

WYZNACZENIE CZASU POJAWIENIA SIĘ PRZESIAKU PRZEZ WAŁ ZIEMNY Z UWZGLĘDNIENIEM FILTRACJI W STREFIE NIEPEŁNEGO NASYCENIA

DETERMINATION OF LEAKAGE TIME THROUGH LEVEES CONSIDERING UNSATURATED ZONE

Zbigniew Sroka

Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego
Akademii Rolniczej w Poznaniu

Wstęp

Czas pojawienia się przesiąku przez wał ziemny jest jednym z ważniejszych parametrów określających oddziaływanie zjawiska filtracji na budowlę. Filtracja odgrywa szczególną rolę gdy czas trwania wezbrania (piętrzenia) jest dłuższy niż czas przemakania wału.

Czas przesiąku zależy nie tylko od parametrów filtracyjnych ośrodka, z którego wał jest zbudowany lecz także od warunków początkowo-brzegowych. Warunek początkowy zdefiniowany jest rozkładem uwilgotnienia (lub ciśnień) w korpusie budowli w chwili rozpoczęcia obserwacji. Warunek brzegowy na skarpie odwodnej określa hydrogram stanów w czasie wezbrania lub przebiegu piętrzenia. Pozostałą część brzegu traktuje się jako nieprzepuszczalną. Niekiedy uwzględnia się jednak infiltrację wód opadowych lub parowanie terenowe. Wyznaczenie czasu przesiąku przez wał wymaga rozwiązania, co najmniej płaskiego w przekroju, zagadnienia filtracji nieustalanej. W podejściu klasycznym analizuje się wyłącznie strefę pełnego nasycenia. Takie sformułowanie prowadzi do zadań z ruchomym brzegiem (powierzchnia swobodna). Nowsze sformułowania problemu uwzględniają przepływ także w strefie niepełnego nasycenia [Neuman 1973, Zaradny 1990, Sroka Wosiewicz 1996, du Plessis 1997].

Cel i metody badań

Modelowanie numeryczne (najczęściej za pomocą Metody Elementów Skończonych) stosowane jest coraz powszechniej do analizy nieustalanej filtracji przez wały. Praktyczna przydatność tych modeli ograniczona jest jednak

możliwościami ich tarowania. Z uwagi na skąpe z reguły informacje o obiekcie oraz prawie całkowity brak pomiarów wielkości opisujących przebieg procesu w czasie (zwykle jedynie hydrogram wezbrania oraz czas pojawienia się przesiąku), zestaw tarowanych parametrów należy ograniczyć do minimum, pozostawiając jedynie najistotniejsze. Celem pracy było przeprowadzenie analizy nieustalonej filtracji przez jednorodny wał posadowiony na podłożu nieprzepuszczalnym, której wyniki umożliwiłyby wskazanie tych parametrów. Za pomocą modelu numerycznego (MES) wykonano obliczenia czasu przesiąku przez wał zmieniając współczynnik filtracji, stopień anizotropii ośrodka oraz warunek początkowy. W celu weryfikacji otrzymanych wyników wykonano prosty eksperyment na modelu gruntowym podczas którego dokonano bezpośredniego pomiaru czasu przesiąku. Wyniki badań porównano z oszacowaniami uzyskiwanymi za pomocą wzorów przybliżonych [Wały przeciwpowodziowe.. 1983]).

