# *Od mechaniki do mikro-mechaniki gruntów* – znaczenie badań podstawowych dla geotechniki na przykładzie problemu parcia czynnego

Prof. dr hab. inż. Danuta Leśniewska – Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku Dr inż. Magdalena Pietrzak, Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

Podkreślając wagę badań podstawowych ośrodków gruntowych, Międzynarodowe Stowarzyszenie Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ISSMGE), którego członkiem jest Polski Komitet Geotechniki, powołało komitet techniczny TC105 pod nazwą Geo-Mechanics from Micro to Macro. Celem działania tego komitetu jest wspieranie współpracy i wymiany informacji dotyczącej zachowania ziaren gruntu i ich wzajemnego oddziaływania, w celu wyjaśnienia podstawowych mikro-mechanizmów odpowiedzialnych za zachowanie się gruntu. W szczególności komitet zaleca:

 promowanie udoskonalonego modelowania za pomocą elementów dyskretnych (*discrete element modelling DEM*) w zastosowaniu do gruntów, poprzez symulację badań laboratoryjnych, zwłaszcza dotyczących kruszenia i reorientacji ziaren,

- zachęcanie do mikro-strukturalnego ujęcia ważnych zjawisk makroskopowych, takich jak: ściśliwość gruntów, anizotropia, plastyczność, pełzanie, cykliczne upłynnianie, zniszczenie na skutek przenoszenia naprężeń ścinających czy pękanie przy rozciąganiu,
- otwarcie dyskusji dotyczącej stosowania pomiarów mikro-strukturalnych w celu udoskonalenia procedur charakteryzujących grunty (uziarnienie, wskaźnik plastyczności, CPT/SPT itp.) oraz uzasadnienie wyboru i stosowania parametrów pochodzących z mechaniki ośrodków ciągłych w praktyce geotechnicznej.

W dalszej części artykułu przedstawiono zgodne z tymi zaleceniami badania stanu parcia czynnego w gruntach. Składają się na nie badania fizyczne modelu konstrukcji oporowej w małej skali, których celem było dokładne rozpoznanie pola deformacji i układu sił kontaktowych między ziarnami w momencie osiągnięcia stanu granicznego nośności lub użytkowalności oraz symulacje numeryczne metodą DEM. Zamysłem artykułu jest pokazanie możliwości, jakie stwarza zastosowanie obu metod.

## STAN PARCIA CZYNNEGO W KONSTRUKCJACH OPOROWYCH

Opis stanu parcia czynnego ośrodka sypkiego stanowi jedną z podstawowych koncepcji klasycznej mechaniki gruntów, która wywodzi się z historycznych obserwacji mechanizmu zniszczenia konstrukcji oporowych. Pierwszą analizę wielkości parcia na ścianę przeprowadził Coulomb w swojej fundamentalnej pracy [1], w której sformułował koncepcję ruchu klina odłamu poruszającego się wzdłuż linii poślizgu w kierunku 'od gruntu' (rys. 1). Był to pierwszy opis mechanizmu zniszczenia ściany oporowej i jednocześnie pierwsza definicja stanu parcia czynnego.

Postulując pojawienie się ruchomego klina gruntowego o skończonych wymiarach, Coulomb przewidział również (choć nieświadomie) zjawisko lokalizacji odkształceń, ponieważ linia poślizgu ograniczająca klin odłamu jest niczym innym jak prekursorem dzisiejszej koncepcji lokalizacji deformacji. Na rys. 1 przedstawiono sposób wyznaczenia wartości parcia czynnego w funkcji kąta nachylenia klina odłamu na podstawie analizy równowagi układu sił działających na klin. Maksimum otrzymanej w ten sposób funkcji  $E_a(\theta)$  pozwoliło na określenie granicznego nachylenia klina odłamu do poziomu, równego  $45^\circ + \phi/2$ i uzyskanie granicznej wartości parcia czynnego ośrodka sypkiego, wyrażającej się dobrze znaną zależnością:

$$E_a = \frac{1}{2}\gamma \cdot \mathrm{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \cdot H^2$$

gdzie:

 $\gamma$  – ciężar objętościowy,

### H – wysokość klina.

## MECHANIZM ZNISZCZENIA KONSTRUKCJI OPOROWEJ

Problem parcia gruntu na elementy konstrukcji wciąż stanowi aktualne wyzwanie naukowe, pomimo poświęconych jego rozwiązaniu licznych prac doświadczalnych i teoretycznych, opublikowanych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat.



