ŚRODOWISKO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-Ś/2010
ZESZYT 16
ROK 107
ISSUE 16
YEAR 107

TOMASZ WILK*

TAROWANIE NUMERYCZNEGO MODELU GRUNTU SYPKIEGO NA PODSTAWIE BADAŃ LABORATORYJNYCH

COHESIONLESS SOIL NUMERICAL MODEL CALIBRATION BASED ON LABORATORY EXPERIMENTS

Streszczenie

W artykule przedstawiono proces tarowania numerycznego modelu gruntu sypkiego odwzorowującego poszczególne ziarna gruntu. Tarowanie oparte na gradiencie krytycznym przeprowadzono dla modelu nieuwzględniającego tarcia pomiędzy ziarnami. Model z tarciem wytarowano przy pomocy badań laboratoryjnych.

Słowa kluczowe: numeryczny model gruntu, erozja wewnętrzna, bezpieczeństwo budowli hydrotechnicznych

Abstract

This paper presents the process of calibrating cohesionless soil numerical model. The model consists of separate soil particles. For the frictionless model, calibrating on critical hydraulic gradient is used. Model with friction is calibrated using laboratory experiments.

Keywords: numerical soil model, internal erosion, hydraulic structures safety

* Mgr inż. Tomasz Wilk, Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

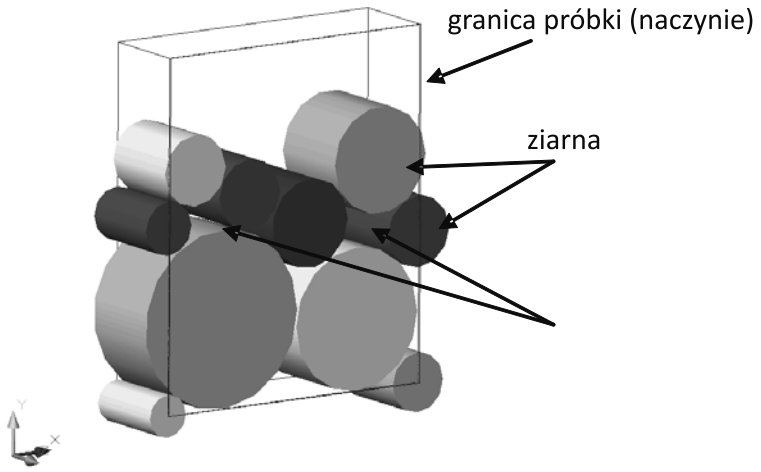
1. Założenia modelu numerycznego

Celem projektu opisanego w tym artykule było stworzenie modelu numerycznego gruntu sypkiego dla celów badania procesów erozji wewnętrznej pod wpływem filtrującej wody. Problem stabilności gruntu ze względu na filtrację ma duże znaczenie w przypadku budowli hydrotechnicznych, zarówno betonowych, gdzie sprawdzać należy parametry filtracji w gruncie pod budowlą, jak również, w większym stopniu, w przypadku budowli ziemnych, gdzie filtracja występuje zarówno w podłożu, jak i w samej budowli [3]. Stosowane do tej pory kryteria rozpoczęcia procesów erozyjnych mają w większości charakter empiryczny [3, 5, 10]. Takie kryteria nie uwzględniają rzeczywistych procesów zachodzących w gruncie, a jedynie ich skutki.

W celu uwzględnienia rzeczywistych procesów zachodzących w gruncie pod wpływem obciążeń filtracyjnych w procesie oceny bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych, opracowano model numeryczny gruntu z następującymi założeniami:

– grunt jest sypki – nie występują siły spójności,
– każde ziarno gruntu modelowane jest jako osobna bryła sztywna,
– model jest dwuwymiarowy, tj. ziarna modelowane są jako walce o wysokości jednostkowej,
– energia tracona przez wodę przy przejściu przez próbkę jest równa pracy sił oddziaływania wody na grunt.

Model numeryczny gruntu oparty na pojedynczych ziarnach musi odwzorowywać siły działające na poszczególne ziarna. W opracowanym modelu uwzględniono siły grawitacji, wyporu, reakcje wewnętrzne na styku ziaren, efekt ściany na styku ziaren z naczyniem i siły oddziaływania wody przepływającej przez ośrodek na ziarna gruntu. Uproszczony model zbudowany na tych założeniach przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony model mikrostrukturalny gruntu

Fig. 1. Simplified microstructural soil model

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W pierwszym modelu, opisanym dokładniej w pracy [9] nie uwzględniono sił tarcia. W tym modelu ruch cząstek gruntu odbywał się w kierunku minimalizującym energię potencjalną układu. Od strony matematycznej zadanie zostało sprowadzone do zadania optymalizacji nieliniowej, gdzie funkcją celu była energia potencjalna wynikająca z przebywania ziaren gruntu w polu sił zewnętrznych, takich jak grawitacja, wypór i parcie dynamiczne przepływającej cieczy. Do zadania wprowadzono ograniczenia związane z nieprzenikaniem się brył sztywnych oraz ograniczeniem w postaci naczynia. Zadanie nieliniowe zostało sprowadzone do zadania programowania liniowego poprzez rozwinięcie nieliniowych ograniczeń w szereg Taylora z ograniczeniem do dwóch pierwszych członów.