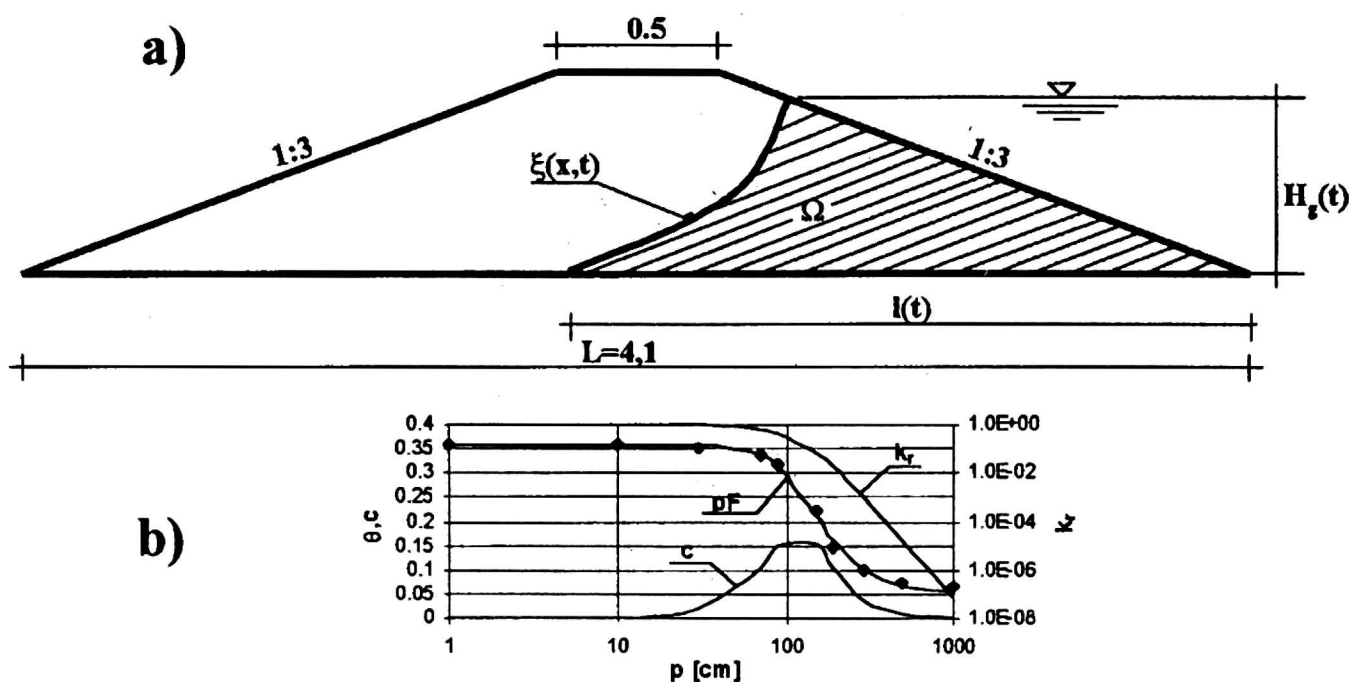
Numeryczny model filtracji przez wał

W klasycznym sformułowaniu z powierzchnią swobodną poszukuje się rozkładu wysokości piezometrycznych h , który w obszarze filtracji spełnia równanie ciągłości (1) oraz liniowe prawo filtracji Darcy'ego (2):

$$\operatorname{div}(\mathbf{q}) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \operatorname{grad}(h) \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{q} – wektor prędkości filtracji, \mathbf{K} – macierz przewodności hydraulicznej. Obszar filtracji ograniczony jest ruchomą w czasie powierzchnią swobodną $\xi(x, t)$ (rys.1). Ruch tej powierzchni opisuje równanie różniczkowe, w którym jawnie jako zmienna występuje czas [Wosiewicz, Sroka 1992]. Układ krzywej depresji w chwili początkowej musi być znany. Równania (1),(2) oraz równanie ruchu powierzchni swobodnej są ze sobą powiązane a cały problem jest, ze względu na poszukiwaną funkcję h , nieliniowy. Rozwiązanie problemu uzyskać można wyłącznie przy pomocy metod numerycznych. Z uwagi na ruch powierzchni swobodnej obszar filtracji Ω ulega także zmianie w czasie. Stwarza to zawsze trudności obliczeniowe, gdyż w każdym kroku czasowym konieczna jest nowa dyskretyzacja w obszarze. Program obliczeń musi być wyposażony w generator siatki, zabezpieczony przed możliwością geometrycznej degeneracji w kolejnych krokach czasowych. Praktyka dowodzi, że opracowanie takiego generatora nie jest sprawą łatwą. Warto odnotować, że przedstawione sformułowanie klasyczne jest bezużyteczne dla zagadnień z wewnętrznymi strefami wysączenia, gdy nachylenie krzywej depresji zbliżone jest do pionu lub w całym korpusie wału ciśnienia w porach są ujemne.