#### Rys. 1. Klasyczna analiza problemu parcia czynnego

a) siły utrzymujące w równowadze klin Coulomba ( $E_a$  – parcie czynne, W – ciężar klina, R – wypadkowa reakcja gruntu, T – tarcie na linii poślizgu,  $\phi$  – kąt tarcia wewnętrznego gruntu,  $\theta$  – kąt nachylenia linii poślizgu do poziomu), b) siła parcia jako funkcja kąta nachylenia klina do poziomu, c) przykłady zależności wielkości parcia od kąta nachylenia klina dla dwóch wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  – wartość maksymalna na wykresie definiuje graniczne parcie czynne

Najwięcej trudności sprawia wyjaśnienie fizycznego mechanizmu zniszczenia konstrukcji oporowej, a w szczególności określenie natury lokalizacji odkształceń, odpowiedzialnej za utratę stateczności. W opisie mechanizmu zniszczenia konstrukcji oporowych elementem niezmiennym od czasu publikacji pracy Coulomba w roku 1776 jest występowanie klina odłamu, który zgodnie z oryginalną koncepcją traktowany był jako ciało sztywne ograniczone linią prostą (rys. 1).

W miarę rozwoju wiedzy i technik badawczych okazało się, że geometria klina odłamu może być bardziej złożona i że może on również odkształcać się, w stopniu zależnym od nałożonych warunków brzegowych, co pokazano na rys. 2 (zdjęcie 1 i 2). Największym wyzwaniem pozostało jednak zrozumienie fizycznej natury lokalizacji odkształceń oddzielającej klin odłamu od pozostałej masy gruntowej.

Pierwszą koncepcją opisu lokalizacji odkształceń była linia poślizgu o nieskończenie małej szerokości, przyjęta w analizie stateczności nie tylko konstrukcji oporowych, ale również skarp i zboczy, w metodach takich jak metoda Bishopa czy Janbu. Wszechstronne badania modelowe ścian oporowych w małej skali, przeprowadzone z wykorzystaniem techniki radiograficznej, pokazały, że lokalizacja odkształceń nie może być aproksymowana matematyczną krzywą lub linią, ponieważ ma ona pewną skończoną szerokość i zawiera stosunkowo dużą liczbę ziaren. Przykład badań modelowych konstrukcji oporowych, wykonanych na Uniwersytecie w Cambridge i zebranych w pracy [3] przedstawiono na rys. 2 (zdjęcie 3). Zdjęcie to pokazuje zmiany gęstości piasku, utrzymywanego w równowadze przez model ścianki szczelnej, widoczne dzięki prześwietleniu modelu w aparacie rentgenowskim jako ciemne pasma.

Pasma wskazują miejsca, gdzie piasek uległ rozluźnieniu. Tworzą one, jak widać, regularną siatkę. Szerokość poszczególnych pasm obejmuje w przybliżeniu 10 ziaren piasku. W ten sposób potwierdzono wcześniejsze obserwacje świadczące o złożoności procesów zachodzących w lokalizacjach odkształceń, nazywanych również pasmami ścinania. Faktu, że wypełniający pasma ścinania ośrodek ulega dylatacji (zwiększa swoją objętość), nie można opisać, używając klasycznej mechaniki ośrodków ciągłych.

