

Marcin DYBA¹, Zenon PILECKI²

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Łądowej, Kraków

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków

Wpływ sposobu zawodnienia na ciśnienie porowe i naprężenie efektywne w obliczeniach numerycznych programem *FLAC 2D*

Słowa kluczowe

Modelowanie numeryczne, zawodnienie, ciśnienie porowe, naprężenia efektywne, program *FLAC 2D*

Streszczenie

W pracy analizuje się wpływ trzech wariantów zawodnienia ośrodka porowatego na wyniki obliczeń ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego. Obliczenia zostały przeprowadzone dla sprzężonych procesów hydraulicznego i mechanicznego w tzw. podstawowym schemacie przepływu (basic flow scheme – single phase) programu *FLAC 2D* w wersji 5.0. Zawadniano dwuwarstwowy ośrodek składający się z dolnej warstwy nieprzepuszczalnej i górnej przepuszczalnej do głębokości 1,5 m. Analizowano zmiany ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego na podstawie przekrojów izolinowych wytworzonego pola oraz wykresów zmian w punktach referencyjnych na profilach poziomym i pionowym.

Wyniki obliczeń pokazały, że dla analizy ośrodków wielowarstwowych z różnym gradientem przepuszczalności najbardziej korzystny jest wariant deklaracji „ciśnienia porowego” (polecenie ini pore pressure), zarówno pod względem efektów obliczeń jak również czasu obliczeniowego. Wariant deklaracji ustalonego poziomu wody gruntowej (polecenie water table) może znaleźć zastosowanie w opisie pola ciśnienia porowego odpowiadającemu ciśnieniu słupa wody. Obliczenia można prowadzić w ośrodku jednowarstwowym o stosunkowo dobrej przepuszczalności lub wielowarstwowym, w którym gradient przepuszczalności nie tworzy bariery dla przepływu wody. Wariant deklaracji „linii zasilania” (polecenie apply pp) może się sprawdzać w warunkach nasycenia modelu do granicy deklarowanego zasilania, lecz dużym ograniczeniem jest wydłużony czas obliczeniowy.

1. Wprowadzenie

Symulacje numeryczne zawodnienia ośrodka porowatego wykonuje się w opisie wielu procesów fizycznych, mniej lub bardziej skomplikowanych. Generalnie, występowanie fazy płynnej w porowatym ośrodku geologicznym powoduje wytworzenia ciśnienia porowego, które ma wpływ na wartość naprężenia efektywnego. W ogólnym ujęciu ciśnienie porowe w zawadnianym ośrodku rzeczywistym powoduje, że siły wewnętrzne dążą do powiększania objętości ośrodka, co się objawia w jego wypiętrzaniu. Z drugiej strony siła grawitacyjna powiększona o ciężar wody przeciwdziała temu wynoszeniu. Efekt ten realizowany jest

w obliczeniach numerycznych m.in. w programie *FLAC* bazującym na metodzie różnic skończonych (MRS).

W pracy autorzy zajmują się wpływem sposobu deklarowanego zawodnienia na wyniki obliczeń numerycznych ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego realizowanych za pomocą programu *FLAC 2D* w wersji 5.0. Problem ten wyniknął z potrzeby pokazania różnic w wynikach obliczeń z wykorzystaniem różnych funkcji zawodnienia, a stosowanych często zamiennie przez użytkowników programu *FLAC* dla analizy konkretnego zagadnienia hydromechanicznego.

W pracy analizuje się trzy warianty deklaracji zawodnienia w tzw. podstawowym schemacie przepływu (*basic flow scheme*). Warianty te nazwano „zwierciadłem wody” (polecenie *water table*), „ciśnieniem porowym” (polecenie *ini pore pressure*) i „opadem atmosferycznym” (polecenie *apply pore pressure*). Przykładowe obliczenia zostały przeprowadzone dla sprzężonych procesów hydraulicznego i mechanicznego, dla prostego modelu ośrodka geologicznego. Zawadniano dwuwarstwowy ośrodek składający się z dolnej warstwy nieprzepuszczalnej i górnej przepuszczalnej. Analizowano zmiany ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego na podstawie przekrojów izoliniowych wytworzonego pola oraz wykresów zmian w punktach obserwacyjnych na profilach poziomym i pionowym.

2. Podstawy teoretyczne zagadnienia zawodnienia modelu numerycznego w programie *FLAC* w wersji 5.0

W rozdziale przedstawiono ogólne rozwiązanie teoretyczne obliczenia ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego w modelu numerycznym, szerzej przedstawione w części teoretycznej opisu algorytmu programu *FLAC* w. 5.0 (*FLAC Online Manual* 2010).

