

ANALIZA WPLYWU WARUNKÓW HYDRODYNAMICZNYCH NA STATECZNOŚĆ WAŁÓW ZIEMNYCH

W PRACY zapory ziemnej można wyróżnić 3 fazy, w których zachodzi niebezpieczeństwo naruszenia równowagi masywu gruntowego:

1) w okresie budowy objawy niestateczności pojawiają się w czasie, gdy sypane masy ziemne mają kąt większy od kąta stoku naturalnego lub w stadium zagęszczania, gdy przekroczona zostaje równowaga wskutek wstrząsów;

2) w okresie pracy zbiornika przy pełnym nasyceniu gruntów budujących zaporę może powstać sytuacja krytyczna od strony odwodnionej wskutek działania sił hydrodynamicznych lub od strony wody wskutek zmian w rozkładzie i wielkości sił działających na grunt;

3) przy nagłym opróżnianiu zbiornika sytuacja krytyczna może powstać od strony wody, jako rezultat działalności sił hydrodynamicznych wywołanych opadaniem zwierciadła wody w zbiorniku.

Dla wałów ziemnych niebezpieczna jest zwłaszcza trzecia z opisywanych faz, gdy na masyw gruntowy działają siły ciśnienia spływowego. Dokładna wielkość i kierunek działania tych sił są trudne do ustalenia i wymaga konstruowania siatki hydrodynamicznej. Oprócz tego wszystkie metody obliczeniowe, przyjmując różne dane wyjściowe, dają nieco inne rezultaty. Dla przykładu na ryc. 1 podano porównanie wyników obliczeń otrzymanych przy użyciu rozmaitych metod obliczeniowych. Zestawienie sporządzone jest dla różnej wysokości zbocza bez uwzględnienia sił hydrodynamicznych. Obliczenia te zostały wykonane w pracy I. W. Fiodorowa (2) dla poniższych danych: nachylenie zbocza 1:1,5, kąt tarcia wewnętrzznego $\varphi = 24^\circ$, spójność $c = 1,74 \text{ T/m}^2$, ciężar objętościowy $\gamma = 1,8 \text{ T/m}^3$.

Dotychczas brak podobnego opracowania przy uwzględnieniu sił hydrodynamicznych, nie wiadomo również jaki rzeczywisty zapas bezpieczeństwa mają wały sprawdzone różnymi metodami. Dlatego zachodzi potrzeba sprawdzania współczynnika stanu równowagi, możemy to uzyskać jedynie przez analizę zaistniałych awarii lub przez badania modelowe w dużej skali. Każdy przypadek niestateczności pozwala nam stwier-

dzić, iż współczynnik stanu równowagi (współczynnik bezpieczeństwa) w momencie powstania awarii był nieco mniejszy od jedności, mimo iż obliczenia wskazują, że wynosił on np. 0,6 lub 1,2. Analiza zaistniałych awarii w takim przypadku daje nam również możliwość oszacowania działania sił hydrodynamicznych na budowlę, wielkości tych sił i ich wpływu na stateczność.

W niniejszym artykule przeanalizowany został przypadek niestateczności wałów zapory ziemnej, związany ze zmianą warunków wodnych w zbiorniku. Przypadek ten zaistniał wskutek awarii zasuwy jazu, co spowodowało szybkie opadanie wody w zbiorniku. Poziom wody obniżył się o ok. 5 m w ciągu 10 godzin (ryc. 2). Osunięcie się mas ziemnych nastąpiło w dwu miejscach ok. 3,5 godz. po awarii zasuwy, gdy poziom wody obniżył się o ok. 2,5 m.

Osuwisko I powstało w bezpośrednim sąsiedztwie śluzy, przy nachyleniu skarpy przechodzącym od 1:2 do 1:1 w miejscu, gdzie dodatkowe obciążenie stanowił budynek trafo-stacji (ryc. 3). Północna granica osuwiska przebiegała wzdłuż ściany budynku, a zachodnia opierała się o konstrukcję śluzy. Osuwisko objęło ok. 4500 m³ mas ziemnych, nastąpiło nagle, a proces przemieszczania materiału trwał kilka sekund. Ruiny budynku stacji przemieściły się w tym czasie o ok. 4,2 m w głąb kanału i ok. 3,2 m w dół, a elementy nabrzeża znajdowano na środku kanału (do 40 m od osuwiska).