W kolejnym modelu wprowadzono siły tarcia. Uniemożliwiło to wykorzystanie zadania minimalizacji energii potencjalnej układu, gdyż pole sił tarcia nie jest zachowawcze, co powoduje, że energia potencjalna sztywnej bryły zależy od drogi przebytej przez bryłę. Aby rozwiązać ten problem, wprowadzono nowy mechanizm ruchu oparty o równania ruchu Newtona:

$$\mathbf{Y}(t) \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \boldsymbol{\alpha}(t) \\ \mathbf{V}(t) \\ \boldsymbol{\omega}(t) \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$\frac{d}{dt}\mathbf{Y}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{V}(t) \\ \boldsymbol{\omega}(t) \\ \dfrac{\mathbf{F}(t)}{\mathbf{M}} \\ \dfrac{\boldsymbol{\tau}(t)}{\mathbf{I}} \end{pmatrix} \tag{2}$$

gdzie:

- t – czas,
- $\mathbf{Y}$ – wektor stanu układu,
- $\mathbf{x}$ – wektor położenia brył,
- $\boldsymbol{\alpha}$ – wektor kątów obrotu,
- $\mathbf{V}$ – wektor prędkości liniowych,
- $\boldsymbol{\omega}$ – wektor prędkości kątowych,
- $\mathbf{F}$ – wektor przyłożonych sił,
- $\mathbf{M}$ – wektor mas brył,
- $\boldsymbol{\tau}$ – wektor momentów,
- $\mathbf{I}$ – wektor momentów bezwładności.

Modelowanie ruchu brył sztywnych opisano szeroko m.in. w [2]. W tej wersji modelu ograniczenia związane z nieprzenikaniem się brył sztywnych uwzględnione są jedynie jako siły i momenty kontaktowe. W celu obliczenia sił wewnętrznych i sił tarcia posłużono się metodą opisaną w [1].

Spośród wyżej wymienionych sił działających na ziarna gruntu, jedynie siła parcia dynamicznego wody nie da się wyliczyć analitycznie na podstawie geometrii układu. W celu obliczenia sił związanych z oddziaływaniem płynącej wody przyjęto, że całkowita energia stracona przez strumień przypływający przez próbkę równa jest pracy wykonanej przez siły działające na ziarna na drodze przepływu przez pory w gruncie.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jako warunek brzegowy modelu przyjmuje się spadek hydrauliczny I, który wyraża się jako iloraz różnicy ciśnień piezometrycznych przed i po przejściu przez próbkę gruntu i odległości pomiędzy punktami, w których ta różnica jest obserwowana. Ze spadku hydraulicznego można wyprowadzić wysokość straconej energii Δh. Aby zamienić wysokość energii na jednostki energii straconej przy przepływie przez badany obszar, przeprowadzono następujące rozumowanie.

Przepływ przez model można wyrazić następującym wzorem

$$Q = V_f F \tag{3}$$

gdzie:

Q – wydatek,
V_f – prędkość filtracji,
F – pole powierzchni przekroju próbki poprzecznego do kierunku filtracji.

W jednostce czasu tracona jest następująca ilość energii

$$\omega_E = \rho_w Q g \Delta h \tag{4}$$

gdzie:

ω_E – ilość energii tracona w jednostce czasu,
ρ_w – gęstość objętościowa wody,
g – przyspieszenie ziemskie,
Δh – zmiana wysokości.

Jest to masa (iloczyn gęstości wody i przepływu), która w ciągu sekundy traci w polu przyciągania ziemskiego g wysokość Δh.

Czas przepływu wody przez model gruntu niespoistego (od momentu wpłynięcia powierzchni kontrolnej do jej wypłynięcia) zależy od prędkości filtracji i długości drogi filtracji Δl

$$t = \frac{\Delta l}{V_f} \tag{5}$$

Całkowita energia stracona przez wodę przepływającą przez próbkę wyniesie zatem

$$E_{str} = \omega_E t \tag{6}$$

Wstawiając do powyższego wzoru zależności (3), (4) i (5), podstawiając za iloczyn drogi filtracji i przekroju poprzecznego objętość próbki V_{obj}, oraz za iloczyn gęstości wody i przyspieszenia ziemskiego ciężar objętościowy wody γ_w, otrzymano ostateczną postać zależności na energię strumienia straconą przy przepływie przez badany obszar od momentu wpłynięcia do wypłynięcia

$$E_{str} = \gamma_w V_{obj} \Delta h \tag{7}$$

Siła, z jaką strumień działa na opływane ciało, w przypadku ruchu laminarnego wynosi [7]

$$P_d = \frac{c}{2} \mu V_{rz} \frac{A_x}{l} \tag{8}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

P_d – siła parcia dynamicznego,
c – stała zależna od kształtu ciała,
μ – dynamiczny współczynnik lepkości,
V_{rz} – rzeczywista prędkość strumienia opływającego ciało,
A_x – powierzchnia rzutu ciała na płaszczyznę normalną do kierunku prędkości,
l – wybrany wymiar liniowy.

