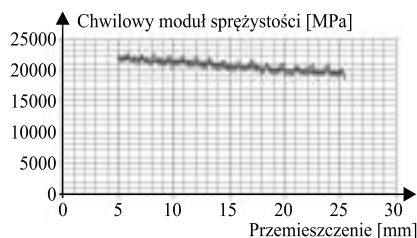


70 lat Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego

Do głównych korzyści z zastosowania tego typu **komponentów strukturalnych** na pomosty mostów autorzy [1, 3]



Rys. 4. Próbkę P1 – przykładowy przebieg zmiany modułu sprężystości w funkcji ugięcia
Fig. 4. The specimen P1 – the changes of elastic modulus as a function of the deflection

zaliczają: wysoką odporność na korozję i obciążenia zmęczeniowe, znaczną redukcję ciężaru płyty pomostowej (w porównaniu ze stalową), przy relatywnie dużej wytrzymałości, łatwość wymiany i rewitalizacji zabytkowych obiektów mostowych. Wyniki badań wytrzymałościowych oraz dane literaturowe [3, 4] zachęcają do wykorzystywania materiałów kompozytowych na pomosty mostowe.

Literatura

[1] Mara V., Haghani R., Harryson P., Bridge decks of fibre reinforced polymer (FRP): A susta-

inable solution, *Construction and Buildings Materials*, 50 (2014), 190 – 199.

[2] Bank L. C., Oliva M. G., Bae Han-Ug., Bindrich B. V., Hybrid concrete and pultruded-plank slabs for highway and pedestrian bridges, *Construction and Buildings Materials*, 24 (2010), p. 552 – 558.

[3] Hoffard T., Malvar L. J., Fieber – reinforced polymer composites in bridges, a state-of-the-art-report, Naval Facilities Engineering Command, May 2005, Canada.

[4] Knippers J., Pelke E., Gabler M., Berger D., Bridges with Glass Fibre – Reinforced Polymer Decks: The Road Bridge in Friedberg, Germany. *Structural Engineering International* 4/2010 s. 400 – 404.

Przyjęto do druku: 26.08.2015 r.

dr inż. Eugeniusz Sawicki^{1*)}
dr inż. Marek Wąjdałowski¹⁾

Obliczenia numeryczne 3D i analityczne szczelności zamka stalowej ścianki szczelnej

Analytical and numerical 3D calculations of tightness of steel sheet pile joints

DOI: 10.15199/33.2015.10.24

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W projektowaniu głębokich wykopów istotne jest oszacowanie wodoprzepuszczalności ich zabezpieczenia. W przypadku ścianki szczelnej zadanie polega na określeniu przepuszczalności zamka profili stalowych. PN-EN 12063 [1] zaleca zdefiniowanie przepuszczalności w zależności od tzw. parametru szczelności (oporu na przeciek) ρ_z [m/s], na podstawie którego określa się objętość wody mogącej przepływać przez zamek ścianki szczelnej w jednostce czasu. W artykule przedstawiono metodę oszacowania parametru ρ_z oraz porównano wyniki obliczeń przepływu przez ściankę szczelną, uzyskane metodą analityczną w oparciu o [1], z wynikami numerycznego modelowania 3D (jako model matematyczny, opisujący rozkład wysokości hydraulicznej w badanym obszarze, przyjęto równanie Laplace'a). Metoda analityczna daje poprawne wartości wydatku, gdy wartość współczynnika filtracji materiału wypełniającego zamek jest dużo mniejsza (dwa rzędy wielkości w przeanalizowanym przykładzie) od współczynnika filtracji sąsiadującego ze ścianką gruntu. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony, wydatek obliczony analitycznie jest znacznie zawyżony.

Słowa kluczowe: przepływ 3D, głębokie wykopy, ścianka szczelna, wodoprzepuszczalność.