Rozważany proces hydromechaniczny wykorzystany w algorytmie obliczeniowym programu *FLAC* bazuje na teorii konsolidacji Biota zastosowanej do problemu jednofazowego przepływu Darcy’ego w ośrodku porowatym, opisanego równaniem:

$$q_i = -k_{ij} \hat{k}(s) \frac{\partial}{\partial x_j} (P - \rho_w g_k x_k) \quad (2.1)$$

gdzie:

q_i – wektor prędkości przepływu hydraulicznego,

k_{ij} – tensor przepuszczalności,

$\hat{k}(s)$ – przepuszczalność względna (funkcja nasycenia s),

P – ciśnienie płynu,

g_k – wektor przyspieszenia ziemskiego,

ρ_w – gęstość właściwa płynu.

W metodzie różnic skończonych równanie (2.1) musi być opisane równaniem algebraicznym, w którym uwzględnia się elementy siatki obliczeniowej. Prędkość przepływu Q między węzłami siatki obliczeniowej jest opisana następującym równaniem:

$$\{Q\} = [R] \cdot \{P - (x_i - x_i^{(i)}) \cdot g_i \cdot \rho_w\} \quad (2.2)$$

gdzie:

- $[R]$ – macierz sztywności elementu,
- P – ciśnienie w węźle danego elementu,
- $x_i, x_i^{(i)}$ – współrzędne węzła,
- g_i – przyspieszenie ziemskie.

Macierz $[R]$ w warunkach izotropowych ma postać:

$$[R] = -\frac{k}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

gdzie:

k – współczynnik przepuszczalności

W przypadku jeżeli przepływ dokonuje się przez element, który jest częściowo zawodniony i wszystkie elementy tensora naprężeń są takie same, rozwiązanie musi spełniać dwa warunki:

- 1) Przepuszczalność względna powinna maleć jeżeli maleje nasycenie. Przyjęto następującą zależność:

$$\hat{k}(s) = s^2(1 - 2s)$$

Co oznacza, że $\hat{k}(s) = 0$, jeżeli $s=0$ i $\hat{k}(s) = 1$ jeżeli $s=1$.

- 2) Ciecz nie może przepływać z węzła, w którym nasycenie jest równe 0 zgodnie z równaniem:

$$Q_n = \frac{\sum Q_{in}}{\sum S_{in}} s_n$$

,gdzie n jest numerem węzła w którym są prowadzone obliczenia.

Numeryczna stabilność rozwiązania osiągnięta jest w przypadku, gdy czas kroku obliczeniowego jest mniejszy od założonej wartości krytycznej oraz gdy moduł odkształcenia objętościowego płynu powoduje wzrost sztywności nasycanego elementu. Efekt wzrostu sztywności mechanicznej jest związany z tzw. schematem skalowania gęstości *FLAC-a* (FLAC Online Manual 2010). Dotyczy on wyznaczenia pozornego modułu odkształcenia objętościowego K : elementu, modyfikowanego w obecności płynu według zależności przedstawionej w formie wyrażenia różnic skończonych:

$$K := K + \alpha^2 \cdot M \quad (2.3)$$

gdzie:

K – moduł odkształcenia objętościowego szkieletu skalnego,
 M – moduł Biota zależny od modułu odkształcenia objętościowego suchegośrodka porowego i jego porowatości, modułu odkształcenia objętościowego płynu i współczynnika Biota.

α – współczynnik Biota; $\alpha = 1 - K / K_s$;

K_s – moduł odkształcenia objętościowego ziarn (Detournay, Cheng 1993).

Zakładając, że w węźle sąsiadującym z czterema elementami występuje ciśnienie P_0 , to wynikająca prędkość przepływu Q jest scharakteryzowana równaniem:

$$Q = P_0 \cdot \sum \mathfrak{R}_{kk} \quad (2.4)$$

gdzie:

$\sum \mathfrak{R}_{kk}$ – jest sztywnością czterech elementów w warunkach związku między ciśnieniem a przepływem.

W ogólności gradient prędkości przepływu Q powoduje zmianę ciśnienia porowego w czasie t zgodnie z równaniem równowagi:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{M}{V} \left(\sum Q + \alpha \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (2.5)$$

gdzie:

V – objętość elementów związanych z danym węzłem.

W każdym węźle elementu ciśnienie porowe jest zwiększane w celu zrównoważenia objętości V z uwzględnieniem ściśliwości płynu zgodnie z zależnością:

$$P := P - \frac{M \cdot (\sum Q \cdot \Delta t + \alpha \cdot \Delta V_{mech})}{V} \quad (2.6)$$

gdzie:

ΔV_{mech} – przyrost ekwiwalentnej objętości w węźle (elementów związanych z danym węzłem)

wynikającej z deformacji mechanicznej siatki,

Δt – czas, w którym dokonuje się przyrost.

W związku z równaniem (2.6), przepływ międzywęzłowy powodujący wzrost ciśnienia porowego ΔP jest równy:

$$\Delta P = -\frac{M \cdot Q \cdot \Delta t}{V} \quad (2.7)$$

Nowe ciśnienie P_1 w danym węźle wynosi wówczas:

$$P_1 = P_0 + \Delta P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{M \cdot \sum (\mathfrak{R}_{kk} \cdot \Delta t)}{V} \right) \quad (2.8)$$

gdzie:

$[\mathfrak{R}]$ – jest macierzą sztywności w relacji ciśnienie porowe do prędkości przepływu zdefiniowanej równaniem (2.2).