Warunkiem stosowalności powyższego wzoru jest, aby strumień opływający ciało był nieograniczony. W przypadku rozważanego modelu warunek ten nie jest spełniony. Każde ziarno styka się z innymi. Bez skomplikowanej analizy geometrii układu rzeczywistego nie da się w sposób jednoznaczny określić, jaki wpływ na parcie dynamiczne ma sąsiedztwo innych ziaren. W związku z tym przyjęto, że wpływ ten jest stały dla wszystkich ziaren i określony stałym współczynnikiem α_1, zawierającym również pozostałe stałe z równania (8). Iloraz A_x i l zastąpiono przez średnicę ziarna d. Ostatecznie parcie dynamiczne wyrażono wzorem

$$P_d = \alpha_1 V_{rz} d \tag{9}$$

W rzeczywistości kierunek siły parcia zależy od geometrii porów i lokalnego kierunku przepływu wody (siła parcia dynamicznego działa równolegle do wektora prędkości wody). W przypadku rozpatrywanego modelu nie możliwe jest ustalenie lokalnych wektorów prędkości wody. W konsekwencji przyjęto, że parcie dynamiczne działa w kierunku uśrednionej prędkości wody w całej badanej objętości (tj. w kierunku wektora spadku hydraulicznego).

Do obliczenia pracy wykonywanej przez przepływający strumień na jednym ziarnie potrzebny jest odpowiednik drogi, na której działa parcie dynamiczne. Jedynym wymiarem różnicującym ziarna jest ich średnica. Założono więc, że poszukiwana droga jest liniową zależnością od średnicy ziarna ze współczynnikiem proporcjonalności α_2

$$s = \alpha_2 d \tag{10}$$

Praca wykonana przez strumień na jednym ziarnie wynosi

$$\Delta W = P_d s = \alpha_1 \alpha_2 V_{rz} d^2 \tag{11}$$

Rzeczywista prędkość przepływu wody w porach jest różna w każdym miejscu próbki, jednak obliczenie rozkładu tej prędkości wymagałoby precyzyjnej analizy geometrii porów w gruncie. W tym uproszczonym modelu w ogóle nie występują otwarte, połączone ze sobą pory. W związku z tym zastosowano uśrednienie prędkości rzeczywistej w całej objętości próbki. Występującą we wzorze (11) uśrednioną prędkość rzeczywistą wody w porach można obliczyć dzieląc prędkości filtracji przez porowatość próbki n.

Prędkość filtracji można obliczyć z prawa Darcy, którego założeniem jest przepływ laminarny. Spadek hydrauliczny I jest jednym z warunków narzuconych modelowi. Współczynnik filtracji k można obliczyć z wzoru Slichtera, na podstawie porowatości próbki i średnicy miarodajnej d_{10} [5]

$$k = 7,8 n^{3,26} d_{10}^2 \tag{12}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Wzór na prędkości filtracji przyjmie wtedy postać

$$V_f = 7,8n^{3,26}d_{10}^2 I \tag{13}$$

Warunek równowagi całkowitej energii straconej i pracy wykonanej przez siły oddziaływania strumienia na ziarna można zapisać jako

$$E_{str} = \sum \Delta W \tag{14}$$

Wstawiając do powyższego wzoru zależności (7), (11) i (13) i odpowiednio je przekształcając, otrzymano

$$\alpha_1\alpha_2 = \frac{\gamma_w V_{obj}\Delta l}{7,8n^{2,26}d_{10}^2\sum d_i^2} \tag{15}$$

Występująca w powyższym wzorze suma jest sumą kwadratów średnic wszystkich ziaren modelu.

Współczynnik α_2 jest współczynnikiem określającym drogę, na której działa siła parcia dynamicznego na ciało w zależności od jego kształtu. Współczynnik ten nie zależy od wymiaru charakterystycznego (tj. w tym przypadku od średnicy). Kształt ziaren jest stały (okrąg) nie tylko dla każdego ziarna w danej próbce, ale dla każdej próbki. W związku z tym można przypuszczać, że współczynnik α_2 jest stały. Aby go wyznaczyć należy model wytarować. W ten sposób można będzie z równania (15) wyprowadzić zależność na współczynnik α_2, pozwalający na obliczenie wartości siły parcia dynamicznego na poszczególne ziarna. Pozostałe wielkości we wzorze (15) – prawa strona równania – dają się wyznaczyć z geometrii modelu.

2. Tarowanie analityczne

Model energetyczny został wytarowany na podstawie rozważań na temat spadku krytycznego [8]. Spadek krytyczny I_k jest to taki spadek hydrauliczny po przekroczeniu, którego cząstki w gruncie zaczynają się poruszać (następuje zniszczenie struktury gruntu). Aby wyprowadzić wartość gradientu krytycznego, należy zdefiniować pojęcia ciśnienia skutecznego i obojętnego.