Abstract. The quantification of seepage ground-water flow through construction of an excavation pit has practical relevance for engineers. In the case of sheet pile wall is to determine the permeability of the joints of profiles. Standard PN-EN 12063 recommends that define the permeability depending on the tightness parameter ρ_z [m/s]. Based on this parameter determines the volume of water likely to flow through the joint per unit of time. In this approach ρ_z is regarded as a material parameter wall profile defining its permeability. This paper presents a method to estimate a parameter ρ_z and compared the results of calculations of discharge, conducted an analytical method based on standard PN-EN 12063 with the results of numerical modelling 3D. In numerical calculations, as a mathematical model describing the hydraulic distribution in the studied area was adopted Laplace equation. Analytical method provides the correct discharge when the value of the permeability coefficient of the filler material is much smaller than the permeability of soil adjacent to the wall. If this condition is not met, the analytically calculated discharge is overestimated.

Keywords: flow 3D, deep excavations, sheet pile wall, water permeability.

Szczelność zamków grodzic zależy od: nominalnego kształtu zamka, który ma wpływ na długość drogi filtracji i rozkład

ciśnienia; szerokości pojedynczej grodzicy, decydującej o rozstawie zamków; współczynnika filtracji gruntu otaczającego wykop; rozkładu ciśnienia działającego na ścianę; stanu naprężeń na powierzchni styku zamków (może on się zmieniać w obudowie wykopu, jest podatny na różnice lo-

kalnych warunków gruntowych oraz jakość robót kafarowych).

W praktyce inżynierskiej do określenia wodoprzepuszczalności ρ_z wykorzystuje się pomiar objętości wody przepływającej przez zamek [3]. W opracowaniach [2, 4] podano szacunkowe wartości tego parametru.

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Autor do korespondencji:
e-mail: eugeniusz.sawicki@pwr.edu.pl

tru. Norma [1] sugeruje przyjmowanie wyników obliczeń analitycznych wydatku z dużą ostrożnością i zaleca stosowanie współczynnika bezpieczeństwa o wartości 10.

W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia ρ_z na podstawie modelowania numerycznego 3D. Metoda ta uwzględnia indywidualne parametry gródzic oraz gruntu. Precyzyjne określenie ρ_z w przypadku konkretnych warunków umożliwia realistyczne oszacowanie objętości przepływającej wody oraz projektowanie ewentualnych uszczelnień zamków.

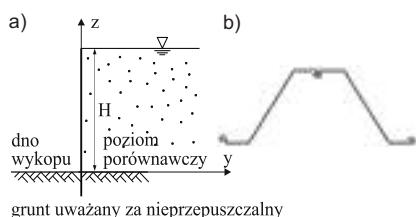
Cel badań i przyjęte założenia

Badania miały na celu:

- określenie metodą analityczną i numeryczną ilości wody przepływającej przez pojedyncze połączenie dwóch sąsiednich gródzic ścianki szczelnej;

- porównanie otrzymanych wyników i weryfikację proponowanej przez normę [1] metody szacowania przepływu przez stałą ściankę szczelną.

W przeprowadzonych badaniach analitycznych i numerycznych przyjęliśmy ten sam schemat obliczeniowy, tzn. założyliśmy, że mamy do czynienia z wykopem wykonanym w obudowie ze ścianki szczelnej jak na rysunku 1. Ściankę tworzą profile stalowe AZ 18-700 (rysunek 1b).



Rys. 1. Przekrój przez wykop w obudowie ze ścianki szczelnej (a); profil AZ 18-700 (b)

[źródło: <http://www.grodzice.pl/bazacad.html>]

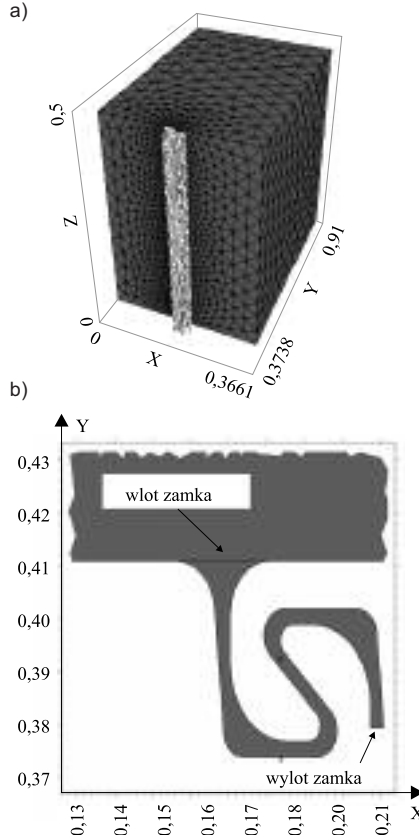
Fig. 1. Cross-section of excavation of which the walls are covered with sheet piles (a); AZ 18-700 profile (b)

