

WPŁYW NIEDOKŁADNOŚCI OKREŚLENIA WSPÓLCZYNNIKA FILTRACJI ELEMENTÓW USZCZELNIAJĄCYCH NA WARUNKI PRZEPIYU WODY PRZEZ WAŁY PRZECIWPOWODZIOWE

Mieczysław Chalfen, Joanna Kamińska

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. W pracy analizuje się zależność między szacunkową wartością współczynnika filtracji elementów uszczelniających wał przeciwpowodziowy a innymi parametrami charakteryzującymi przepływ, obliczonymi z wykorzystaniem modelu matematycznego. W obliczeniach filtracji przez korpus i podłoże wału zastosowano dwuwymiarowy płaski w planie model matematyczny. Zmienność współczynnika filtracji opisano rozkładem wykładniczym. Wykazano, że całkowity przepływ przez warstwę wodonośną, dopływ do drenażu, maksymalny wektor przepływu, uskok zwierciadła swobodnego na ekranie uszczelniającym, a także rozkład wysokości piezometrycznych zależą od wariancji założonego rozkładu zmienności współczynnika filtracji. Wskazano obszary, w których parametry przepływu wykazują największą zależność od przyjętego *a priori* współczynnika filtracji.

Słowa kluczowe: filtracja, wał przeciwpowodziowy, rozkład wykładniczy, model matematyczny

WSTĘP

Dokładność każdego modelu matematycznego rzeczywistego obiektu lub procesu zależy od precyzyjnego określenia parametrów charakteryzujących badany obiekt, niezależnie od tego, czy jest to prosty model bazujący na rozwiązaniach w postaci zamkniętych wzorów, czy model złożony oparty na równaniach fizyki matematycznej, do których rozwiązania stosuje się zaawansowane metody numeryczne. Otrzymywane wyniki obliczeń zawsze zależą od wprowadzanych parametrów i rodzi się naturalne pytanie, jak dokładność określenia tych parametrów wpływa na dokładność uzyskiwanych rozwiązań. Innymi słowy jest to pytanie o stabilność modelu ze względu na wprowadzane parametry.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Mieczysław Chalfen, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Katedra Matematyki, ul. Grunwaldzka 24, 50-357 Wrocław, e-mail: mieczyslaw.chalfen@up.wroc.pl

Czasami parametry można określić z dużą dokładnością, często są to jednak parametry trudno mierzalne, a bywa, że są niemożliwe do wyznaczenia na rzeczywistym obiekcie.

W przypadku filtracji wody przez ośrodek porowaty, jakim jest wał przeciwpowodziowy, jednym z najważniejszych i równocześnie najtrudniejszych do wyznaczenia parametrów wpływających na przebieg procesu przepływu wody jest współczynnik filtracji. W najprostszych schematach obliczeniowych dla jednorodnej warstwy wodonośnej znane w literaturze przedmiotu [Rembeza 1998, Borys i Mosiej 2003] wzory do obliczeń wielkości przepływu, czasu dopływu wody do skarpy odpowietrznej czy obliczania innych charakterystyk przepływu zawierają oczywiście współczynnik filtracji. W przypadkach bardziej skomplikowanych, spotykanych przy analizie przepływu przez istniejące lub projektowane wały przeciwpowodziowe złożone z kilku warstw o różnej przepuszczalności, dodatkowo posiadające elementy uszczelniające, należy dokładnie określić współczynniki filtracji każdej warstwy.

Współczynniki filtracji poszczególnych warstw wodonośnych można określać na podstawie badań laboratoryjnych, terenowych lub z wykorzystaniem znanych wzorów empirycznych [Wieczysty 1982]. I mimo że na ogół wzory te dają różne wyniki, to ich rozrzut nie jest bardzo duży. Trudniej jest określić precyzyjnie współczynniki filtracji elementów uszczelniających, takich jak ekran i fartuch na skarpie odwodnej czy pionowej przegrody w koronie wału, szczególnie wtedy, gdy te uszczelnienia wykonane są z naturalnych materiałów rodzimych typu glina czy mada. W literaturze podaje się niekiedy wartości tych współczynników różniące się o dwa rzędy wielkości [Wieczysty 1982]. Dodatkowo w elementach uszczelniających mogą się pojawić w trakcie eksploatacji lub na skutek niestarannego wykonania drobne niejednorodności, ułatwiające filtrację wody. W obliczeniach modelowych dla elementów, które z założenia mają być nieprzepuszczalne, podaje się zazwyczaj współczynnik filtracji równy zero [Rembeza 2007] lub wyłącza się je z obszaru filtracji, wymuszając brak przepływu [Sroka i in. 2004]. Często przeprowadza się obliczenia wielowariantowe, przyjmując różne wartości współczynnika filtracji [Wosiewicz i Walczak 2005].

