element test results and can be estimated from granulometric properties. The attention is paid on the influence of the number of cycles on the thickness of an induced shear zone in dense granular specimen.