W ogólności uwzględnienie ciśnienia porowego P powoduje zmianę naprężenia σ_{ij} zgodnie z zależnością konstytutywną:

$$\frac{d}{dt} (\sigma_{ij} + \alpha P \delta_{ij}) = H(\sigma_{ij}^o, \dot{\varepsilon}_{ij}, \kappa) \quad (2.9)$$

gdzie H jest formą funkcyjną równania konstytutywnego, ε jest odkształceniem, a κ jest parametrem.

W szczególności związek naprężenia efektywnego z odkształceniem w zakresie sprężystym z uwzględnieniem zmiany ciśnienia porowego $P - P^o$ ma postać:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^o + \alpha(P - P^o)\delta_{ij} = 2G\dot{\varepsilon}_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G \right) \dot{\varepsilon}_{ij} \delta_{ij} \quad (2.10)$$

gdzie:

G – moduł odkształcenia postaciowego,
 δ_{ij} – delta Kroneckera.

Przedstawiony schemat obliczeń w programie *FLAC* może być realizowany dla określenia ciśnień porowych oraz zmian nasycenia lub w sposób sprzężony z obliczeniami deformacji mechanicznej. Na podstawie ciśnień porowych i zależności konstytutywnej oblicza się naprężenia efektywne. W celu wykonania tego typu obliczeń należy odpowiednio skonfigurować algorytm *FLAC-a* na początku analizy za pomocą polecenia *config gw*. Jeżeli polecenie *config gw* jest nieaktywne, wówczas zmienną w elemencie jest tylko ciśnienie porowe. Jeżeli polecenie jest aktywne wówczas realizowany jest pełny proces hydromechanicznych obliczeń lub proces uproszczonych obliczeń. Kontrolowanie procesu odbywa się za pomocą polecenia *set (set mech; set flow - on lub off)*.

Zagadnienia związane z nasyceniem wodą modelu numerycznego można realizować w trzech wariantach:

1. Nasycenie modelu do ustalonego poziomu wody gruntowej (polecenie *water table*). Polega on na zadeklarowaniu poziomej granicy w ośrodku, poniżej której grunt jest nasycony (saturacja pełna). Użycie polecenia *water table* powoduje, że ciśnienie hydrostatyczne jest obliczane automatycznie. W tym wariantcie ustawienia konfiguracyjne opcji przepływu płynów w ośrodku (*config gwflow*) są nieaktywne. W tej sytuacji powyżej poziomu wody należy zadeklarować gęstość suchego ośrodka, a poniżej tego poziomu gęstość ośrodka nasyconego.

Użycie polecenia *config ats* powoduje automatyczne obliczanie wpływu ciśnienia porowego na naprężenie efektywne. Wariant ten nazwany jest w pracy „zwierciadłem wody” (WT).

2. Ustalenie wewnątrz modelu wartości ciśnienia porowego (polecenie *initial pp*). Polega on na wprowadzeniu wartości ciśnienia hydrostatycznego w węzłach np. ciśnienia hydrostatycznego słupa wody. W przypadku gdy obliczenia są prowadzone przy aktywnej analizie przepływu płynów w ośrodku (*config gwflow*), należy zadeklarować gęstość suchego ośrodka powyżej i poniżej zadeklarowanego poziomu wody. W tej sytuacji, gdy użyte jest polecenie *config gwflow*, FLAC automatycznie oblicza wpływ ciśnienia porowego na naprężenie efektywne. Wariant ten nazwany jest dalej „ciśnieniem porowym” (IPP).

3. Wprowadzenie źródła zasilania wzdłuż linii węzłów w modelu poprzez ustalenie ciśnienia porowego (polecenie *apply pp*). Polega on na wprowadzeniu stałego parcia płynu na zadeklarowany brzeg modelu. Dla węzłów wewnątrz modelu można zastosować polecenie *interior pp*. Zawodnienie modelu następuje w wyniku infiltracji wody wywołanej przyłożonym ciśnieniem i stopniowym nasycaniem. Stopień zawodnienia modelu można kontrolować w punktach referencyjnych (polecenie *history*). Możliwa jest również deklaracja źródła wypływu (odpowiednio polecenia *apply discharge* lub *interior well*). Obliczenia prowadzone są przy aktywnej analizie przepływu płynów w ośrodku (*config gwflow*). Wariant ten dla polecenia *apply pp* stosowany jest do symulacji opadu atmosferycznego na powierzchnię terenu wraz z infiltracją wody w głąb ośrodka, stąd nazwany jest dalej „opadem atmosferycznym” (APP).

FLAC umożliwia również inne sposoby zawodniania ośrodka, samodzielnie zdefiniowane przez użytkownika, z użyciem funkcji *fish* i określenia ciśnienia porowego $pp(i,j)$, niezależnie od schematów obliczeniowych przyjętych dla poleceń *water table*, *initial pp* czy *apply pp* (*interior pp*).