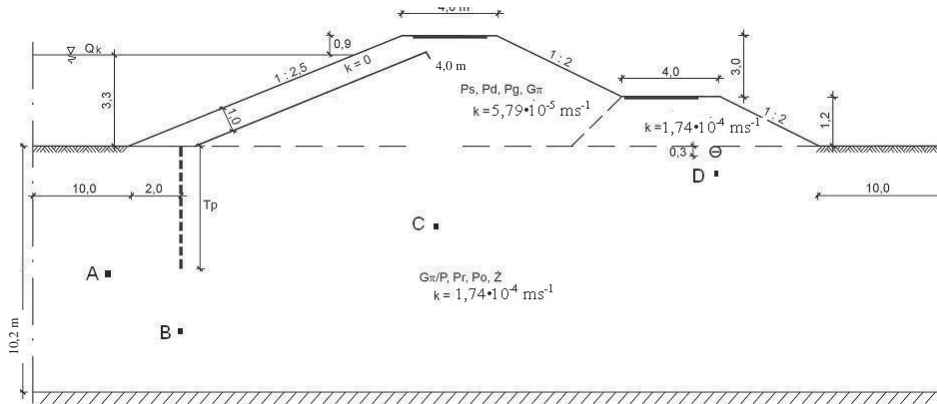
W pracy analizuje się, jak błąd oszacowania nieznanego przecież rzeczywistej wartości współczynnika filtracji elementów uszczelniających wpływa na obliczany na modelu układ hydroizohips, linii prądu i w konsekwencji – na inne parametry przepływu, decydujące o bezpieczeństwie eksploatacji i stateczności wałów przeciwpowodziowych.

MODELOWANY OBIEKT

Jako modelowany obiekt wybrano istniejący wał przeciwpowodziowy rzeki Odry, ochraniający Wrocławską Oczyszczalnię Ścieków w Janówku [Koncepcja wstępna 2006, Chalfen i Molski 2007]. Teren badań zlokalizowany jest w Pradolinie Odry na Równinie Wrocławskiej, bezpośrednio poniżej ujścia Bystrzycy, na odcinku 266,4–268,5 km rzeki Odry. Powódź w 1997 roku pokazała konieczność modernizacji także tego odcinka wału i na etapie prac projektowych wykonano wiele obliczeń modelowych, uwzględniających różne rozwiązania konstrukcyjne elementów uszczelniających potraktowanych w modelu jako nieprzepuszczalne, opisane współczynnikiem filtracji $k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [Chalfen i Molski 2007].

W niniejszej pracy wzięto pod uwagę jeden z rozpatrywanych wariantów, zawierający: ekran grubości 1 m i fartuch na skarpie odwodnej szerokości 4 m, przesłone słabo

przepuszczalną o głębokości 8,20 m i grubości 0,5 m oraz drenaż po stronie skarpy odpowietrznej. Wysokość korony wału w rozpatrywanym przekroju, licząc od stropu warstwy nieprzepuszczalnej, wynosi 14,42 m, miąższość podłoża 10,22 m, nachylenie skarp od 1 : 2,0 do 1 : 2,5. Współczynnik filtracji korpusu wału określono na $5,79 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, podłoża i obsypki wokół drenażu na $1,74 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 1). W dokumentacji geologicznej obiektu współczynnik filtracji, jednakowy dla wszystkich elementów uszczelniających, określono jako mniejszy niż $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, nie precyzując jednak jego dokładnej wartości [Uproszczona dokumentacja... 2000, Dokumentacja z badań... 2006].



Rys.1. Pionowy przekrój przez wał przeciwpowodziowy

Fig.1. Vertical cross-section through anti-flood embankment

METODYKA

Model matematyczny

Zjawisko filtracji nieustalanej przy swobodnym reżimie przepływu w płaskim pionowym przekroju przez warstwę wodonośną opisano równaniem Richardsa [Richards 1931, Reinhard 1992, Wienclaw i Koda 2010]:

$$(C + \beta S_S) \frac{\partial h}{\partial t} = (K(p)h_x)_x + (K(p)h_z)_z + S \quad (1)$$

gdzie: x, z – zmienne przestrzenne [L],

t – czas [T],

h – wysokość piezometryczna [L],

p – wysokość ciśnienia [L],

$K(p)$ – przepuszczalność hydrauliczna [$L^2 \cdot T^{-1}$],

C – różniczkowa pojemność wodna [-],

S_S – pojemność sprężysta [-],

β – współczynnik [-],

S – funkcja źródłowa [$L \cdot T^{-1}$],

$h = z + p$.

Równanie powyższe opisuje w ujęciu dynamicznym przepływ wody w pionowym przekroju jednocześnie w strefie saturacji i aeracji. Dzięki temu nie jest konieczne wcześniejsze wyznaczenie powierzchni swobodnej rozgraniczającej obie strefy. Nie zachodzi więc potrzeba rozwiązywania układu równań opisujących oddzielnie ruch wody w strefie pełnego i niepełnego nasycenia. I co ważniejsze, podczas trwania procesu filtracji wody z ciekłu nie zachodzi potrzeba nowej dyskretyzacji zmieniających się w czasie stref saturacji i aeracji. Powierzchnię swobodną, opisaną warunkiem $p = 0$, wyznacza się w modelu już po uzyskaniu rozwiązania równania (1), korzystając z warunku $h = z$. Funkcje przewodności hydraulicznej $K(p)$ przyjęto według propozycji van Keulena i Wolfa [Reinhard 1992].