Ciśnieniem obojętnym p_m nazywamy ciśnienie przenoszone przez wodę wypełniającą pory w gruncie. Ciśnienie to nie powoduje zagęszczenia szkieletu gruntowego, ani nie wpływa na inne własności mechaniczne. Ciśnienie obojętne określone jest przez iloczyn wysokości piezometrycznej w danym punkcie h_m i ciężaru objętościowego wody

$$p_m = h_m\gamma_w \tag{16}$$

Ciśnienie skuteczne p_e przenosi się poprzez punkty styczności ziaren pomiędzy sobą i spowodowane jest ciężarem właściwym szkieletu gruntowego (należy uwzględnić w ciężarze właściwym wypór) γ'. Ciśnienie skuteczne na głębokości z pod poziomem terenu wynosi:

$$p_e = \gamma' z \tag{17}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Ciśnienie całkowite jest równe sumie ciśnienia skutecznego i obojętnego.

Rozpatrzmy próbkę gruntu ustawioną tak, aby przepływ mógł się odbywać na kierunku pionowym. W każdym miejscu próbki ciśnienie całkowite jest stałe. Jeśli więc zmianie ulegnie ciśnienie obojętne, to w odwrotną stronę musi się zmienić ciśnienie skuteczne. Po wywołaniu spadku hydraulicznego I (przepływ do góry) na dowolnej głębokości z pod powierzchnią próbki zmiana ciśnienia obojętnego na tej głębokości wyniosłaby $I{\cdot}z{\cdot}\gamma_w$. O taką samą wartość musi zmniejszyć się ciśnienie skuteczne

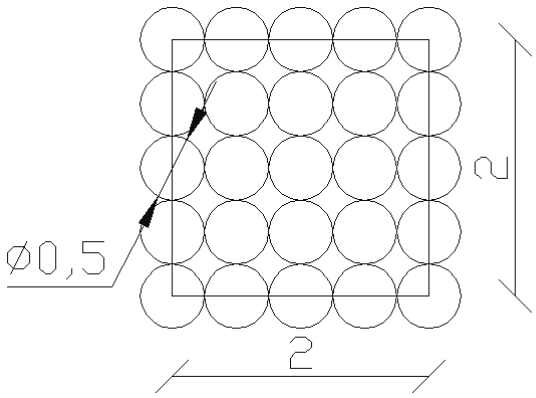
$$p_e = z\gamma_w - Iz\gamma_w \tag{18}$$

W przypadku zaistnienia spadku krytycznego ciśnienie skuteczne jest równe 0, stąd spadek krytyczny jest równy

$$I_k = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} \tag{19}$$

gdzie:

γ_s – ciężar objętościowy szkieletu gruntowego.



Rys. 2. Próbka użyta do tarowania metodą teoretyczną (wymiary w mm)

Fig. 2. Sample used to calibrate model with theoretical method (dimensions in mm)

Aby wytarować model rozpatrzono próbkę złożoną z 25 ziaren w kształcie walców o średnicy równej 0,5 mm i grubości 1 mm ułożonych w pięciu wierszach i pięciu kolumnach, na planie kwadratu o boku 2 mm. Rozpatrywany model przedstawiony jest na rysunku 2. Jako granicę modelu przyjęto wymiary naczynia tzn. fragmenty ziaren leżące poza naczyniem nie należą do modelu. W celu zachowania zgodności jednostek z modelem wszystkie wymiary liniowe podane są w mm, prędkości w m/s, a siły w N.

Zgodnie z powyższymi rozważaniami spadek krytyczny odpowiada sytuacji, w której pierwszy rząd ziaren nie przekazuje żadnych sił na rząd poniżej. Muszą się zatem równoważyć wszystkie zewnętrzne siły działające na ziarno. Warunek równowagi przedstawia następujące równanie

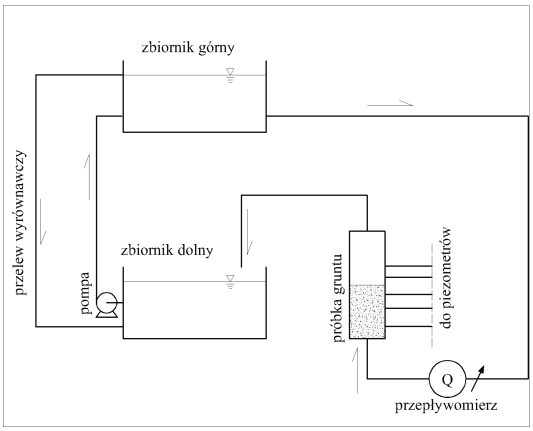
$$\alpha_1 V_{rz} d = \frac{\pi d^2}{4} b\gamma' \tag{20}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

gdzie:

b – grubość modelu (przyjęta jako jednostkowa).