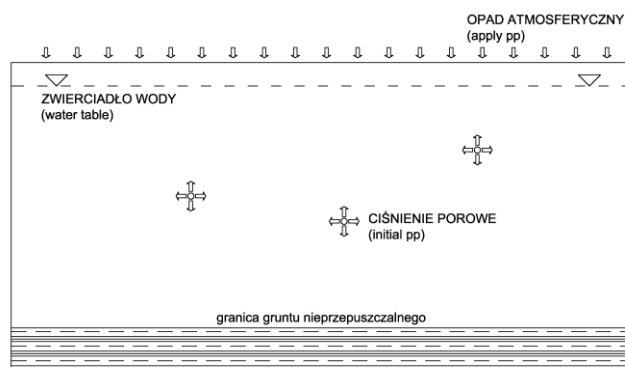
3. Przykład wpływ sposobu uwzględnienia wody w prostym modelu numerycznym na pole ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego

3.1. Metodyka obliczeń numerycznych

Celem obliczeń numerycznych była analiza zmian ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego w dwuwarstwowym ośrodku, zawodnionym w zróżnicowany sposób. Model ośrodka opisywał typowe naturalne warunki, w których warstwa przepuszczalna była uszczelniona warstwą nieprzepuszczalną. Symulację zawodnienia przeprowadzono w trzech wariantach opisanych w rozdziale 2 tj. przez deklarację WT, IPP i APP (rys. 3.1). W przypadku wariantu APP zawodnienie modelu przeprowadzono przez górną ramkę (powierzchnia terenu).

Modelowanie numeryczne przeprowadzono w następujących podstawowych etapach:

- konstrukcja modelu fizycznego,
- konstrukcja modelu obliczeniowego,
- doprowadzenie do równowagi sił mechanicznych w modelu w polu naprężeń pierwotnych,
- symulacja wariantowego zawodnienia ze stabilizacją sił hydromechanicznych w modelu,
- analiza zmian izolinii pola ciśnienia porowego i efektywnego naprężenia pionowego oraz ich wartości na profilach pionowym i poziomym.



Rys. 3.1. Warianty deklaracji zawodnienia w prostym modelu numerycznym
Fig. 3.1. Variants of watering in simplified numerical model

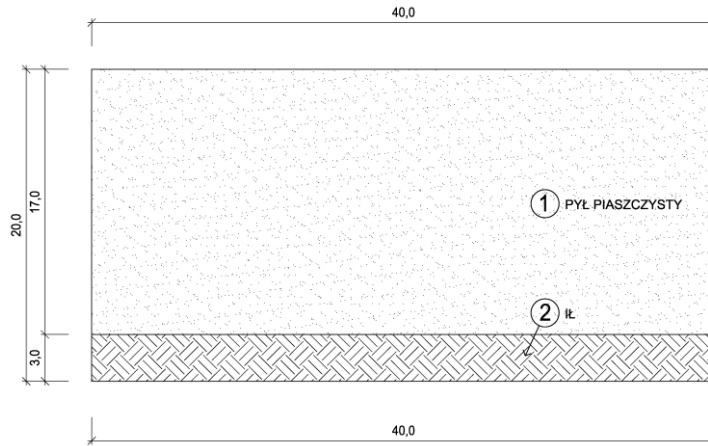
3.2. Model fizyczny

Na rysunku 3.2 przedstawiono geometrię modelu. Jest to prostokąt o wymiarach 40,0 m długości i 20,0 m wysokości. Ośrodek w górnej części zbudowany jest z przepuszczalnego pyłu piaszczystego o miąższości 17,0 m oraz w dolnej części z nieprzepuszczalnego iłu o miąższości 3,0 m. Parametry pyłu i iłu oraz wody (tab. 3.1) przyjęto przykładowo według własnego doświadczenia i danych w pracy (Wiłun 2000).

Model zawadniano do głębokości 1,5 m czyli do 18,5 m wysokości modelu. Zasymulowano w ten sposób zawieszony horyzont wodonośny dzielący model na strefę aeracji i saturacji na głębokości 1,5 m. Takie przyjęcie położenia poziomu wody miało na celu uniknięcie ewentualnego wpływu górnej ramki, lub niedokładności w deklaracji poziomu wody na brzegach modelu.

Tabela 3.1. Parametry ośrodka gruntowego
Table 3.1. Ground parameters

Rodzaj parametru	Wartość		
	Pył piaszczysty	Il	Woda
Gęstość objętościowa: ρ [kg/m ³]	2100	2000	1000
Kąt tarcia wewnętrznego: φ [deg]	16,5	12,2	-
Spójność: c [kPa]	22,0	57,0	-
Moduł odkształcenia gruntu: E [MPa]	43,3(3)	33,3(3)	-
Współczynnik Poissona: ν [-]	0,32	0,32	-
Moduł sprężystości objętościowej: K [MPa]	40,123	30,864	1,0
Moduł sprężystości postaciowej: G [MPa]	0,0164	0,0126	-
Współczynnik porowatości: n [%]	30,0	5,0	-
Współczynnik filtracji: k [cm/s]	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-10}$	-



Rys. 3.2. Model fizyczny
Fig. 3.2. Physical model

3.3. Model obliczeniowy

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w ośrodku sprężysto-plastycznym z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra i ze stowarzyszonym prawem płynięcia. Problem rozważano w płaskim stanie odkształcenia. Wartości składowych naprężeń pionowego i poziomego pola pierwotnego przyjęto jako liniowo zmienne w przedziale głębokości modelu. Modelowany stan naprężeń w programie *FLAC* ma charakter pseudo-przestrzenny, w którym w układzie naprężeń głównych występuje składowa pionowa i dwie składowe naprężenia poziomego o równych wartościach.