Równanie powyższe uzupełniono warunkami brzegowymi Dirichleta i Neumanna. Na brzegu lewym, polderze zalewowym i skarpie odwodnej przyjęto warunek Dirichleta, z wysokością piezometryczną równą rzędnej zwierciadła wody kontrolnej ($Q_{0,1\%}$), wynoszącej 13,52 m ponad poziom zalegania spągu warstwy wodonośnej [Koncepcja wstępna 2006]. Na brzegu prawym przyjęto wysokość piezometryczną 9,90 m. W węzłach opisujących drenaż przyjęto warunek Dirichleta, z wysokością piezometryczną równą rzędnej posadowienia drenu 9,72 m, przy czym warunek ten jest w obliczeniach aktywowany dopiero w chwili, gdy wysokość piezometryczna w tych węzłach w trakcie procesu filtracji osiągnie założoną rzędną drenu. Na skarpie odpowietrznej przyjęto warunek Dirichleta $h = z$, co odpowiada przyjęciu wysokości ciśnienia $p = 0$. W modelu warunek ten aktywowany jest w chwili, gdy w danym punkcie brzegowym na skarpie odpowietrznej wysokość piezometryczna osiągnie wartość równą wysokości położenia punktu. Na pozostałych odcinkach brzegu przyjęto warunek Neumanna, z natężeniem przepływu równym $q = 0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Powstałe zagadnienie różniczkowe rozwiązano metodą elementów skończonych [Zienkiewicz i in. 2005], z podziałem obszaru filtracji na elementy trójkątne i z zastosowaniem liniowych funkcji bazowych. Siatka trójkątów składa się z 3440 węzłów i 6607 elementów. Średni bok trójkąta wynosi 0,40 m, siatkę zagęszczono lokalnie w okolicy drenażu do 0,20 m. Jako rozwiązanie otrzymano wysokość piezometryczną w każdym węźle siatki dyskretyzacyjnej, a na tej podstawie wyznaczono linie ekwipotencjalne, linie prądu i pozostałe charakterystyki przepływu wody. Wszystkie obliczenia wykonano za pomocą autorskiego programu FIZ (Filtracja i Zanieczyszczenia) przeznaczonego do rozwiązywania dwuwymiarowych zagadnień przepływu wody i zanieczyszczeń chemicznych w pionowych lub poziomych przekrojach przez warstwę wodonośną [Chalfen 2003].

Współczynnik filtracji elementów uszczelniających

W praktyce projektowej wymaga się, by współczynnik filtracji uszczelnień mineralnych stosowanych przy budowie wałów przeciwpowodziowych nie przekraczał wartości $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jednak trudności w precyzyjnym określeniu współczynnika filtracji takich uszczelnień, wynikające zarówno z niejednorodności ośrodka porowatego, jak i zastosowanej metodyki badań, powodują, że jego rzeczywista wartość może być o 2–3 rzędy wielkości większa od założonej w projekcie.

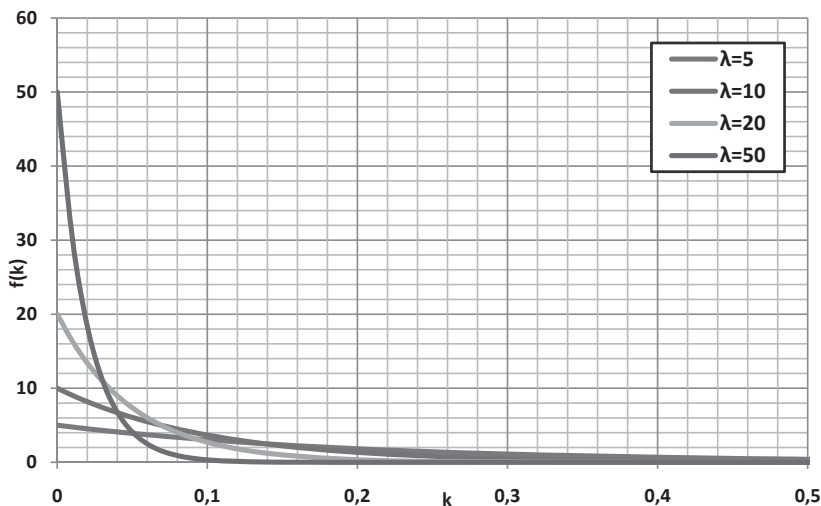
Głównym celem pracy było zbadanie, jak błędne oszacowanie współczynnika filtracji elementów uszczelniających może wpłynąć na ocenę warunków filtracji przez wał przeciwpowodziowy. Dlatego też przyjęto, że rzeczywisty, nieznanany współczynnik filtra-

cji (k), jednakowy dla wszystkich rozpatrywanych elementów uszczelniających, mieści się w zakresie $0-10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, przy czym założono, że prawdopodobieństwo większych wartości k maleje wykładniczo według wzoru (2). Przyjęto zatem wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa zdarzenia, że współczynnik filtracji wynosi k , natomiast funkcję gęstości przyjęto jako [Aczel 2000]:

$$f(k) = \lambda e^{-\lambda k} \quad (2)$$

Przy czym we wzorze (2) wartości k podano w jednostkach $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$. W dalszych badaniach przyjmowano wartości $\lambda = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200$.