Z równania (20) można obliczyć współczynnik α_1. Po wstawieniu go do równania (15) otrzymuje się współczynnik α_2. Współczynnik ten jest niezależny od wielkości próbki, a jego wartość wynosi 4. Podkreślić należy, że współczynnik α_2, którego określenie jest celem tego tarowania, nie zależy od sposobu ułożenia ziaren w naczyniu, a więc od porowatości. Wpływ geometrii uwzględniony jest poprzez współczynnik α_1 – zob. wzór (8).



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 3. Laboratory setting scheme



Fot. 1. Stanowisko pomiarowe

Photo. 1. Laboratory setting

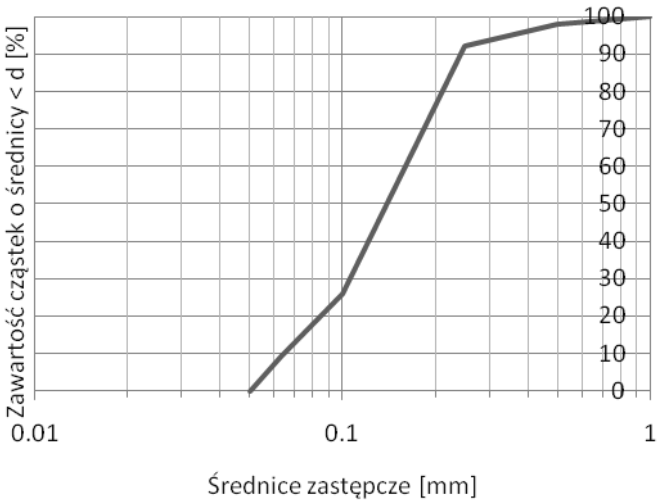
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Tarowanie na podstawie badań laboratoryjnych

Powyższe rozważania nie biorą pod uwagę klinowania się ziaren, tarcia itp. Z tego powodu zdecydowano się przeprowadzić kalibrację nowego modelu numerycznego na podstawie badań laboratoryjnych na stanowisku do badań sufozji [6]. Schemat stanowiska przedstawiony jest na rys. 3. Stanowisko podczas badań pokazane jest na fotografii 1.

Stanowisko pozwala na badanie zmian ciśnień piezometrycznych w próbce gruntu poddanej działaniu gradientu hydraulicznego. Stanowisko pozwala na automatyczne rejestrowanie wskazań piezometrów, temperatury wody i powietrza w pomieszczeniu oraz wielkości przepływu przez próbkę. Przepływ odbywa się ze zbiornika górnego (biały pojemnik w lewej górnej części fot. 1) do zbiornika dolnego (lewy dolny róg fot. 1) z możliwością regulacji wysokości obu zbiorników. Przepływ wprowadzany jest do próbki od dołu.

Na długości próbki zainstalowane są piezometry pozwalające na odczyt zmian wysokości piezometrycznych. Do rurek piezometrów podłączone są przetworniki ciśnienia o zakresie 0–3 m słupa wody i dokładności 0,1%, co daje odczyt z dokładnością ±3 mm. Przetworniki temperatury mają dokładność ±0,1°C. Przetworniki podłączone są do przetwornika analogowo-cyfrowego, podłączonego poprzez sieć Ethernet do komputera rejestrującego wyniki. Ze względu na dużą fluktuację odczytów z przetworników ciśnienia zdecydowano się na uśrednianie wartości z 1 minuty. Wyniki zapisywane były co 2 minuty.



Rys. 4. Krzywa przesiewu gruntu z zapory zbiornika Dębe

Fig. 4. Particle size distribution of soil from Dębe reservoir dike

Przepływ rejestrowany był przy pomocy przepływomierza włączonego w obieg pomiędzy zbiornikiem górnym a próbką. Dokładność przepływomierza wynosi 0,1 l/h. Aby zautomatyzować odczyty przepływu, zainstalowano kamerę skierowaną na przepływomierz. Kamera została podłączona do komputera, na którym skrypt uruchamiany automatycznie co 2 minuty przechwytywał obraz z kamery, zapisując go na dysku. Przetworzenie obrazów pozwoliło na

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

odczyt przepływu. W przypadku, gdy przepływ był za mały dla zainstalowanego przepływomierza, wydatek obliczano na podstawie pomiarów przy pomocy menzurki i stopera.

Do kalibracji modelu numerycznego wybrano grunt analogiczny do pobranego dla celów badań sufozji z zapory zbiornika Dębę [5]. W gruncie tym występowała sufozja w warunkach naturalnych, jak również w doświadczeniach laboratoryjnych dr Popielskiego [5]. Krzywa przesiewu dla tego gruntu przedstawiona jest na rys. 4. Grunt został odtworzony na podstawie krzywej przesiewu z poszczególnych frakcji. Frakcje uzyskano z przesiewu piasku rzecznego przez standardowe sita zgodnie z normą [11].