Pionowe naprężenie pierwotne σ_v wprowadzono zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_v = \rho_i \cdot g \cdot h_i \quad (3.1)$$

gdzie:

ρ_i – średnia gęstość objętościowa,

$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – przyspieszenie ziemskie,

h_i – głębokość.

Natomiast poziome naprężenie pierwotne σ_H obliczono ze wzoru:

$$\sigma_H = \lambda \cdot \sigma_v \quad (3.2)$$

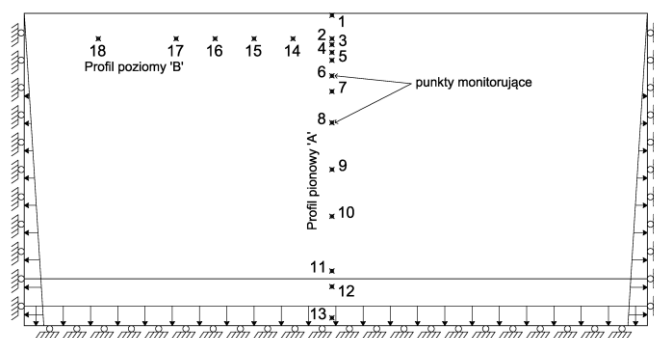
gdzie:

λ - współczynnik rozporu bocznego.

Na rysunku 3.3 zilustrowano warunki brzegowe i początkowe. Na prawej i lewej krawędzi modelu unieruchomiono przemieszczenia poziome dopuszczając jedynie swobodny ruch w kierunku pionowym. Natomiast na dolnej krawędzi zablokowano przemieszczenia pionowe dopuszczając ruch w kierunku poziomym. Górna ramka – powierzchnia terenu była powierzchnią swobodną.

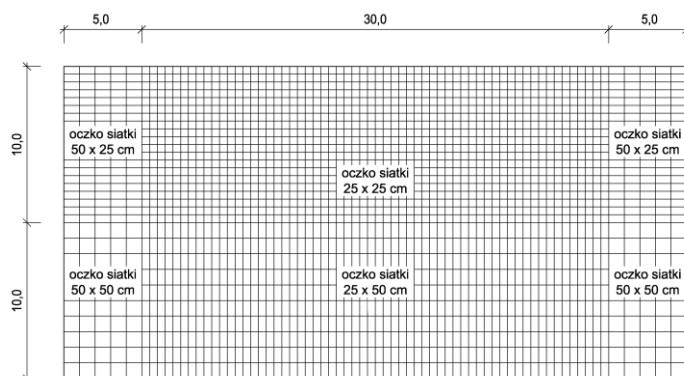
Na rysunku 3.4 przedstawiono przyjętą w modelu siatkę dyskretyzacyjną. Podstawowe oczko siatki miało wymiary 50×50 cm. W części modelu siatka została zagęszczona do wymiaru oczka 25×25 cm. Zagęszczenie obejmuje górny fragment modelu ośrodka gruntowego o wymiarach 30×10 m.

Punkty referencyjne rozmieszczono w dwóch profilach pionowym A i poziomym B (rys. 3.3). W punktach referencyjnych rejestrowano ciśnienie porowe oraz efektywne naprężenie pionowe.