Duża wartość parametru λ (powyżej 50) oznacza zwiększenie prawdopodobieństwa zdarzenia, że współczynnik filtracji (k) jest bliski zera i równocześnie zmniejszenie prawdopodobieństwa, że k jest istotnie większe od zera. I na odwrót – mniejsze wartości λ (poniżej 50) oznaczają „spłaszczenie, rozmycie” funkcji gęstości (rys. 2), czyli zwiększenie prawdopodobieństwa, że k jest istotnie większe od zera. Inaczej mówiąc, przyjęcie do obliczeń modelowych filtracji przez wał przeciwpowodziowy większej wartości λ oznacza większą pewność (projektanta wykonującego obliczenia), że elementy uszczelniające mają współczynnik filtracji $k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Rys. 2. Funkcja gęstości $f(k)$ rozkładu wykładniczego dla różnych wartości parametru λ
 Fig. 2. Exponential distributions function $f(k)$ for some value of parameter λ

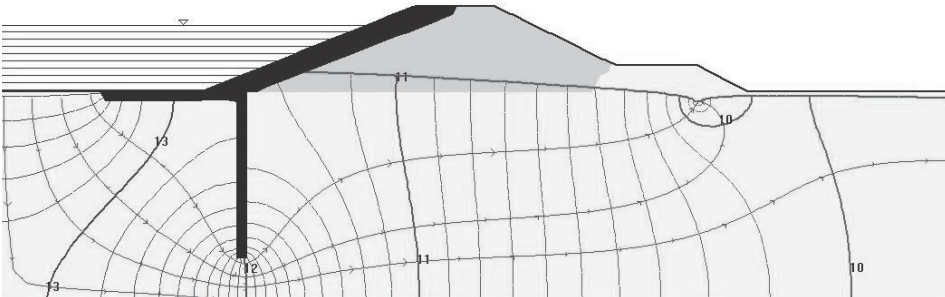
Zakres obliczeń symulacyjnych

Obliczenia przepływu wody przez wał przeciwpowodziowy wykonano przy założeniu stałego piętrzenia wody w cieku do rzędnej 13,52 m. Obliczenia prowadzono aż do uzyskania stanu ustalonego, co następowało, w zależności od wartości współczynnika filtracji elementów słabo przepuszczalnych, w czasie od 20 do 30 dni. Obliczenia symulacyjne wykonano przy założeniu nieprzepuszczalności elementów uszczelniają-

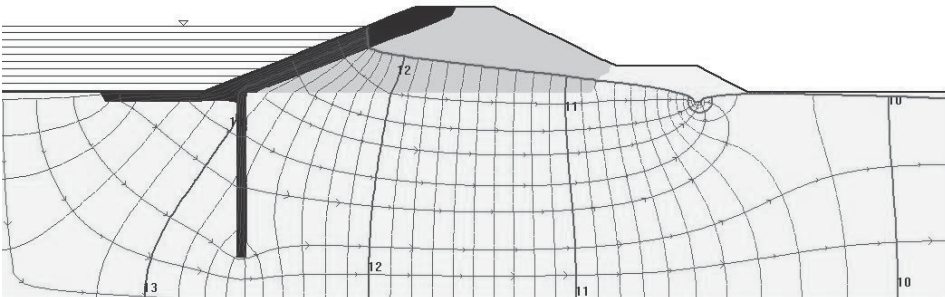
cych ($k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), zwanym dalej wariantem podstawowym, oraz dla różnych wartości $k < 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, przy czym dla każdego k uzyskane na modelu matematycznym wartości parametrów charakteryzujących przepływ mnożono przez wagi proporcjonalne do gęstości przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa:

$$w_k = \frac{\lambda e^{-\lambda k}}{\sum_{i=1}^{100} \lambda e^{-\lambda i/100}} = \frac{e^{-\lambda k}}{\sum_{i=1}^{100} e^{-\lambda i/100}} \quad (3)$$

Wagi określone wzorem (3) są dodatnie i sumują się do 1. Dla przykładu, przy współczynniku $\lambda = 50$ waga (w_k) dla $k = 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wynosi 0,239, dla $k = 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zaledwie 0,004, a dla $k = 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ praktycznie 0. Oznacza to, że chociaż obliczenia wykonano dla $k < 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, to praktyczne znaczenie dla uzyskanych wyników i ich interpretacji mają wartości obliczone przy $k < 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wyznaczony na modelu rozkład wysokości piezometrycznych oraz linie prądu dla wariantów skrajnych ($k = 0$ oraz $k = 10^{-5}$) przedstawiają rysunki 3 i 4. Uwidaczniają się istotne różnice wysokości piezometrycznych (linie niebieskie) oraz kształtu linii prądu (linie zielone), szczególnie w okolicy przepływu słabo przepuszczalnej oraz na granicy stref pełnego i niepełnego nasycenia (linia czerwona).



Rys. 3. Hydroizohipsy i linie prądu dla wariantu $k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig. 3. Equipotentials and streamlines for variant $k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Rys. 4. Hydroizohipsy i linie prądu dla wariantu $k = 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig. 4. Equipotentials and streamlines for variant $k = 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