Rys1. (a) Przekrój przez wał, (b)charakterystyki gruntu
 Fig.1.(a) Cross-section of a levee, (b) soil properties

Tych wad pozbawione są sformułowania uwzględniające przepływ także powyżej krzywej depresji. Przepływ wody gruntowej wolnej oraz wody w strefie nienasyconej są wzajemnie ze sobą powiązane, a obszar filtracji w ośrodku porowatym nie ogranicza powierzchnia swobodna (linia zerowych ciśnień). Przepływ w obydwu strefach (nasyconej i nienasyconej) można konsekwentnie opisać tymi samymi równaniami - równaniem ciągłości oraz równaniem definiującym prawo filtracji

$$\operatorname{div}(\mathbf{q}) = c \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = -k_r(p) \mathbf{K} \operatorname{grad}(h) \quad (4)$$

gdzie k_r - relatywna przewodność hydrauliczna ($0 \leq k_r(p) \leq 1$), $p=h-z$ - wysokość ciśnienia w metrach (cm) słupa wody, w strefie nienasyconej przyjmuje wartości ujemne.

Funkcja pojemnościowa c opisuje zdolności ośrodka do retencjonowania wody uwzględniające sumarycznie ścisłość wody, odkształcalność szkieletu gruntowego, oraz zmienne nasycenie. Jest ona nieliniową funkcją wysokości ciśnienia p . W strefie niepełnego nasycenia ścisłość wody oraz ośrodka w porównaniu z różniczkową pojemnością wodną jest pomijalnie mała [Neuman 1973]. W strefie nasyconej wartości funkcji pojemnościowej są zawsze różne od zera jednak zdecydowanie mniejsze (kilka rzędów) niż w strefie aeracji.

Po wstawieniu równania (4) do (3) otrzymujemy uogólnione równanie Richardsa. W przeciwieństwie do sformułowania klasycznego w obszarze Ω rozwiązać należy

teraz równanie nieliniowe lecz obszar przepływu jest znany - obejmuje cały korpus wału.

Rozwiązanie tak sformułowanego problemu uzyskać można w zasadzie wyłącznie z pomocą dyskretnych metod numerycznych. W niniejszej pracy, do analizy filtracji przez wał, zastosowano metodę elementów skończonych do aproksymacji w przestrzeni oraz niejawną schemat różnicowy do aproksymacji w czasie.

Dyskretyzację w obszarze filtracji przeprowadzono w sposób typowy dla MES jako iloczyn znanych funkcji bazowych oraz poszukiwanych, zmiennych w czasie, wartości funkcji h w węzłach (\mathbf{H}) podziału na elementy. Dyskretyzację różnicową w czasie pomiędzy chwilą t i $t+\Delta t$ przyjęto w postaci $\mathbf{H}(t) = (1 - \theta)\mathbf{H}^t + \theta\mathbf{H}^{t+\Delta t}$.

Wprowadzono współczynnik wagowy $\theta=0,67$ co zapewnia stabilność obliczeń. Uwzględniając powyższe zależności, globalny układ równań MES można zapisać w postaci [Wosiewicz, Sroka 1992]