[from: <http://www.grodzice.pl/bazacad.html>]

Dno wykopu znajduje się w gruncie, który możemy uznać za nieprzepuszczalny i w związku z tym nie występuje przepływ wody gruntowej pod ścianką ani bezpośrednio poniżej dna wykopu. Wykop został odwodniony, natomiast woda gruntowa na zewnątrz wykopu utrzymuje się na stałym poziomie H [m] (licząc od dna wykopu, które traktowane jest jako poziom odniesienia) i napływ wody przez zamek ścianki szczelnej do wykopu jest ustalony.

Wodoprzepuszczalność gruntu na zewnątrz wykopu charakteryzowana jest przez współczynnik filtracji k [m/s]. Zakładamy bowiem, że grunt jest jednorodny i izotropowy (przyjęcie gruntu uwarstwowanego nie stanowi problemu, ale komplikuje interpretację wyników obliczeń numerycznych). Podobnie jak autorzy prac [2, 3, 5] przyjęliśmy, że prawo Darcy'ego pozostaje w mocy, przy opisie przepływu wody przez zamek ścianki szczelnej i w odniesieniu do metody analitycznej (rysunek 2), zdefiniowaliśmy parametr szczelności zamka ρ_z , a następnie obliczyliśmy natężenie przepływu wody napływającej do wykopu. Co istotne, w metodzie tej zgodnie z [1] założono hydrostatyczny rozkład ciśnienia wody przed wlotem do zamka. Obliczenia wykonano dla $H = 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$ m.

Należy jeszcze odnieść się do kwestii wypełnienia zamka. W **pierwszym wariantcie** obliczeń założono, że zamek jest wypełniony gruntem o takim samym współczynniku filtracji jak grunt otaczający wykop, tzn. $k = 1e-4$ m/s. **Drugi wa-**



Rys. 2. Siatka elementów skończonych dla zamka i otaczającego go gruntu (a); przekrój przez zamek ścianki szczelnej (b)

Fig. 2. Finite elements mesh for one joint and surrounding soil (a); one joint cross-section (b)

riant obliczeń zakłada, że zamek został uszczelniony wypełnieniem bitumicznym, co odpowiada współczynnikowi filtracji zamka: $1e-6$ m/s (pozostałe założenia w obu wariantach są identyczne). Kwestia wypełnienia zamka okazała się kluczowa dla zakresu stosowalności metody analitycznej i zostanie skomentowana przy omawianiu wyników.

Obliczenia numeryczne 3D przepływu wody przez zamek wykonano również w dwóch wariantach dla identycznego zestawu danych. W tym przypadku rozkład ciśnienia w obszarze badań nie jest jednak przyjmowany a priori, a determinowany przez przyjęty model obliczeniowy.

Opis metody analitycznej

Zgodnie z przyjętym założeniem, punktem wyjścia jest równanie Darcy'ego, które pozwala na wyznaczenie prędkości przepływu wody przez zamek ścianki szczelnej. Jeżeli prędkość przepływu pomnożymy przez szerokość zamka na wylocie $b_z = \text{const.}$ i jego „elementarną” wysokość dz , otrzymamy „elementarne” natężenie przepływu w postaci:

$$q(z) = k_z \cdot (H - z)/L \cdot b_z \cdot dz \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (1)$$

gdzie:

k_z – współczynnik filtracji materiału wypełniającego zamek („współczynnik filtracji zamka”) [m/s];

H – wysokość położenia zwierciadła wody gruntu [m];

z – wysokość położenia analizowanego przekroju [m];

$H - z$ – ciśnienie hydrostatyczne na wysokości z , równe różnicy wysokości hydraulicznej między wlotem a wylotem zamka na wysokości z [m];

L – długość drogi filtracji [m] – w oparciu o obliczenia numeryczne przyjęto, że jest to najkrótsza linia mierzona wzdłuż drogi filtracji, łącząca punkt leżący na linii wlotowej do zamka z punktem leżącym na linii wylotowej (rysunek 2b).