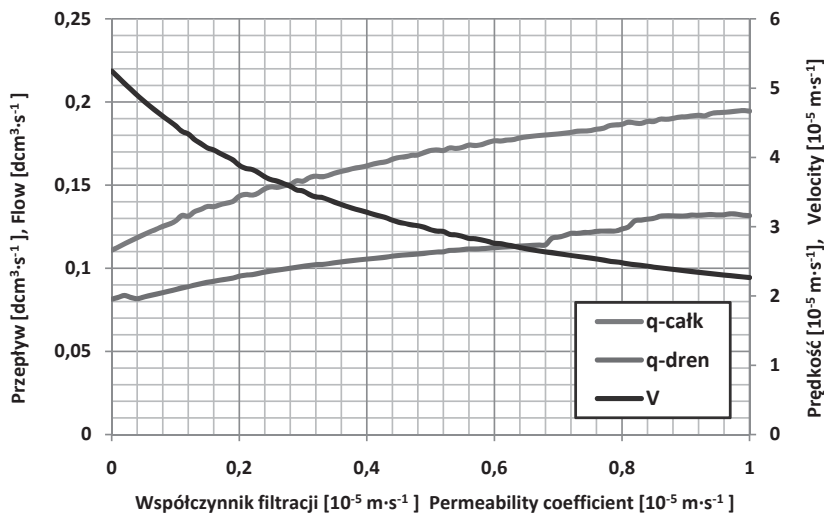
Jako wartości charakteryzujące przepływ przez wał przeciwpowodziowy wzięto pod uwagę:

- q_c , całkowite natężenie przepływu przez warstwę [$\text{dcm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{b}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$],
- q_d , dopływ do drenażu [$\text{dcm}^3 \cdot \text{m} \cdot \text{b}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$],
- v , długość maksymalnego wektora przepływu pod przegrodą [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- h_e , uskok wysokości piezometrycznych na ekranie przeciwfiltacyjnym [m],
- wysokości piezometryczne w kilku charakterystycznych punktach (A – przed przegrodą, B – pod przegrodą, C – poniżej korony wału, D – w pobliżu drenażu, rys. 1) [m].

Są to parametry istotne do określenia na etapie prac projektowych, ważne ze względów eksploatacyjnych, a także ze względu na stateczność budowli i ograniczanie negatywnego wpływu procesów wymywania i sufozji gruntu w rejonie największych prędkości przepływu.

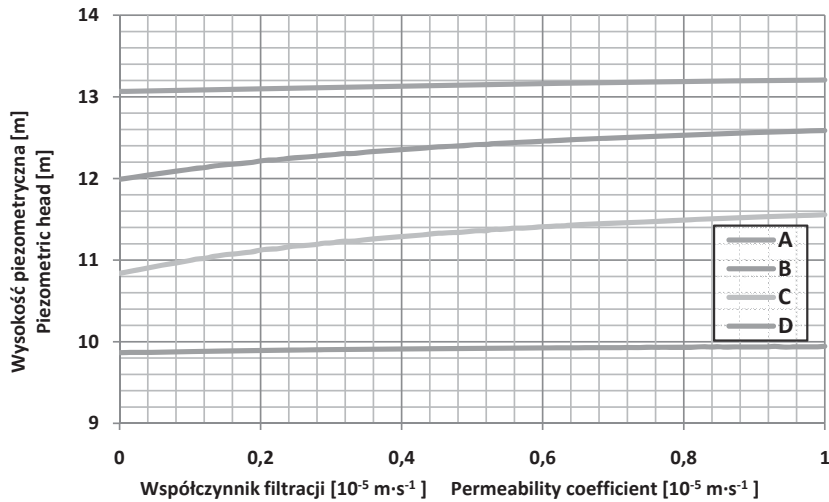
WYNIKI I ICH ANALIZA

Przeprowadzone obliczenia numeryczne potwierdziły istotną zależność wielkości przepływu i długości maksymalnego wektora przepływu (rys. 5) oraz mniejszą zależność obliczonego rozkładu wysokości piezometrycznych (rys. 6) od założonego współczynnika k . Różnice między skrajnymi ($k = 0$ oraz $k = 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) wariantami obliczeń wynoszą: dla q_c – 75%, dla q_d – 62% oraz dla v – 57%. Natomiast różnice wysokości piezometrycznych obliczone dla wariantów skrajnych nie przekraczają 10%, przy czym większe różnice obserwuje się w pobliżu przesłony (punkt B) i poniżej korony wału (punkt C), mniejsze zaś po stronie skarpy odwodnej (punkt A) i w pobliżu drenażu (punkt D). Jednak



Rys. 5. Przepływ całkowity, dopływ do drenażu i długość maksymalnego wektora przepływu jako funkcja współczynnika filtracji elementów słaboprzepuszczalnych

Fig. 5. Total flow, drainage inflow and maximum length of flow vector as function as permeability coefficient of weak permeable elements



Rys. 6. Zmienność wysokości piezometrycznych w wybranych punktach obszaru filtracji
 Fig. 6. Variability of piezometric head at some characteristic points in seepage domain

bezpośrednie porównanie wariantów skrajnych może prowadzić do błędnej oceny, gdyż z założenia nie wszystkie wartości współczynnika filtracji są jednakowo prawdopodobne.