Grunt usypywany był warstwami po 300 g, a następnie zagęszczany ciężarkiem o masie ok. 2 kg równomiernie na całej powierzchni przekroju. Każdorazowo do gruntu przeznaczonego na kolejną warstwę dodawano wodę tak, aby uzyskać wilgotność 12% (wilgotność optymalna uzyskana przy badaniu w maszynie Proctora), co pozwoliło na optymalne zagęszczenie gruntu. Po zagęszczeniu próbki z nadmiarem, grunt wyrównano zgodnie z powierzchnią odcinka pomiarowego. Po przygotowaniu próbki dodano kolejny segment, aby umożliwić późniejsze rozprężenie próbki pod wpływem gradientu krytycznego. Próbkę napełniano od dołu wodą tak, aby umożliwić wydostanie się powietrza z porów. Próbkę pozostawiono na 2 dni pod wpływem minimalnego gradientu, aby usunąć resztki powietrza (fot. 2).

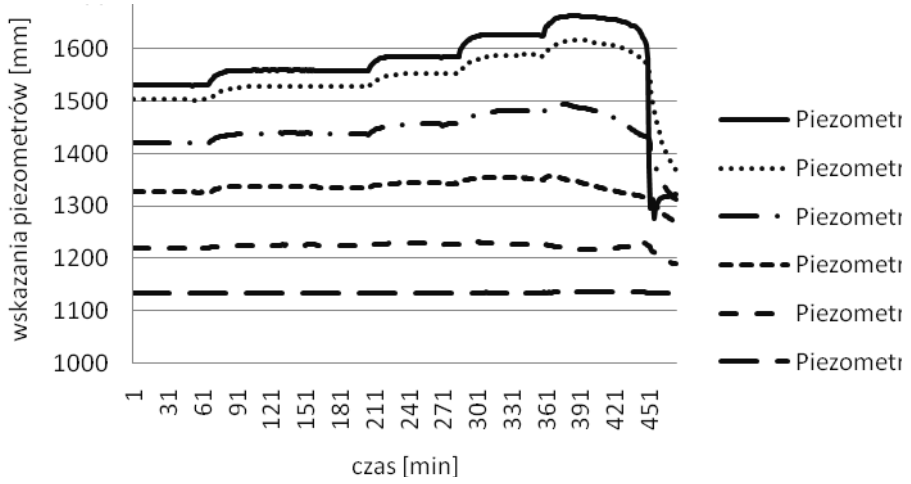


Fot. 2. Napełnianie próbki wodą i odpowietrzanie

Photo. 2. Filling sample with water and removing air

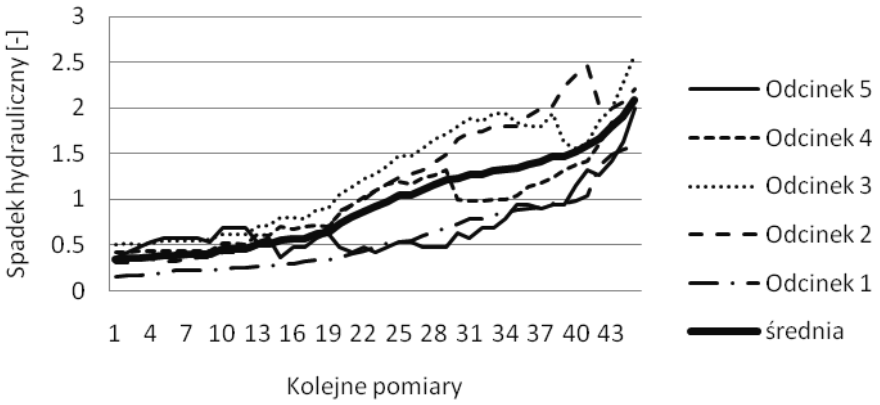
Aby wykryć moment zniszczenia próbki, postępowano w następujący sposób. Wylot zbiornika wody dolnej ustawiono na stałym poziomie. Zbiornik górny podnoszono stopniowo do góry. Po każdym zwiększeniu poziomu wody górnej oczekiwano na ustabilizowanie się przepływu. Za ustabilizowanie przepływu uznano brak zmian poziomów piezometrycznych przez 30 minut. Po ustabilizowaniu przepływu, przy braku widocznych zmian w próbce, kontynuowano zwiększanie poziomu wody górnej. Postępowano tak aż do zniszczenia próbki.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Wskazania piezometrów w końcowej części doświadczania