Po scałkowaniu (1) w granicach od 0 do H , otrzymano wzór na całkowity wydatek przepływający przez zamek (przy założeniu hydrostatycznego rozkładu ciśnienia przed wlotem do zamka):

$$Q = b_z \cdot (k_z/L) \cdot 0,5 \cdot H^2 \quad (2)$$

W przypadku gruntu uwarstwowanego należałoby całkować oddzielnie po wysokości każdej z warstw i otrzymane wyniki zsumować. Z konstrukcji równania (2) można wnioskować, że wzór:

$$b_z \cdot (k_z/L) = \rho_z \quad (3)$$

jest aproksymacją parametru szczelności ρ_z [m/s].

Opis metody numerycznej

Rozkład wysokości hydraulicznej w pionie nie musi być liniowy i stąd konieczność przeprowadzenia obliczeń 3D, w celu określenia ilości wody przepływającej przez zamek ścianki szczelnej. Jak wcześniej sygnalizowano, przyjęto, że przepływ wody jest ustalony. Zatem do określenia rozkładu wysokości hydraulicznej w obszarze badań wykorzystano równanie Laplace'a w postaci:

$$k \cdot \text{div}(\text{grad}(h)) = 0 \quad (4)$$

gdzie:

$h = z + p/\rho \cdot g$ – wysokość hydrauliczna definiowana w oparciu o równanie Bernoulliego;
 k – współczynnik filtracji danego ośrodka.

Założono następujące warunki brzegowe:

- w poziomie $z = 0$ brzeg obszaru jest nieprzepuszczalny;
- w poziomie $z = H$ wysokość hydrauliczna $h = H$;
- możliwy jest przepływ przez zewnętrzny, pionowy kontur bryły gruntu, z wyjątkiem ścianki z zamkiem (rysunek 2a);
- ścianka z zamkiem jest fragmentem powierzchni grodzicy i podobnie jak zamek jest nieprzepuszczalna;
- na wylocie zamka w płaszczyźnie xz , $h = z$.

Tak sformułowane zadanie rozwiązano w programie Flex PDE [6], który wykorzystuje metodę elementów skończonych. Ostatecznie, najpierw w oparciu o równanie Darcy'ego:

$$v = -k \cdot \text{grad}(h) \quad (5)$$

a później o równanie wydatku:

$$Q_z = \iint_{\text{wylot zamka}} (k \cdot dh/dy) dA \quad (6)$$

znaleziono rozkład prędkości przepływu wody w obszarze badań i obliczono ilość wody napływającej do wykopu w jednostce czasu przez jeden zamek.

Podobnie jak w przypadku obliczeń analitycznych zbadano dwa warianty:

- 1) gdy k_z i k sąsiedniego gruntu wynoszą $1e-4$ m/s;
- 2) gdy $k_z = 1e-6$ m/s, a współczynnik filtracji gruntu pozostaje bez zmian.

W związku z tym, że obliczenia numeryczne pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie Q_z , to po podstawieniu tej wielkości do wzoru (2) można oszacować wartość L . Zważywszy jednak, że wzór (2) wyprowadzono przy założeniu hydrostatycznego rozkładu ciśnienia, uzyskana wartość L obarczona jest pewnym błędem.

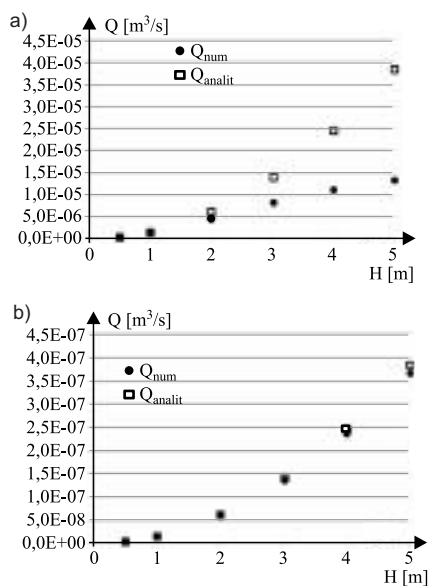
Przykład obliczeniowy i uzyskane wyniki

Obliczenia wodoszczelności zamków grodzic przeprowadzono dla profilu AZ 18-700 (rysunek 1b), którego: $b_z = 3,4$ [mm]; $L = 111$ [mm] (przyjęto zgodnie z definicją we wzorze (1)); $H = 0,5; 1,0; 2,0; 3,02; 4,0; 5,0$ [m];