Rys. 3.3. Model obliczeniowy

Fig. 3.3. Calculation model

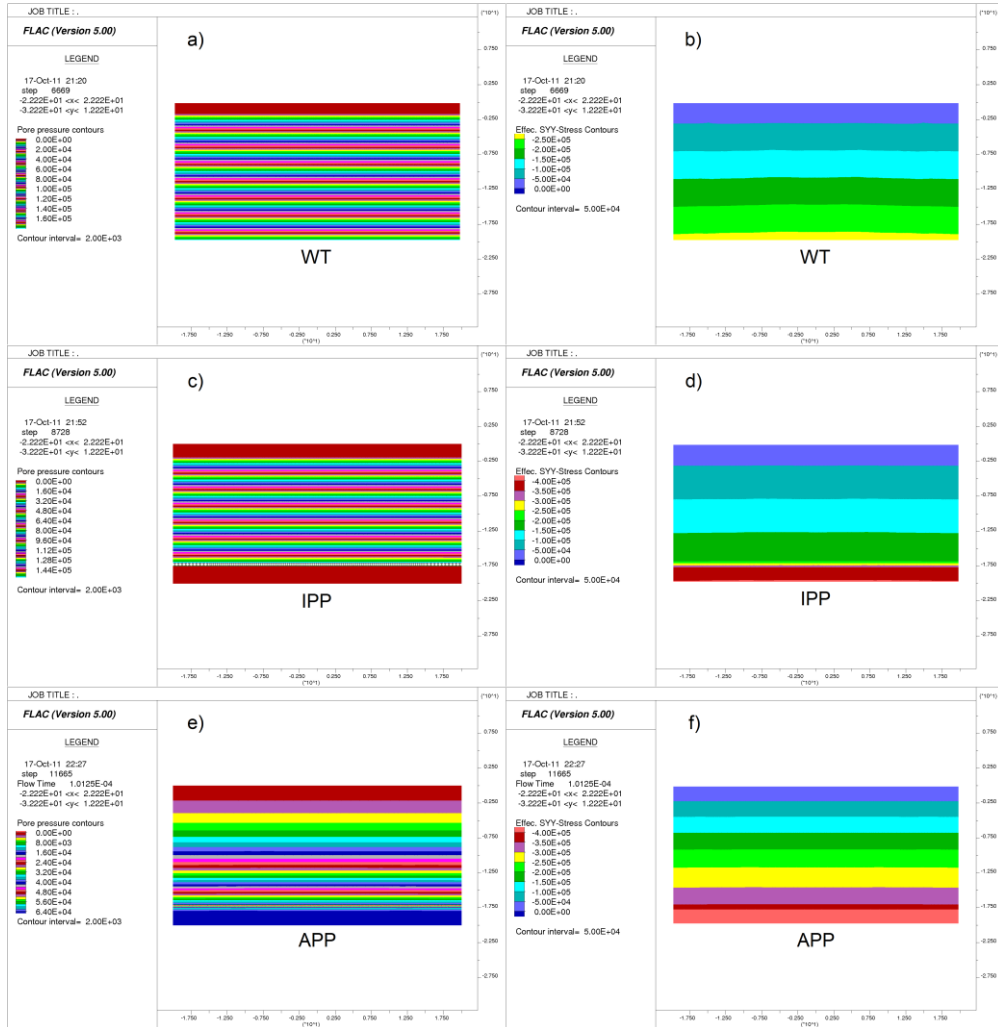


Rys. 3.4. Geometria siatki obliczeniowej

Fig. 3.4. Geometry of calculation mesh

3.4. Wyniki obliczeń i ich analiza

Na rysunkach 3.5 i 3.6 zilustrowano odpowiednio zmiany pola ciśnienia porowego oraz efektywnego naprężenia dla trzech wariantów zawodnienia modelu numerycznego.

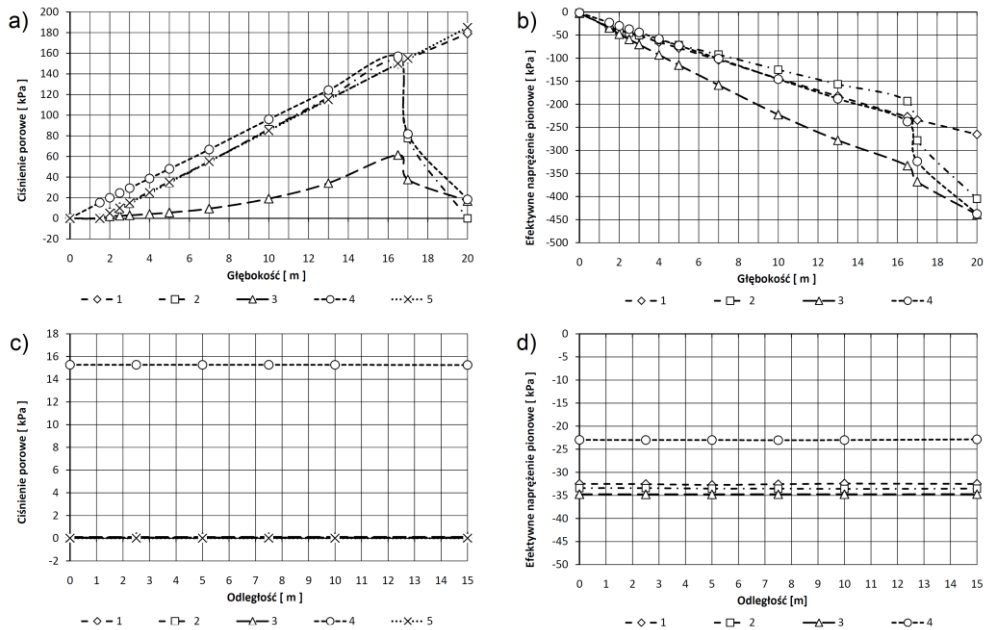


Rys. 3.5. Pole ciśnienia porowego (a, c i e) oraz efektywnego naprężenia pionowego (b, d i f) w różnych wariantach zawodnienia: WT (a i b), IPP (c i d), APP (e i f)

Fig. 3.5. Pore pressure field (a, c i e) and effective vertical stress field (b, d i f) in variants of watering: WT (a and b), IPP (c and d), APP (e and f)