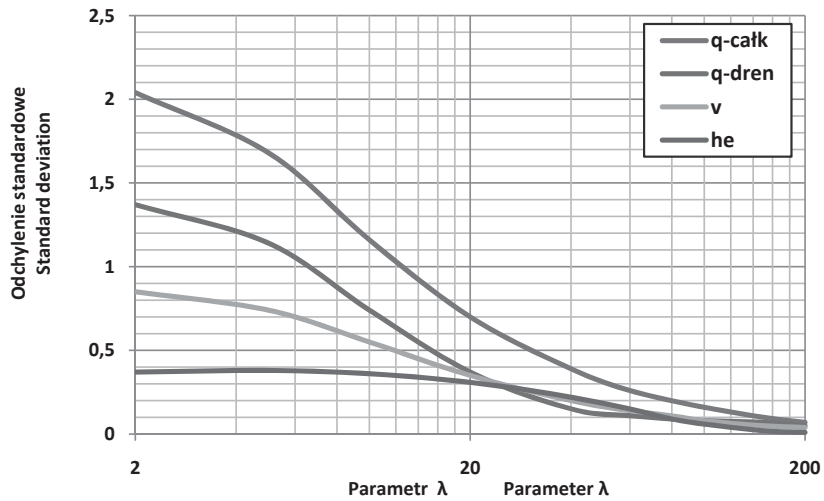
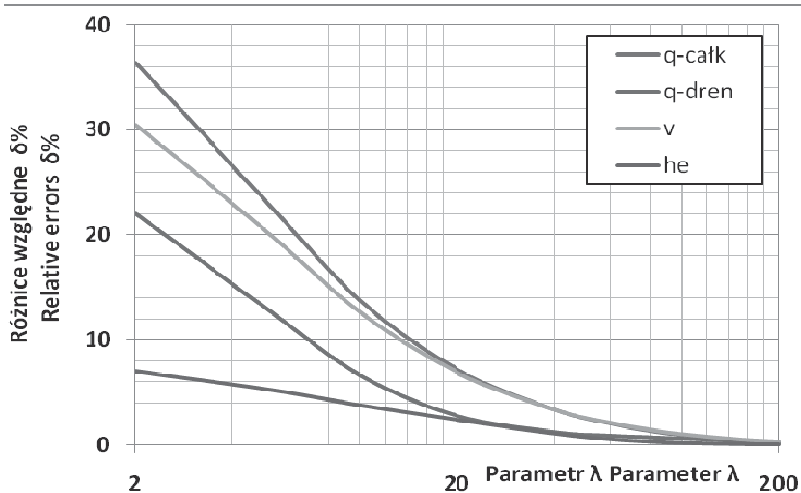
W dalszej części przedstawiono zależność różnic względnych przepływu całkowitego (q_c), dopływu do drenażu (q_d), maksymalnego wektora przepływu (v) oraz uskoku na ekranie (h_e) obliczonych dla wszystkich wariantów $k > 0$, z uwzględnieniem współczynników wagowych zgodnie ze wzorem (3) w stosunku do podstawowego wariantu obliczeń dla $k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Różnice względne obliczono według wzoru:

$$\delta = 100\% \sum_{i=1}^{100} w_i (x_i - x_0) / x_0 \quad (4)$$

gdzie: x_i – jedna z analizowanych wielkości obliczona dla współczynnika filtracji $k > 0$,
 x_0 – wielkość obliczona w wariantcie podstawowym.

Na rysunku 7 pokazano zależność odchyłeń standardowych wielkości obliczonych ze wszystkich wariantów $k < 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ z wagami (w_k) przy różnych wartościach parametru λ . Wykresy pokazują, że zarówno różnice względne (rys. 8), jak i odchylenia standardowe zmienności omawianych parametrów przepływu (rys. 7) maleją wraz ze wzrostem współczynnika λ i dla $\lambda > 50$ są dla praktyki projektowej pomijalnie małe.

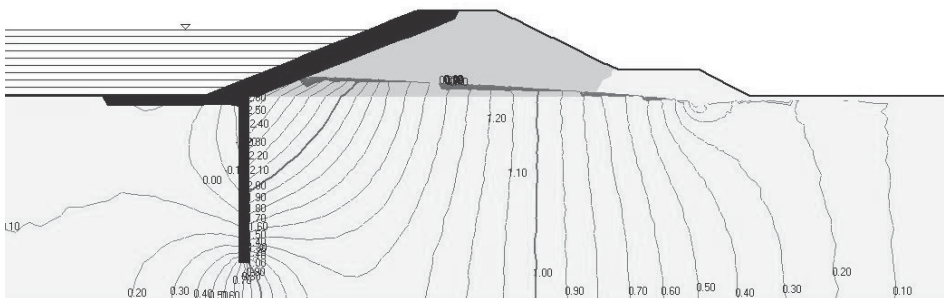
Natomiast różnice obliczonych dla $k > 0$ pól prędkości przepływu i wysokości piezometrycznych w stosunku do wariantu podstawowego $k = 0$ rozkładają się w sposób niejednorodny w obszarze filtracji. Na rysunku 9 i 10 przedstawiono mapy różnic względnych obliczone z wykorzystaniem wszystkich wariantów zmienności k z uwzględnieniem wag obliczonych według wzoru (3) w stosunku do wariantu podstawowego. Przyjęto współczynnik $\lambda = 10$. Porównano mapy średnich ważonych z mapami obliczonymi dla wariantu podstawowego $k = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rys. 7. Odchylenia standardowe jako funkcja parametru λ Fig. 7. Standard deviation as function of parameter λ Rys. 8. Zależność różnic względnych od parametru λ Fig. 8. Relationship between relative errors and parameter λ