Jak wcześniej podano w wariancie 1, przyjęto, że $k_z = 1e-4$ [m/s]; $k = 1e-4$ [m/s], a w wariancie 2: $k_z = 1e-6$ [m/s]; $k = 1e-4$ [m/s]. Ze wzoru (3) obliczono parametr szczelności zamka w przypadku wariantu 1: $p_z = 3,063e-6$ m/s i wariantu 2: $p_z = 3,063e-8$ m/s. Następnie do wzoru (2) podstawiono wartości H . Otrzymane wyniki $Q(H)$ przedstawiono na rysunkach 3a i b za pomocą punktów, opisanych jako Q_{analit} . Na tych samych wykresach zaznaczono również wielkości wydatków Q_{num} otrzymane z modelowania numerycznego.

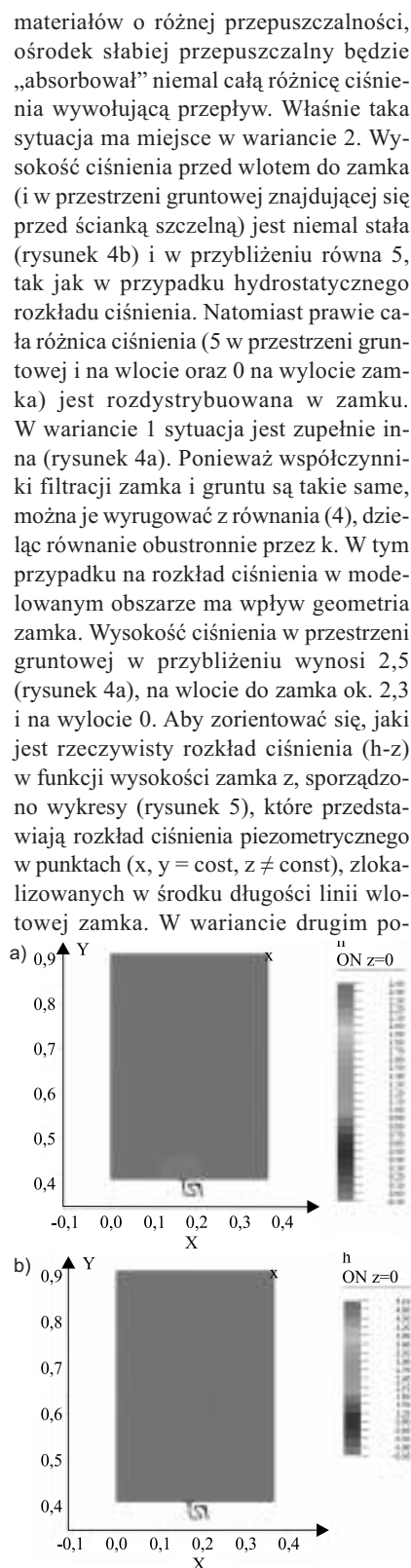
W pierwszym wariancie obliczeń widać wyraźną różnicę między wartościami wydatków (przy $H = 5$ m, Q_{analit} jest prawie trzykrotnie większe niż Q_{num}). W wariancie drugim natomiast, dla żadnej z przyjmowanych wartości H , różnica względna między wydatkami nie przekracza 5%. Wiadomo, że oba warianty różnią się jedynie wartością k_z .

Przepuszczalność ośrodka, a w tym przypadku materiału stanowiącego wypełnienie zamka, wpływa na rozkład ciśnienia w tym ośrodku. W przypadku



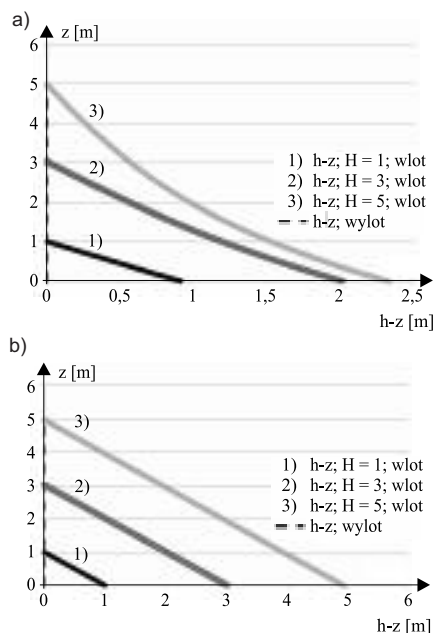
Rys. 3. Natężenie przepływu Q w funkcji wysokości zwierciadła wody gruntowej H : a) wariant 1; b) wariant 2.