Fig. 5. Piezometer readings at final stage of the experiment



Rys. 6. Wykres spadku hydraulicznego na poszczególnych odcinkach pomiarowych

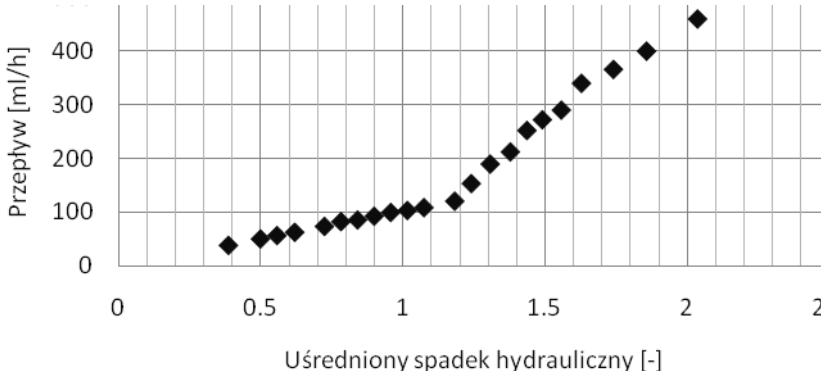
Fig. 6. Hydraulic gradient at subsequent parts of the sample

Na rys. 5 przedstawiono wskazania piezometrów na odcinku pomiarowym podczas ostatniej fazy doświadczenia. Widoczna jest wyraźnie granica gradientów, przy której grunt został zniszczony (czas oznaczony jako minuta 438). Maksymalny gradient występuje pomiędzy minutą 369, a 392. Należy zaznaczyć, że na osi poziomej przedstawiono wycinek czasu z końcowej części doświadczenia. Jedno doświadczenie trwało do miesiąca.

Na rys. 6 przedstawiono gradient hydrauliczny obliczony na podstawie wskazań piezometrów dla poszczególnych odcinków. Odcinki numerowane są od początku próbki, tj. od wody górnej. Grubszą linią zaznaczono średni spadek obliczony dla całej próbki. Wahania gradientów na poszczególnych odcinkach wynikają ze stabilizowania się przepływu i wy-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

równywania ciśnienia w porach gruntu. Średni gradient przyjęty jako gradient krytyczny dla tej konfiguracji gruntu wyniósł w przybliżeniu 2.1.



Rys. 7. Przepływ przez próbkę w funkcji przyłożonego spadku hydraulicznego

Fig. 7. Water flow through the sample as a function of hydraulic gradient

Zależność przepływu od zadanego gradientu pokazana jest na fot. 3. Widoczny na wykresie punkt zwrotny dla gradientu 1,2 nie spowodował widocznych zmian w próbce gruntu. Przepływ na styku gruntu z naczyniem został zahamowany poprzez dodanie 5 pierścieni z silikonu o wysokości ok. 5 mm na całym obwodzie. Zatem nie została w tym punkcie uruchomiona uprzywilejowana droga filtracji. Punkt zwrotny nie oznacza również przejścia z ruchu laminarnego do turbulentnego, gdyż nawet dla maksymalnego gradientu zarówno prędkość rzeczywista jak i prędkość filtracji była o rząd wielkości mniejsza od prędkości granicznej obliczonej dla liczby Reynoldsa Re = 1 ze wzoru Szczełkaczewa [4]:

$$V_{kr} = \frac{n^{2/3}\nu}{10\sqrt{K_p}} \tag{21}$$

$$K_p = k\frac{\eta}{\gamma_w} \tag{22}$$

gdzie:

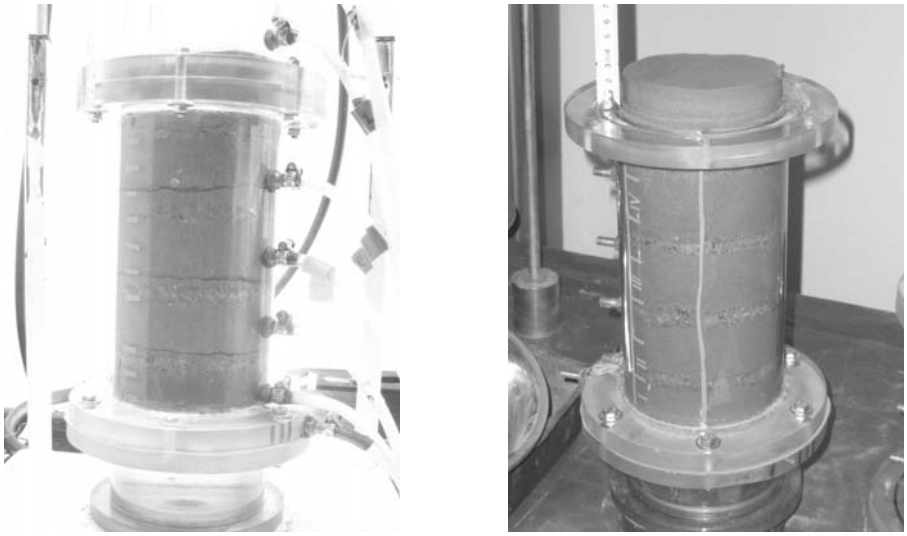
- n – porowatość,
- ν – współczynnik lepkości kinematycznej wody,
- K_p – współczynnik przepuszczalności,
- η – współczynnik lepkości dynamicznej,
- γ_w – ciężar właściwy wody.