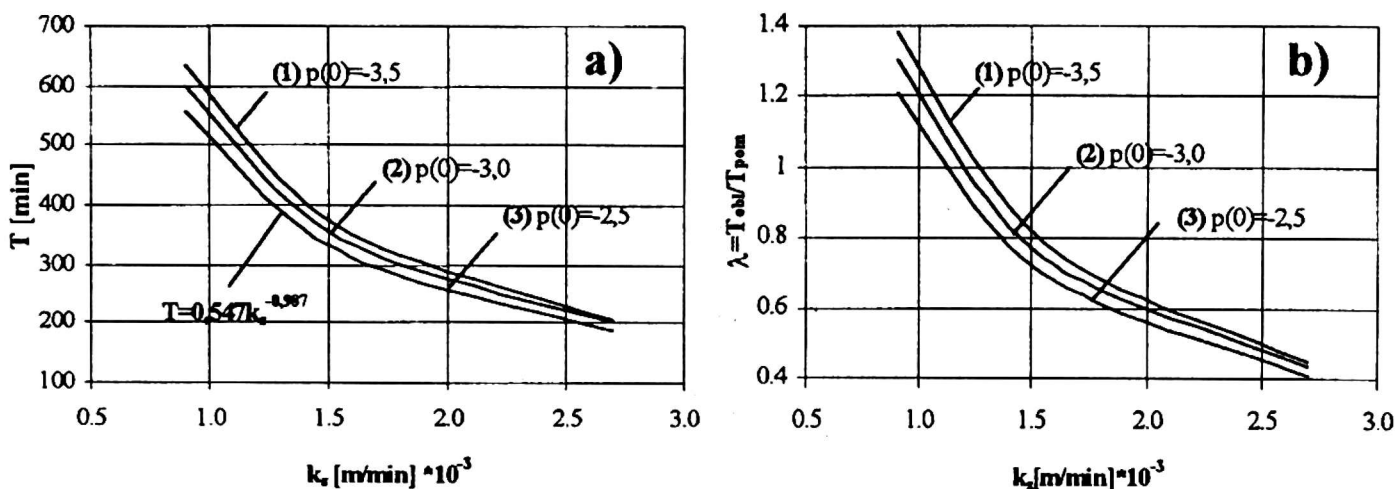
$$\left(\theta\mathbf{G}^t + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{M}^t\right)\Delta\mathbf{H} = -\mathbf{P}^t - \mathbf{G}^t\mathbf{H}^t \quad (5)$$

gdzie: $\Delta\mathbf{H}$ -wektor przyrostów wysokości piezometrycznych w czasie Δt , \mathbf{P} -wektor zasilania, \mathbf{G} -globalna macierz wodoprzepuszczalności, \mathbf{M} -macierz pojemnościowa. Dokonano linearyzacji problemu na kroku czasowym przyjmując wielkości niezbędne do zbudowania układu równań (5) z poprzedniego kroku czasowego.

Do obliczeń, według przedstawionego algorytmu, zastosowano własne oprogramowanie, w którym wykorzystano najprostsze, trójkątne elementy z liniowymi funkcjami bazowymi. Siatka podziału obszaru filtracji na elementy, zbudowana za pomocą dwustopniowego generatora (najpierw generowane były węzły wzdłuż konturu a następnie siatka wewnątrz obszaru), składała się z 1200 węzłów oraz 2116 elementów. Na skarpie odwodnej zadawano zmienną w czasie wysokość piezometryczną. W ciągu pierwszych pięciu minut symulacji wzrastała ona liniowo od zera do $H_g=0,50\text{m}$ i dalej utrzymywano ją na stałym poziomie (rys.1). Pozostałą część brzegu przyjęto jako nieprzepuszczalną. Symulację prowadzono do chwili zetknięcia się linii zerowych ciśnień ze skarpią odpowietrzna, uznając to za moment pojawienia się przesiąku.

Do obliczeń na modelu numerycznym przyjęto charakterystyki gruntu wyznaczone na podstawie krzywej retencyjnej dla piasku drobnego za publikacją [Reisenauer 1963]. Analityczną postać krzywej retencyjnej obliczono metodą Van Genuchtena [Olszta, Zaradny 1991] wyznaczając stałe metodą najmniejszych kwadratów. Uzyskane charakterystyki opisujące różniczkową pojemność wodną (c) oraz względną przewodność (k_r) pokazano na rys 1b.

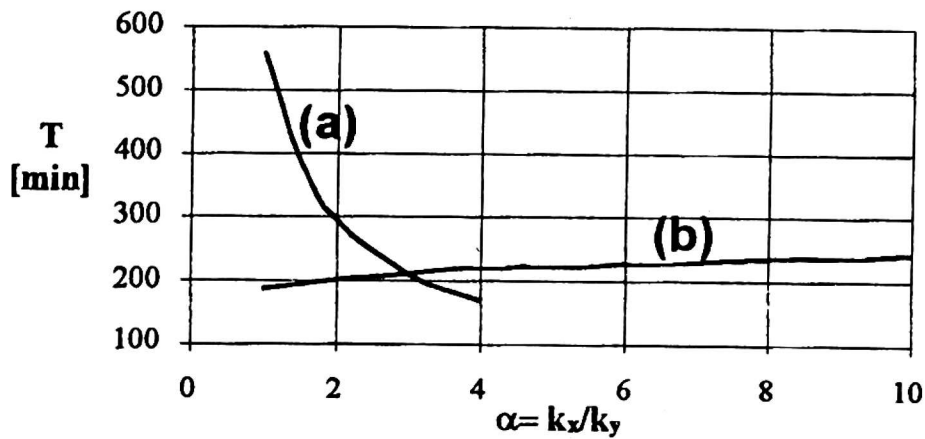
Wykonano szereg symulacji zmieniając współczynnik filtracji przy pełnym nasyceniu ($9 \cdot 10^{-4} \leq k_s \leq 2,7 \cdot 10^{-3} \text{m/min}$) oraz uwilgotnienie korpusu wału w chwili