W przypadku pola ciśnienia porowego, przebieg izolinii jest poziomy i prostoliniowy we wszystkich wariantach (rys. 3.5 a, c i e). Dla wariantu WT ciśnienie porowe rośnie liniowo z głębokością niezależnie od stopnia przepuszczalności warstwy i jest zgodne z obliczeniami

analitycznymi ciśnieniami słupa wody (rys. 3.6 a – krzywa 1 i 5). W wariantach IPP ciśnienie porowe rośnie liniowo do głębokości ok. 13,0 m, a następnie w sąsiedztwie granicy z warstwą nieprzepuszczalną rośnie nieliniowo osiągając maksymalną wartość na głębokości ok. 17,0 m. Na granicy z ośrodkiem nieprzepuszczalnym ciśnienie porowe gwałtownie maleje i głębiej zmierza do zera na ramce modelu (rys. 3.6 a – krzywa 2).



Rys. 3.6. Zmiany ciśnienia porowego i efektywnego naprężenia pionowego z głębokością/odległością w zależności od wariantu zawadnienia: 1 – WT, 2 – IPP, 3 – APP na profilu pionowym A (a i b), i na profilu poziomym B (c i d), 4 – APP dla nasyconego modelu do górnej ramki, 5 – ciśnienie słupa wody
Fig. 3.6. Changes of pore pressure and effective vertical stress with depth/distance in dependence of variant of watering: 1 – WT, 2 – IPP, 3 – APP in vertical profile A (a and b), and in horizontal profile B (c and d), 4 – APP model saturated up to top boundary, 5 – pressure of water

W wariantach APP ciśnienie porowe rośnie nieliniowo do granicy z ośrodkiem nieprzepuszczalnym, a głębiej maleje niemal do zera (rys. 3.6 a – krzywa 3). W obu wariantach IPP i APP obserwuje się wpływ ośrodka nieprzepuszczalnego na rozkład ciśnienia porowego, lecz obliczone wartości dla wariantu IPP są wyższe na całym profilu pionowym. Zwiększając czas zawadniania w wariantach APP, a tym samym dążąc do nasyconienia modelu do górnej ramki, zmiany ciśnienia porowego będą zachodzić w sposób coraz bardziej zbliżony do wariantu IPP (rys. 3.6 a – krzywa 4).

Na profilu poziomym (rys. 3.6 c) zmiany ciśnienia porowego są bardzo podobne, a niewielkie różnice mogą być związane z dyskretyzacją modelu i sposobem liczenia wartości średnich.

W przypadku pola naprężenia efektywnego obserwuje się podobne zmiany jak dla ciśnienia porowego, lecz ich gradient jest mniejszy (rys. 3.5 b, d, f i 3.6 b). Najbardziej realistyczne zmiany zachodzą dla wariantów IPP i APP, przy czym wariant APP wykazuje wyższe wartości

naprężenia efektywnego w całym modelu w związku z mniejszym ciśnieniem porowym. Zmiany te wyrównują się w przypadku nasycenia modelu do górnej ramki w wariancie APP.

Obserwuje się niewielkie zniekształcenia izolinii w wariancie WT i w mniejszym stopniu w wariancie IPP (rys. 3.5 b i d). Najkorzystniej pod tym względem prezentuje się wariant APP. Przyczyną zaburzenia izolinii jest sposób uwzględnienia sił mechanicznych w modelu.

Istotne różnice między analizowanymi wariantami występują pod kątem czasu obliczeniowego. Zdecydowanie najdłużej, nawet wielokrotnie, trwają obliczenia w wariancie APP. Czas obliczeń dla pozostałych dwóch wariantów jest podobny.

Reasumując, w analizowanym modelu zbudowanym z dwóch warstw przepuszczalnej w górnej części i nieprzepuszczalnej w dolnej części z ustalonym poziomem wody wewnątrz modelu, najbardziej realistyczne wyniki otrzymano dla wariantu IPP. Zbliżony do tego modelu charakter zmian ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego uzyskano dla wariantu APP. Oba te warianty uwzględniają różne właściwości hydrauliczne warstw. Wariant APP korzystnie odwzorowuje warunki dla nasycenia całego modelu, lecz wymaga znacząco wydłużonego czasu obliczeniowego. Wariant WT powoduje liniowe nasycenie ośrodka, zgodne z ciśnieniem słupa wody, niezależnie od stopnia przepuszczalności warstw i tym samym liniowy wzrost naprężenia efektywnego z głębokością, stąd może być użyteczny w ośrodkach silnie przepuszczalnych.

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy przeprowadzono analizę sposobu nasycenia wodą modelu numerycznego w trzech wariantach i jego wpływu na wyniki obliczeń ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego. Obliczenia przeprowadzono dla ośrodka dwuwarstwowego z górną warstwą przepuszczalną i dolną nieprzepuszczalną za pomocą programu *FLAC 2D* w wersji 5.0. Należy podkreślić, że obliczenia zostały przeprowadzone dla sprzężonych procesów hydraulicznego i mechanicznego w tzw. podstawowym schemacie przepływu (*basic flow scheme*), wykorzystywanym w programie *FLAC*.