Wobec braku możliwości odwzorowania pierwszego punktu zwrotnego na modelu numerycznym, został on wykalibrowany na punkt oznaczający zniszczenie próbki. Zniszczoną próbkę przedstawia fot. 3. Zaobserwować można zmętnienie wody nad próbką oznaczające wymycie cząstek pylastych. Jednocześnie grunt znacząco zwiększył swoją objętość. Zniszczenie struktury gruntu widoczne jest wyraźnie w postaci spękania bryły gruntu. Zniszczenie gruntu przebiegało bardzo szybko. Cały proces, łącznie z opadnięciem i zamknięciem szcze-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

lin, trwał około minuty. Po zniszczeniu próbki znacząco wzrósł współczynnik filtracji, zwiększając również przepływ przy tym samym położeniu zwierciadła wody górnej. Zainstalowany przepływomierz przy dużych prędkościach przepływu powoduje znaczne straty wysokości energii, co widoczne jest jako gwałtowny spadek poziomu wody w piezometrach (rys. 5).

a) b)



Fot. 3. Zniszczenie próbki: a) rysy powstałe przy zniszczeniu struktury, b) zwiększenie objętości

Photo 3. Sample destruction: a) structural cracks, b) volume increment

Eksperyment wykonano trzykrotnie, wykorzystując doświadczenie z kolejnych prób do zminimalizowania wpływu czynników zniekształcających ostateczny wynik, takich jak np. filtracja wzdłuż uprzywilejowanej drogi wzdłuż ścianek naczynia.

Na podstawie gradientu krytycznego dla tego gruntu, otrzymanego z doświadczeń, przeprowadzono kalibrację modelu numerycznego. Jako dane wejściowe dla modelu przyjęto tą samą krzywą przesiewu jak dla doświadczeń w laboratorium. Przyjęto badanie zniszczenia próbki przy powierzchni, zatem przyłożone naprężenie pionowe wynosiło 0. Kierunek przepływu ustawiono zgodnie z badaniami laboratoryjnymi, od dołu do góry. Iteracyjnie poszukiwano takiej minimalnej wartości gradientu, dla której następuje zniszczenie próbki. Zniszczenie próbki było widoczne poprzez gwałtowne zwiększenie objętości próbki gruntu i uwolnienie mniejszych ziaren. Po ustaleniu wartości liczbowej gradientu krytycznego, porównywano ją z wynikami doświadczalnymi. W kolejnym kroku zmieniana była wartość α_2 i poszukiwanie gradientu krytycznego rozpoczynano od nowa. Kolejne kroki przeprowadzano aż do uzyskania zgodności wartości gradientu krytycznego na modelu numerycznym i z doświadczenia.

Uzyskana wartość α_2 jest wynikiem kalibracji modelu i wynosi w przybliżeniu 6,9. Jest to wartość dużo większa niż wynikająca z rozważań teoretycznych nt. gradientu krytyczne-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

go. Jest to spowodowane faktem, że współczynnik ten uwzględnia też klinowanie się ziaren i wpływ stopnia zagęszczenia na stabilność gruntu. Przy większym współczynniku α_2, przy tych samych warunkach zewnętrznych mniejszy będzie współczynnik α_1, będący bezpośrednio związany z wartością siły parcia dynamicznego. W związku z tym mniejsze będą również same siły, co powoduje późniejsze zniszczenie struktury gruntu niż wynikałoby to z gradientu krytycznego. Na obecnym etapie badań nie ma innej drogi uwzględnienia tych zjawisk, gdyż wymagałoby to modelowania ziaren jako brył sprężystych, a być może również zdolnych do odkształceń plastycznych. Przy obecnych wydajnościach komputerów wydaje się to na razie nieosiągalne ze względów ekonomicznych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy.

Literatura

[1] Baraff D., *Fast Contact Force Computation for Nonpenetrating Rigid Bodies*, Siggraph 94 Computer Graphics Proceedings, Orlando 1994.
[2] Baraff D., Witkin A., *Physically Based Modeling: Principles and Practice*, Siggraph 97 course notes, Los Angeles 1997.
[3] Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A., *Zapory ziemne*, Arkady, Warszawa 1973.
[4] Pisarczyk S., *Mechanika Gruntów*, wyd. 4, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
[5] Popielski P., *Model sufozji mechanicznej w ujęciu metody elementów skończonych*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2000.
[6] Rutecka A., *Modelowanie zjawiska kolmatacji z wykorzystaniem metody elementów skończonych*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006.
[7] Szuster A., Utrysko B., *Hydraulika i podstawy hydromechaniki*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1986.
[8] Wieczysty A., *Hydrogeologia inżynierska*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982.
[9] Wilk T., *Microstructural Model of Mechanical Suffusion*, Proc. XXIV Int. School of Hydraulics, Jastrzębia Góra 2004, 273-279.
[10] Zmigrodzki Z., Fanti K., Fiedler K., Zielińska Z., *Budowle piętrzące podstawy projektowania*, Wydawnictwo „Budownictwo i Architektura", Warszawa 1957.
[11] PN-88/B-04481, *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*, Wydawnictwa Normalizacyjne „Alfa", 1988.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