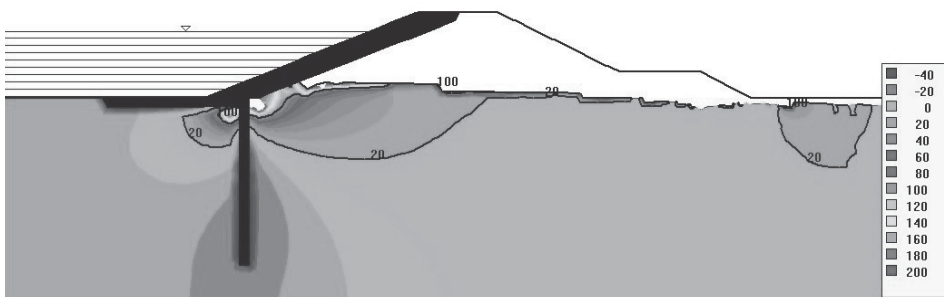
Różnice względne uśrednionych wysokości piezometrycznych w porównaniu z wariantem podstawowym w prawie całym obszarze filtracji (rys. 9) nie przekraczają 2%. Jedynie w rejonie styku przesłony i ekranu przekraczają tę wartość. Można zatem wnioskować, że dla praktyki inżynierskiej nie są to różnice istotne.

Różnice względne uśrednionych długości wektora przepływu w porównaniu z wariantem podstawowym w prawie całym obszarze filtracji nie przekraczają 20% (rys. 10). Jedynie w otoczeniu przesłony dochodzą do 40%, a w rejonie styku przesłony i ekranu

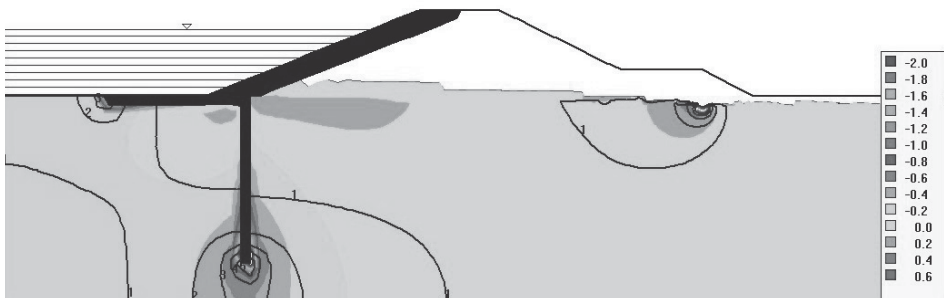
przekraczają 100%. Wynika to z faktu, że dla wariantu podstawowego, przy nieprzepuszczalnym ekranie i przesłonie, długości wektorów przepływu w tym rejonie są bliskie 0. Na granicy strefy saturacji i aeracji różnice przekraczają lokalnie 20%, co wynika z faktu, że strefy te mają inny zasięg dla wariantu podstawowego, a inny dla przypadków przepuszczalnej przesłony i przepuszczalnego ekranu. Analogiczne mapy różnic wyznaczone dla większych wartości parametru λ pokazują, że różnice te są jeszcze mniejsze.



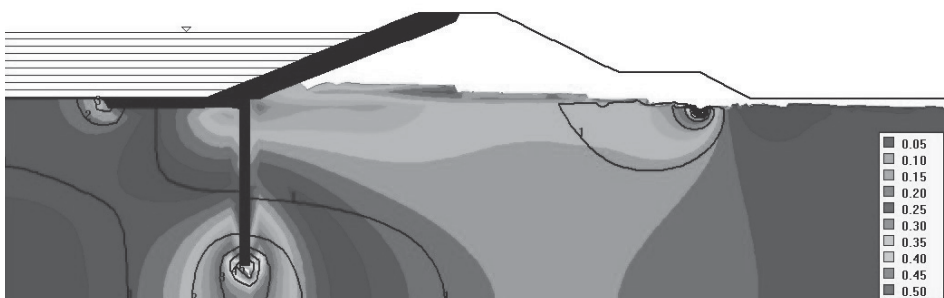
Rys. 9. Różnice względne wysokości piezometrycznych
Fig. 9. Relative errors for piezometric heads



Rys. 10. Różnice względne prędkości przepływu
Fig. 10. Relative errors for velocity flows



Rys. 11. Różnice bezwzględne prędkości przepływu
Fig. 11. Absolute errors for velocity flows



Rys. 12. Odchylenie standardowe prędkości przepływu

Fig. 12. Standard deviation for velocity flows

Rysunek 11 pokazuje, że największe różnice bezwzględne obliczonych długości wektorów przepływu występują w rejonie stopy przesłony i w okolicy drenażu, czyli w rejonach, gdzie notujemy największe długości wektorów przepływu (izolinie prędkości przepływu dla wariantu podstawowego zaznaczono na rys. 11 linią ciągłą). Są to rejon, gdzie istnieje największe ryzyko wystąpienia procesu sufozji.

Rysunek 12 przedstawia mapę odchyłeń standardowych obliczonych prędkości przepływu. Pokazuje ona rejon obciążony największym ryzykiem błędnych obliczeń wynikających z błędnego oszacowania współczynnika filtracji elementów uszczelniających. Dla pola prędkości rejon największego ryzyka błędu pokrywa się z rejonem największych gradientów przepływu.

WNIOSKI

1. Rozkład wykładniczy może być wykorzystany do opisu trudnego do zmierzenia współczynnika filtracji elementów słabo przepuszczalnych.