Rys.2. Czas przesiąku T a) oraz bezwymiarowy czas λ b) jako funkcja współczynnika filtracji k_s oraz rozkładu wysokości ciśnień w chwili początkowej $p(0)$
 Fig.2. Time of leakage T a) and dimensionless time λ b) as a function of saturated permeability coefficient k_s and initial pressure distribution $p(0)$

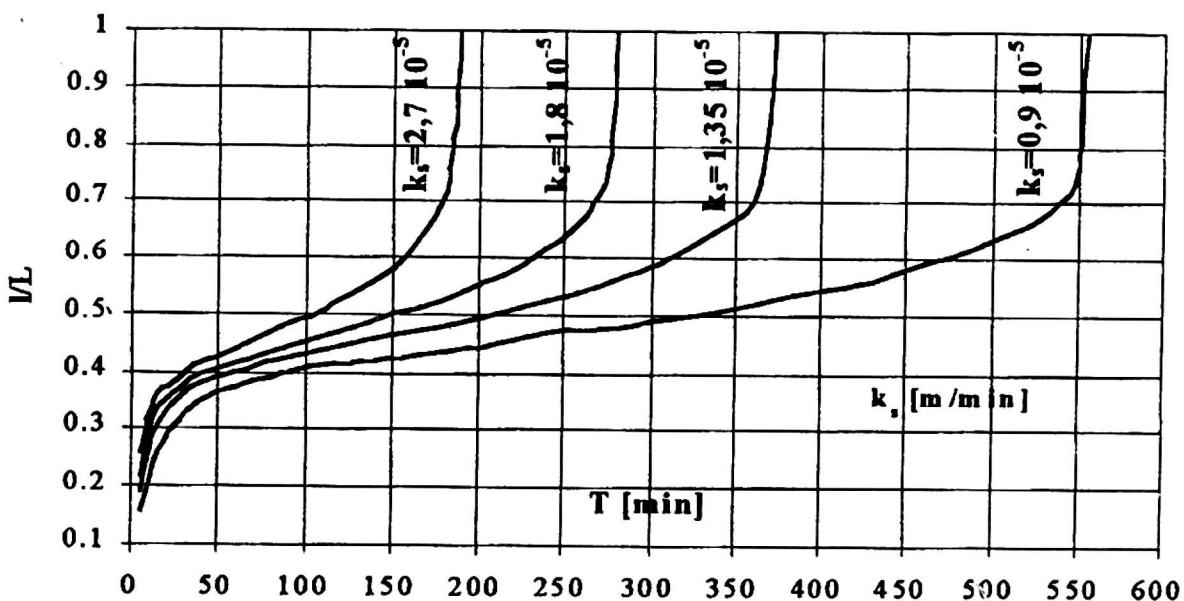
początkowej ($-3,0 \leq p(0) \leq -2,5$ m). Badano także wpływ anizotropii ośrodka na czas pojawienia się przesiąku. Wyniki analiz w syntetyczny sposób przedstawia rys.2a oraz 2b. Pokazano zależność pomiędzy współczynnikiem filtracji k_s a czasem przesiąku T przy różnej wilgotności wału w chwili początkowej. Dla warunku początkowego $p(0) = -2,5$ m na podstawie wyników czterech symulacji aproksymowano zależność