Fig. 3. Flow rate Q in function of ground water level H . a) variant 1; b) variant 2



Rys. 4. Rozkład wysokości hydraulicznej h w zamku i otaczającym gruncie, dla $H = 5$ m, na poziomie $z = 0$ m: a) wariant 1; b) wariant 2.

Fig. 4. Hydraulic head h distribution in the joint and in the surrounding soil, for $H = 5$ m, at the elevation level $z = 0$ m: a) variant 1; b) variant 2



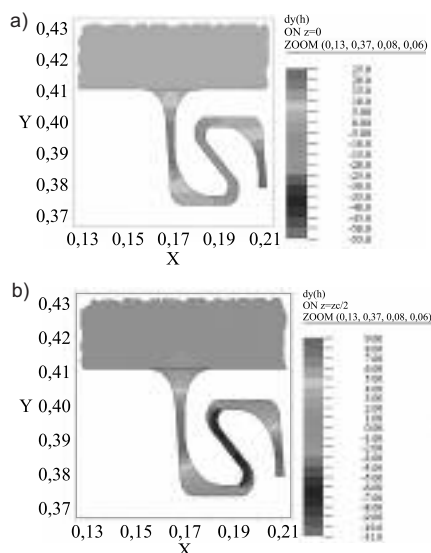
Rys. 5. Rozkład ciśnienia piezometrycznego na wlocie do zamka (dokładny opis w tekście): a) wariant 1; b) wariant 2
Fig. 5. Pressure head distribution at the inlet of joint (detailed description in the text): a) variant 1; b) variant 2

twierdza się wcześniejsza obserwacja o prawie hydrostatycznym rozkładzie ciśnienia. Dla $H = 5$ m, różnica między wartością ciśnienia hydrostatycznego a wyznaczoną numerycznie wynosi 7 cm. Stąd przyjęte w metodzie analitycznej założenie o hydrostatycznym rozkładzie ciśnienia pozostaje słuszne i nie generuje istotnych różnic w wartościach wydatków (rysunek 3b).

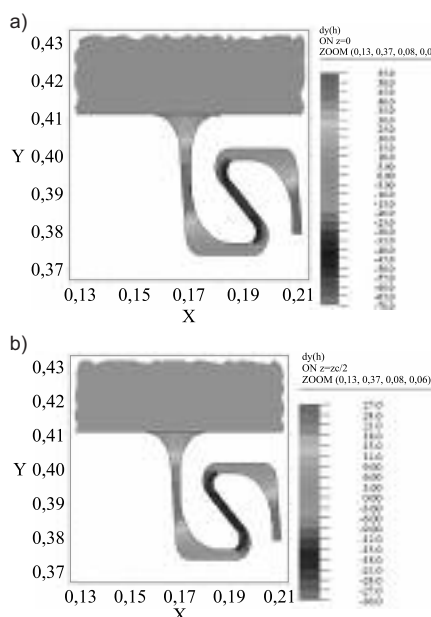
Wykres na rysunku 5a wyraźnie wskazuje, że nie można przyjąć takiego założenia w wariantie 1. W tym przypadku rozkład ciśnienia drastycznie odbiega od hydrostatycznego, co w konsekwencji prowadzi do przeszacowanych wartości wydatków (rysunek 3a).

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono rozkład składowej gradientu ciśnienia $\partial h/\partial y$ przy $H = 5$ m, na poziomie $z = 0$ i $z = 2,5$ w przypadku obu wariantów. Wyniki te wskazują, że składowa gradientu zmienia się w pionie zamka i w płaszczyźnie x, y . Metoda analityczna nie uwzględnia tej zmienności, a operuje jedynie wartościami średnimi gradientu dla poszczególnych wysokości z . Nie bez znaczenia jest również odpowiednie zdefiniowanie długości drogi filtracji L .