2. Przyjęcie do opisu zmienności współczynnika filtracji rozkładu wykładniczego z parametrem $\lambda > 50$ skutkuje niewielkimi błędami obliczeń, które z uwagi na praktyczne zastosowania mogą być pominięte. Natomiast dla parametru $\lambda < 10$ różnice w obliczeniach mogą dochodzić do kilkudziesięciu procent.

3. Przepływ całkowity przez warstwę wodonośną, dopływ do drenażu i maksymalny wektor prędkości przepływu w stopie przesłony przeciwfiltracyjnej silnie (powyżej 20%) zależą od przyjętej do obliczeń wartości współczynnika filtracji elementów uszczelniających.

4. Rozkład wysokości piezometrycznych wykazuje mniejsze zależności od współczynnika filtracji elementów uszczelniających niż pozostałe charakterystyki przepływu. Błędy względne są na ogół mniejsze niż 2%.

5. Największe względne różnice długości wektora prędkości przepływu (powyżej 100%) występują w rejonie przesłony przeciwfiltracyjnej i ekranu na skarpie odwodnej. Największe bezwzględne różnice obserwuje się w stopie przesłony.

6. Największe ryzyko błędnych obliczeń występuje w rejonie największych gradientów przepływu, pokrywających się z rejonami narażonymi na ujemny wpływ procesów wmywania i sufozji.

PIŚMIENNICTWO

- Aczel A.D., 2000. Statystyka w zarządzaniu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Borys M., Mosiej K., 2003. Wytyczne wykonywania ocen stanu technicznego i bezpieczeństwa wałów przeciwpowodziowych. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.
- Chalfen M., 2003. Opis programu FIZ – Filtracja i Zanieczyszczenia. XXXIII Seminarium Zastosowań Matematyki w Kobylej Górze, 37–40.
- Chalfen M., Molski T., 2007. Wpływ przesłony przeciwfiltracyjnej na warunki filtracji ziemnych budowli hydrotechnicznych. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki, Politechnika Wroclawska, Geotechnika w Budownictwie i Górnictwie 76, 131–142.
- Dokumentacja z badań podłoża gruntowego dla oceny geotechnicznych warunków posadowienia przedsięwzięcia „Janówek – budowa wału przeciwpowodziowego i modernizacja istniejącego wału wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków”, 2006. Zakład Usług Geologicznych „Grunt”, Opole.
- Koncepcja wstępna. Janówek – budowa wału przeciwpowodziowego wraz z modernizacją istniejącego wału Wrocławskiej Oczyszczalni Ścieków, 2006. Zakład Usług i Robót Wodnych. Spółka z o.o., Opole.
- Reinhard A., 1992. Ruch wody glebowej i gruntowej w strefach saturacji i aeracji wywołanych działaniem drenu w różnych warunkach atmosferycznych. Zesz. Nauk. AR Wroc. 103.
- Rembeza L., 1998. Przepływ wody i zanieczyszczeń w gruncie. Analityczne metody rozwiązań. Wydaw. AR, Poznań.
- Rembeza L., 2007. Nieustalony przepływ filtracyjny przez wał przeciwpowodziowy z uszczelnieniami. Gospodarka Wodna 9, 380–382.
- Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1, 318–333.
- Sroka Z., Walczak Z., Wosiewicz B.J., 2004. Analiza ustalonych przepływów wód gruntowych metodą elementów skończonych. Wydaw. AR, Poznań.
- Uproszczona dokumentacja geologiczno-inżynierska „Badań i oceny stanu technicznego wałów przeciwpowodziowych rzeki Odry, jej kanałów, dopływów i polderów, od miasta Wrocławia do km 375,3 rzeki Odry poniżej Wrocławia”, 2008. Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu. PROXIMA, Spółka Akcyjna, Wrocław.
- Wieczysty A., 1982. Hydrogeologia inżynierska. PWN, Warszawa.
- Wienław E., Koda E., 2010. Numeryczna analiza skuteczności ścian szczelinowych jako ekranu przeciwfiltracyjnego podczas odwadniania głębokiego wykopu. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura 9 (1), 3–15.
- Wosiewicz B.J., Walczak Z., 2005. Filtracja pod budowlą piętrzącą z pionową przesłoną uszczelniającą. Gospodarka Wodna 9, 359–366.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z., 2005. The finite element method. Its basis and fundamental. Elsevier, Amsterdam.

AN INFLUENCE OF INACCURACY OF PERMEABILITY COEFFICIENT OF LOW PERMEABLE ELEMENTS ON WATER FLOW CONDITIONS THROUGH FLOOD EMBANKMENTS

Abstract. In the paper a relationship between approximate value of seepage coefficient of low permeable elements in flood embankment and other flow characteristics was analyzed. A two dimensional mathematical model of water flow through earth embankment was used. Variability of seepage coefficient was described by exponential distribution function. It is proven that total flow through aquifer, drainage inflow, maximum flow vector, decrease of

free surface on impermeable screen and piezometric head in aquifer depends on deviation of assumed exponential distribution. The areas where flow parameters are strongly depends on assumed seepage coefficient were described.

Key words: seepage, flood embankment, exponential distribution, mathematical model

Zaakceptowano do druku – Accepted for print 18.04.2011