$T(k_s)$ w postaci $T(k_s) = a k_s^{-b}$ uzyskując bardzo dobre dopasowanie. Rysunek 2b przedstawia te same zależności lecz czas przedstawiono w postaci bezwymiarowej. Punkty przecięcia krzywych z prostą $\lambda = 1.0$ wskazują takie wartości k_s , dla których uzyskuje się czas identyczny jak na modelu gruntowym. Biorąc oszacowania współczynnika filtracji ze wzorów Krügera oraz metodą Kamińskiego przy warunku początkowym $p(0) = -2,5$ m (takie jak w czasie eksperymentu) uzyskano czas przesiąku odpowiednio 158 i 280min. Porównanie z czasem pomierzonym (460min) wskazuje na konieczność tarowania modelu numerycznego. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że współczynnik filtracji jest najistotniejszym parametrem modelu, który winien być określony podczas tarowania.



Rys.3 Czas przeięku T jako funkcja współczynnika anizotropii $\alpha=k_x/k_y$
 Fig.3 Time of leakage as a function of anisotropy coefficient

Wpływ współczynnika anizotropii ośrodka $\alpha=k_x/k_y$ na czas przeięku przedstawiają zależności na rys.3. Krzywa (a) przedstawia czas przeięku T jako funkcję parametru α przy stałym $k_y=9 \cdot 10^{-6}$ m/s natomiast krzywa (b) przy stałej wartości $k_x=2,7 \cdot 10^{-5}$ m/s. Przebieg w czasie symulowanego na modelu numerycznym zjawiska dobrze charakteryzuje wykres przemieszczania się punktu przecięcia krzywej zerowych ciśnień z podstawą wału (rys.4). Prędkości przemieszczania się tego punktu są największe w początkowej i końcowej fazie procesu, natomiast zdecydowanie zmniejszają się w trakcie nasycania korpusu wału.



Rys.4 Położenie punktu przecięcia krzywej zerowych ciśnień z podstawą wału w czasie symulacji

Fig. 4 Displacement of crossing point of zero-pressure curve with the impervious layer

Model gruntowy

Model gruntowy wału odpowiadający analizowanemu modelowi numerycznemu usypano w wąskoprzestrzennym korycie wykonanym ze szkła organicznego [Walczak 1997]. Użyto piasku drobnego pozyskanego ze złoża naturalnego ($n=0.36$, podsiąk kapilarny $h_c=0,6\text{m}$). Sypanie i zagęszczanie modelu przeprowadzono w taki sposób aby zapewnić stałą, możliwie małą, wilgotność w całym korpusie wału jako warunek początkowy a z drugiej strony łatwe zagęszczanie. Wilgotność gruntu wynoszącą 7,3% ($\theta=0,124$) oznaczono sondą Troxler. Współczynnik filtracji oszacowany na podstawie krzywej uziarnienia wg wzoru Krügera wyniósł $k_{21}=5,35 \cdot 10^{-5}\text{m/s}$ a metodą Kamieńskiego $k=3 \cdot 10^{-5}\text{m/s}$. Eksperyment rozpoczęto napełniając w sposób nagły zbiornik górny i do końca symulacji utrzymywano w nim stały poziom. Mierzono czas pojawienia się przesiąku na skarpie odpowietrznej a później wielkość natężenia odpływu. Czas pojawienia się przesiąku przez wał wyniósł 460min. Symulację zakończono po 24 godzinach stwierdzając stały wydatek oraz stałą długość strefy wysączenia (ustalenie się procesu). Na podstawie pomierzonego wydatku, korzystając z uproszczonego sformułowania Dupuita, także wyznaczono współczynnik filtracji i wyniósł on $k_s=5,4 \cdot 10^{-5}\text{m/s}$ (program UPROFIL [Rembeza 1993]). Jest to wartość bardzo zbliżona do obliczonej wzorem Krügera. Należy jednak pamiętać, że wydatek zmierzony w trakcie eksperymentu uwzględnia przepływ także w strefie nienasyconej (lewar kapilarny) czego nie obejmuje model Dupuit'a a zatem oszacowana wartość współczynnika filtracji jest w tym przypadku zawyżona. W praktyce inżynierskiej czasy przesiąku przez wał szacuje się przybliżonymi formułami Thiema i Erba [Wały przeciwpowodziowe..1983]. We wzorach tych właściwości filtracyjne ośrodka opisane są dwoma parametrami – współczynnikiem filtracji k_s oraz jednostkową objętością porów wypełnionych powietrzem n_p . Wzory mają postać: $T=\beta n_p/k_s$ (jako β zapisano część formuły zależną jedynie od wielkości geometrycznych). Zauważyć należy, że w parametrze n_p zawarta jest informacja odpowiadająca warunkowi początkowemu. Uzyskane z modelu numerycznego rozwiązanie (rys.2) ma analogiczną postać. Obliczone wzorami przybliżonymi czasy przesiąku, dla wyznaczonych z pomiarów wartości współczynnika filtracji oraz wilgotności początkowej, mieszczą się w zakresie od 417 do 980 minut.