W wariantie 2, dla zwierciadła wody na poziomie $H = 5$ m, gradient ciśnienia $\Delta(h-z)/L$ dla $z = 0$ m i $z = 2,5$ m przyjmuje odpowiednio wartości: 45,0 i 22,5 co dobrze



Rys. 6. Rozkład składowej gradientu hydraulicznego $\partial h/\partial y$ dla $H = 5$ m, na poziomie: a) $z = 0$ m; b) $z = 2,5$ m, wariant 1
Fig. 6. Distribution of hydraulic gradient component $\partial h/\partial y$ for $H = 5$ m, at the elevation level: a) $z = 0$ m and b) $z = 2,5$ m, variant 1



Rys. 7. Rozkład składowej gradientu hydraulicznego $\partial h/\partial y$ dla $H = 5$ m, na poziomie: a) $z = 0$ m; b) $z = 2,5$ m, wariant 2
Fig. 7. Distribution of hydraulic gradient component $\partial h/\partial y$ for $H = 5$ m, at the elevation level: a) $z = 0$ m and b) $z = 2,5$ m, variant 2

koresponduje z wartościami numerycznymi (odpowiednio: 45-50 i 21-24) oraz świadczy o dobrym doborze L (przynajmniej dla tej geometrii).

Podsumowanie

W artykule rozwiązano numerycznie zagadnienie trójwymiarowego przepływu wody przez zamek ścianki szczelnej.

W modelowaniu uwzględniono: rzeczywistą geometrię zamka oraz przestrzenny rozkład ciśnienia wody w zamku i sąsiadującym gruncie. Rozkład ciśnienia i gradienty ciśnienia wyznaczono, rozwiązując równanie Laplace'a. Przy założeniu ważności, w rozpatrywanym zagadnieniu, prawa Darcy'ego obliczono rzeczywiste wydatki wody przepływającej przez połączenie grodzic.

Na podstawie wyników modelowania numerycznego zdefiniowano i wyznaczono wartości parametrów L i ρ_z , które następnie wykorzystano w obliczeniach analitycznych do oszacowania ilości wody przepływającej przez zamek ścianki. Porównane wyników wskazuje, że metoda analityczna dostarcza poprawnych rozwiązań w sytuacji, gdy wartość współczynnika filtracji materiału wypełniającego zamek jest dużo mniejsza (dwa rzędy wielkości w przeanalizowanym przykładzie) od współczynnika filtracji sąsiadującego ze ścianką gruntu. W przypadku gdy warunek ten nie jest spełniony, wydatek obliczony analitycznie jest znacznie zawyżony i np. przy $H = 5$ m różni się prawie trzykrotnie od rozwiązania numerycznego. Spowodowane jest to przyjmowanym w metodzie analitycznej założeniem, że rozkład ciśnienia przed ścianką jest hydrostatyczny. Ponadto, metoda analityczna operuje wartością średnią gradientu ciśnienia w funkcji z . Rozwiązanie numeryczne wskazuje, że jego rozkład jest bardzo złożony.

Literatura

- [1] PN-EN 12063, Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Ścianki szczelne, 2001.
- [2] Impervious steel sheet pile walls. Design & Practical approach. ArcelorMittal Sheet Piling http://sheetpiling.arcelormittal.com/uploads/files/AMCRPS_Impervious%20SSP_GB.pdf.
- [3] Widong M., Design, Execution and Monitoring of Impervious Steel Sheet Pile Walls Embedded in Impermeable Layers, http://folk.ntnu.no/emdal/ngf/informasjon/downloads/permanent_spunt_okt_2004/MarcWidong-Imperviouswall.pdf.
- [4] Steel Sheet Piling. The Impervious Steel Sheet Pile Wall. Part 1: Design. Part 2: Practical Aspects, http://www.arcelormittal.com/palancole/uploads/files/AMCRPS_Impervious_EN.pdf.
- [5] Sellmeijer J. B., Cools J. P. A. E., Decker J. and Post W. J., Hydraulic Resistance of Steel Sheet Pile Joints Journal of Geotechnical Engineering, 121 (2), 105 – 110.
- [6] FlexPDE manual and documentation, <http://www.pdesolutions.com/help/index.html>

Przyjęto do druku: 24.08.2015 r.