# DOŚWIADCZALNE BADANIE PASM ŚCINANIA W WARUNKACH PARCIA CZYNNEGO OŚRODKA

Dzięki rozwojowi fotografii cyfrowej i metod analizy obrazu, takich jak DIC (cyfrowa korelacja obrazu) czy PIV (*particle image velocimetry*), w latach dziewięćdziesiątych XX wieku możliwe stały się znacznie dokładniejsze badania lokalizacji odkształceń definiujących mechanizmy zniszczenia między innymi konstrukcji oporowych. Można było przy tym zrezygnować z konieczności stosowania znaczników, których przykłady pokazano na rys. 2, ponieważ sama tekstura obrazów cyfrowych pozwala na wyznaczanie pól przemieszczeń, a na ich podstawie pól odkształceń, z bardzo dużą dokładnością.

Ponieważ na typowy mechanizm zniszczenia ściany oporowej składa się prosty układ pasm ścinania (często jedno dobrze wykształcone pasmo), w ostatnim czasie nastąpił powrót do badania modeli konstrukcji oporowych, co jest związane z potrzebą badania własności lokalizacji odkształceń w bardziej złożonych i mniej jednorodnych warunkach brzegowych niż te oferowane przez badania elementowe. Na przykład Niedostatkiewicz i in. [8] badali doświadczalnie układy pasm ścinania zarówno dla stanu parcia czynnego, jak i biernego gruntu, a Vo i Russel [10] badali zachowanie gruntu nienasyconego w kontakcie z modelem ściany oporowej, która ulega obrotowi. Marshall i in. [6] przeprowadzili natomiast badania ściany oporowej w małej skali w stanie parcia biernego, w celu obserwacji mechanizmów zniszczenia materiałów ziarnistych dla różnych przyspieszeń grawitacyjnych.



#### Rys. 2. Tradycyjne sposoby wizualizacji mechanizmów zniszczenia konstrukcji oporowych

I – badania modelowe konstrukcji oporowej z gruntu zbrojonego (M. Kulczykowski, IBW PAN, 2000), 2 – badania modelowe zakotwień gruntowych (J. Kwaśniewski, IBW PAN, 1964), 3 – badania modelowe ścianki szczelnej (G.W.E. Milligan, Uniwersytet Cambridge, 1974 [3])



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego po wypełnieniu granulkami szklanymi i nałożeniu obciążenia

Podobną linię badań reprezentują prace [4] oraz [7] – wykorzystano w nich model ściany oporowej w stanie parcia czynnego do badania pól odkształceń i pól sił kontaktowych między ziarnami, stosując ośrodek zastępczy (granulki szklane).

Na rys. 3 przedstawiono schemat zastosowanego stanowiska badawczego, na które składa się prostopadłościenny pojemnik z dwiema szybami (o wymiarach pokazanych na rysunku) oraz system obciążający.

W tym stanowisku szklane granulki o krzywej przesiewu odpowiadającej jednorodnemu piaskowi grubemu ( $D_{50} = 1,0$  mm) utrzymywane są w równowadze przez model ściany oporowej, umieszczony po jego prawej stronie.

Przezroczyste granulki szklane użyte jako model gruntu umożliwiają wykorzystanie efektu elasto-optycznego do obserwacji pól sił kontaktowych między ziarnami. W badaniach wykorzystuje się procedurę opisaną w pracy [4], polegającą na pionowym obciążeniu próbki za pomocą pięciu stykających się segmentów, z których każdy może osobno osiadać pod obciążeniem (rys. 3). Segmenty połączone są ze wspólnym źródłem ciśnienia, dzięki czemu nawet w przypadku różnych wartości osiadania, nacisk na każdy z nich pozostaje stały. Próbkę nasyca się cieczą immersyjną o współczynniku załamania światła równym współczynnikowi załamania szkła, z którego wykonane są granulki, aby umożliwić obserwację efektu elasto-optycznego wywołanego pionowym obciążeniem o wartości z zakresu  $0 \div 4,0$  MPa.