Podsumowanie i wnioski

Modele numeryczne są coraz szerzej stosowane do prognozowania czasu przesiąku przez wały. Z uwagi na specyfikę tego typu budowli (w odróżnieniu od

zapór piętrzą wodę tylko okresowo i pozbawione są urządzeń kontrolno pomiarowych) weryfikacja prognozy z przebiegiem rzeczywistego zjawiska filtracji jest mocno utrudniona.

Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły na sformułowanie kilku wniosków dotyczących obliczania czasu przesiąku przez wały:

- przybliżone wzory Thiema oraz Erba dla niższych wałów wykonanych z gruntu o dużym podsiąku kapilarnym dają istotnie zawyżone czasy przesiąku (odnotowano to dla analizowanego modelu laboratoryjnego)
- w przypadku ośrodka ortotropowego na czas przesiąku wpływa istotnie jedynie wartość współczynnika filtracji w kierunku poziomym (k_x)
- błędy określenia warunku początkowego (wilgotności korpusu wału w chwili początkowej) w znacznie mniejszym stopniu niż współczynnik filtracji wpływają na obliczany czas przesiąku.

Literatura

NEUMAN S.P. 1973. *Saturated-unsaturated seepage by finite elements*. J. Hydr. Div. pp. 2233-2250.

OLSZTA W., ZARADNY H. 1991. *Pomiarowe i obliczeniowe metody określania współczynnika przewodności hydraulicznej gleb przy niepełnym nasyceniu*. Inst. Mel. Użytk. Ziel. Falenty.

PLESSIS P. 1997. *Fluid Transport in Porous Media*. Comp. Mech. Publ. Southampton. Boston

REISENAUER A.E. 1963. *Methods for solving problems of multidimensional, partially saturated steady state flow in soils*. J. Geoph. Res. 68. pp 5725-5733

REMBEZA L., 1993 [w], *Komputerowe obliczenia Hydrauliczne dla Budownictwa wodno-melioracyjnego*, red. Wosiewicz B., Wyd. AR-Poznań

SROKA Z., WOSIEWICZ J.B., 1996. *Seepage through earth dams regarding unsaturated zone*. Problems of Hydroengineering 6-th Conference. Pr. Nauk. Inst. Geot. Hydr. Pol. Wrocław. 71 pp 328-335.

WALCZAK M. 1997. *Wyznaczenie czasu pojawienia się przesiąku przez wał z uwzględnieniem strefy niepełnego nasycenia*. Praca magisterska AR Poznań. (promotor Z. Sroka)

Wały przeciwpowodziowe – wytyczne instruktażowe projektowania. 1983. red. Żbikowski A.

WOSIEWICZ B., SROKA Z. 1992. *Komputerowe obliczenia filtracji dla budownictwa wodno-melioracyjnego*. WNT Warszawa

ZARADNY H. 1990. *Matematyczne metody opisu i rozwiązań zagadnień*

Summary

Determination of leakage time through levees considering unsaturated zone.

Results of calculations and measurements of leakage time through levees located on impervious layer are presented. Numerical models considering saturated-unsaturated seepage have been used for parameter analysis. The results of calculations have been discussed and compared with experimental data and results obtained with simplified formulas.

Zbigniew Sroka

Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego

Akademia Rolnicza w Poznaniu

ul. Mazowiecka 26,

60-623 Poznań