Wyniki obliczeń prowadzą do wniosków mających znaczenie dla doboru sposobu zawodnienia modelu w rozwiązywaniu różnych zagadnień geomechanicznych. W przypadku analizy modeli wielowarstwowych ze zróżnicowanym gradientem przepuszczalności np. dla osuwisk, najkorzystniej pod względem zmian pola ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego przedstawia się wariant związany z deklaracją ciśnienia porowego (IPP). Daje on stosunkowo realistyczne wyniki i jednocześnie znacząco krótszy czas obliczeniowy w porównaniu do wariantu APP (opad atmosferyczny). W ogólności, na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych analizowane warianty można scharakteryzować w następujący sposób:

1. W przypadku zawodnienia WT tj. ustalonego poziomu wody gruntowej (polecenie *water table*) zachodzi liniowy wzrost ciśnienia porowego z głębokością niezależnie od stopnia przepuszczalności ośrodka. Wariant WT może znaleźć zastosowanie w opisie ciśnienia porowego odpowiadającemu ciśnieniu słupa wody. Obliczenia najkorzystniej jest prowadzić w ośrodku jednowarstwowym o stosunkowo dobrej przepuszczalności lub wielowarstwowym, w którym gradient przepuszczalności nie tworzy bariery dla przepływu wody.

2. W przypadku zawodnienia IPP tj. ustalonego ciśnienia porowego (polecenie *initial pp*) ciśnienie porowe rośnie z głębokością, lecz z różnym gradientem w zależności od przepuszczalności warstw ośrodka. W wariancie IPP są uwzględnione zróżnicowane

właściwości hydrauliczne warstw i tym samym odwzorowują się zmiany pola naprężenia efektywnego. Zmiany ciśnienia porowego i naprężenia efektywnego są analogiczne jak dla wariantu WT w ośrodku przepuszczalnym. Zaznaczają się niewielkie zaburzenia izolinii pola naprężenia w przypadku uwzględnienia sił mechanicznych. Wariant IPP jest najbardziej korzystny do analizy ośrodków wielowarstwowych z różnym gradientem przepuszczalności zarówno pod względem efektów obliczeń jak również czasu obliczeniowego.

3. W przypadku zawodnienia APP tj. ustalonego zasilania wzdłuż linii węzłów w modelu (polecenie *apply pp*), ciśnienie porowe rośnie z głębokością w podobny sposób jak w wariacie IPP, lecz z mniejszymi wartościami. Występują trudności w dokładnym ustaleniu granicy zawodnienia wewnątrz modelu. Nasycenie modelu powoduje wyrównanie zmian ciśnienia porowego w sposób analogiczny jak dla wariantu IPP. Po uwzględnieniu sił mechanicznych zmiany pola naprężenia efektywnego we wszystkich wariantach są podobne. Wariant APP może się sprawdzać w warunkach nasycenia modelu do granicy deklarowanego zasilania. W takim przypadku można określić krytyczne zachowanie się modelu np. modelu osuwiska przy założeniu maksymalnego zawodnienia. Dużym ograniczeniem jest wydłużony czas obliczeniowy.

Literatura

- [1] Detournay E., Cheng A.H-D., Fundamentals of poroelasticity [In] Comprehensive Engineering vol. 2, (Hudson J., Hoek E., Brown E.T., Fairhurst C. eds.), Pergamon Press, London, 131-171, 1993.
- [2] FLAC Online Manual: Theory and Background, Itasca International Inc., 2010.
- [3] FLAC Online Manual: Fluid-Mechanical Interaction – Single Fluid Phase, Itasca International Inc., 2010.
- [4] FLAC Online Manual: Structural Elements, Itasca International Inc., 2010.
- [5] Wiłun, Z., Zarys geotechniki, wyd. 4. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2000.

Influence of diverse watering on pore pressure and effective stress in numerical calculating by *FLAC 2D*

Key words

Numerical modeling, watering, pore pressure, effective stress, *FLAC 2D*

Summary

In the work, the influence of three types of watering in numerical model on calculation results of pore pressure and effective stress has been analyzed. Numerical calculations have been carried out for coupled hydromechanical process in *FLAC*'s basic flow scheme. The simplified model of soil medium consisted of permeable upper layer and impermeable lower layer has been considered. The changes of pore pressure and effective stress have been analyzed on the basis on images of isolines sections and graphs constructed on monitoring points along vertical and horizontal profiles in the model.

Results of calculations showed that ini pore pressure command was very advantageous for analyses multilayer medium with different gradient of permeability, under achieved effects and calculation time as well. Command water table can be applied in description of pore pressure field corresponded with pressure of water. Calculations can be carried out in one layer medium with high permeability or in multi layer medium where permeability gradient did not create barrier for flow. Command *apply pp* may find application in conditions of fully saturation up to the border of declared line of water supply, but it is limited of long calculation time.

Przekazano: 10 maja 2012 r.