W końcowym etapie badania obserwuje się deformację próbki wywołaną powolną translacją ścianki w kierunku od gruntu. Stan próbki po każdym przyroście obciążenia i przemieszczenia jest rejestrowany w świetle zwykłym i w świetle kołowo spolaryzowanym. Zdjęcia wykonane w świetle zwykłym służą do analizy obrazu metodą DIC. Na rys. 4 pokazano przykład takiej analizy wykonanej na dwóch kolejnych fotografiach modelu konstrukcji oporowej zarejestrowanych w odstępie czasu odpowiadającym jednostkowemu przemieszczeniu ścianki. Kolor niebieski na rys. 4a oznacza małe, a kolor czerwony maksymalne odkształcenia. Brak zmian objętościowych na rys. 4b oznaczony jest kolorem zielonym, kolor niebieski oznacza rozluźnianie, a czerwony zagęszczenie ośrodka.

Na rys. 4 widać wyraźną lokalizację odkształceń postaciowych i objętościowych, które ograniczają z lewej strony obszar klina odłamu. Klin ten jest prostoliniowy tylko w dolnej części, w górnej ma wyraźną krzywiznę. We wnętrzu klina można zaobserwować niewielkie odkształcenia, zarówno postaciowe, jak i objętościowe. Wielkość odkształceń wewnątrz pasma ścinania nie jest stała. Maksymalne odkształcenia postaciowe występują w osi pasma, w jego górnej części.



Rys. 4. Przykład lokalizacji odkształceń tworzącej najczęściej obserwowany w badaniach doświadczalnych mechanizm zniszczenia modelu konstrukcji oporowej, widoczny dzięki analizie obrazu metodą DIC (program geoPIV)
 a) odkształcenia postaciowe, wyrażone w procentach, b) odkształcenia objętościowe, wyrażone w procentach



Rys. 5. Zależność mechanizmu zniszczenia modelu konstrukcji oporowej od wartości obciążenia pionowego *p* (analiza metodą DIC)
A) odkształcenia postaciowe, B) odkształcenia objętościowe, *I - p* = 2,4 MPa, 2 - *p* = 1,6 MPa, 3 - *p* = 0,4 MPa

Na rys. 5 pokazano szczególny etap trzech badań modelowych wykonanych przy różnych wartościach obciążenia pionowego *p*: 2,4 MPa, 1,6 MPa i 0,4 MPa. Wybrano moment, gdy nachylenie głównej lokalizacji jest bliskie nachyleniu granicznego klina Coulomba do poziomu ( $45^\circ + \phi/2$ ).

Pojawienie się charakterystycznego układu lokalizacji widocznego na rys. 5 świadczy o tym, że mechanizm zniszczenia konstrukcji oporowej jest złożony i zawiera zarówno pasma ścinania o geometrii pokazanej na rys. 4, jak i prostoliniowe pasmo o nachyleniu odpowiadającym nachyleniu klina Coulomba, przy czym mechanizm z rys. 4 przeważa w końcowej fazie doświadczenia.

# NUMERYCZNA ANALIZA PASM ŚCINANIA W WARUNKACH PARCIA CZYNNEGO OŚRODKA

Na rys. 5 pokazano również wyraźny brak ciągłości pasm ścinania na poziomie całego modelu (w skali makro) wynikający z dyskretnej natury ośrodków sypkich. Stosunkowo niewielka objętość pasm i ich szerokość rzędu dziesięciu średnic ziarna sugerują, że dokładny opis warunków i momentu utraty stateczności przez model konstrukcji oporowej wymaga zrozumienia procesów zachodzących w skali pojedynczych ziaren (skali mikro). Wyniki badań doświadczalnych, analizowane za pomocą analizy obrazu, pozwalają tylko w pewnym stopniu na badanie stanu ośrodka wewnątrz pasm ścinania. Stan ten bardziej do-



Rys. 6. Porównanie wyników badania modelowego i symulacji DEM dla schematu z rys. 3 *I* – badanie doświadczalne, *2* – symulacja numeryczna metodą DEM

kładnie można określić za pomocą modelowania numerycznego metodą DEM, pod warunkiem możliwości weryfikacji modelu na podstawie właściwych danych doświadczalnych.

Metoda symulacji DEM dzięki wydajności współczesnych komputerów pozwala na tworzenie i obserwację zachowania wirtualnych próbek zawierających wiele tysięcy ziaren. Stosuje się ją również w przypadku problemu parcia gruntu. Ostatnio Widuliński i in. [9] oraz Jiang i in. [2] przeanalizowali za pomocą symulacji DEM parcie gruntu na sztywną ścianę oporową, stosując model kontaktu uwzględniający opór toczenia między cząstkami.

Badania modelowe, których schemat przedstawiono na rys. 3, były również przedmiotem analizy DEM [5], w ramach której stworzono numeryczny model problemu.

Na rys. 6 przedstawiono porównanie mechanizmów zniszczenia modelu fizycznego (A1) oraz numerycznego (A2) i odpowiadające im doświadczalne (B1) i symulowane numerycznie (B2) pola sił kontaktowych. Wykazują one wystarczające jakościowe i ilościowe podobieństwo, pozwalające na badanie przebiegu lokalizacji oraz podstawowych oddziaływań między ziarnami we wszystkich rejonach próbki.

## PODSUMOWANIE

Zastosowanie analizy DEM do problemu parcia czynnego gruntu pozwoliło na stworzenie zweryfikowanego doświadczalnie modelu numerycznego, dzięki czemu możliwa będzie jednoczesna analiza zachowania materiału ziarnistego w skali mikro (pojedynczych ziaren) i w skali makro (całego modelu) oraz zdefiniowanie mechanizmów przejścia między skalami – od parametrów dyskretnych do opisu ciągłego badanego ośrodka.

#### LITERATURA

1. Coulomb C. A.: Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelqes problemas de stratique relatifs a l'architecture. Memoires de mathematique et de physique. Presentes a l'Academie Royale des Sciences, 1776, 343-382.

2. Jiang M., He J., Wang J., Liu F. i Zhang W.: Distinct simulation of earth pressure against a rigid retaining wall considering inter-particle rolling resistance in sandy backfill. Granular Matter, 16, 2014, 797-814.

3. Leśniewska D.: Analysis of shear band pattern formation in soil. IBW PAN, Gdańsk 2000.

4. Leśniewska D., Muir Wood D.: Photo-elastic and photographic study of a granular material. Geotechnique, 60, 2010, 903-911.

5. Leśniewska, D. Nitka, M., Tejchman J., Pietrzak M., Radosz I.: Contact force distribution in active state of granular material by photo-elasticity and discrete element method. Praca złożona w redakcji, 2019.

6. Marshall J. P., Hurley R. C., Arthur D., Vlahinic I., Senatore C., Iagnemma K., Trease B. i Andrade J.: Failures in sand in reduced gravity environments. Jnl of the Mechanics and Physics of Solids, 113, 2018, 1-12.

7. Muir Wood D. i Leśniewska D.: Stresses in granular materials. Granular Matter, 13, 2011, 395-415.

8. Niedostatkiewicz M., Leśniewska D. i Tejchman J.: Experimental analysis of shear zone patterns in sand for earth pressure problems using Particle Image Velocimetry. Strain, 47 (2), 218-231, 2011.

9. Widulinski L., Tejchman J., Kozicki J. i Leśniewska D.: Discrete simulations of shear zone patterning in sand in earth pressure problems of a retaining wall. Int. J. Solids and Structures, 48 (7-8), 2011, 1191-1209.

10. Vo T. i Russell A.: Unsaturated soil interacting with a rotating model wall. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 13 (2), 2013, 63-78.