Skarpa, która powstała w wyniku osuwiska, była do wysokości 2,0 m prawie pionowa, a poniżej znajdowały się usypiska oberwanych mas ziemnych. Odslonięty profil skarpy pokazuje ryc. 4, a zniszczenia ryc. 5.

Osuwisko II, które powstało w odległości ok. 150 m na E od osuwiska I było mniejsze, objęło bowiem swym działaniem ok. 2000 m³ gruntu. Kształt jego obrazuje ryc. 3 i 6. Nachylenie skarpy wału wynosi tu 1:2. W wyniku osuwiska drzewo znajdujące się na szczycie wału przesunęło się ok. 4,5 m w dół i ok. 4,0 m w głąb kanału. Podobnie jak w osuwisku I w przekroju gruntów budujących wały, a odsłoniętych przez osuwisko II, obserwowano dużą niejednorodność

gruntów i zawartość znacznych ilości materiału ilastego.

W związku z tym dla określenia właściwości fizyczno-mechanicznych i filtracji zdecydowano się na pobranie próbek bruzdowych z odsłoniętych partii skarp do badań laboratoryjnych. Rozrzut wyników badań był dość znaczny, ale mimo to zdecydowano się na przyjęcie do obliczeń wartości średnich arytmetycznych. Średnia wartość współczynnika wodoprzepuszczalności (filtracji) z wykonanych 7 próbek bruzdowych jest rzędu $k = 10^{-4}$ cm/sek; minimalna $8,6 \cdot 10^{-3}$ cm/sek; maksymalna $3,8 \cdot 10^{-5}$ cm/sek. Średnia arytmetyczna wartość kąta tarcia i spójności ustalona w aparacie bezpośredniego ścinania na 6 próbkach o naruszonej strukturze przy pełnym nasyceniu wodą wynosi:

$$\Phi = 23^\circ \quad \begin{cases} \Phi_{\max} = 32^\circ \\ \Phi_{\min} = 18^\circ \end{cases}$$

$$c = 0,08 \text{ kG/cm}^2 \quad \begin{cases} c_{\max} = 0,13 \\ c_{\min} = 0 \end{cases}$$

Wielkość ciężaru objętościowego przyjęta została do obliczeń na podstawie średniej arytmetycznej z 5 próbek NNS i wynosi:

$$\gamma_0 = 1,84 \text{ G/cm}^3 \quad \begin{cases} \gamma_{0\max} = 1,98 \text{ G/cm}^3 \\ \gamma_{0\min} = 1,65 \text{ G/cm}^3 \end{cases}$$

Osuwienie się tylko niektórych partii wałów tłumaczyć należy niejednorodnością materiału, czego nie da się uniknąć przy sztucznych nasypach. Z tego powodu pewne partie wału miały mniejszą wytrzymałość, a powstałe osuwiska I i II zaistniały właśnie w tych punktach. Należy dodać, iż w przypadku osuwiska I dodatkową przyczyną był budynek trafo-stacji zlokalizowany na koronie wału. Budynek ten o łącznym ciężarze ok. 130 t, na całej powierzchni swego rzutu wywierał dodatkowy nacisk ok. $0,6 \text{ kG/cm}^2$. Należy przyjąć, iż w momencie awarii istniała ok. 2,5 m różnica poziomów wody między zwierciadłem wody w gruntach budujących wały, a poziomem wody w zbiorniku, gdyż ze względu na małą przepuszczalność gruntów budujących wały woda nie mogła spłynąć w ciągu tak krótkiego czasu. Siły hydrodynamiczne zaistniałe wskutek różnicy poziomów wody spowodowały opisywane dwa osuwiska. Gdyby wpływ wody ze zbiornika następował wolniej, albo gdyby współczynnik wodoprzepuszczalności gruntów budujących wały był większy, istniałaby możliwość spłynięcia z nich wody, co nie spowodowałoby zachwiania równowagi zboczy.

W celu ustalenia wpływu ciśnienia splywowego na stateczność wałów opisywanej zapory ziemnej przeliczono oba powstałe osuwiska z uwzględnieniem sił hydrodynamicznych i bez ich uwzględnienia. W przypadku nie uwzględnienia sił ciśnienia splywowego przyjmowano poziom wody w gruncie i w zbiorniku na tej samej wysokości, odpowiadającej normalnemu poziomowi wody w zbiorniku, tj. chwili przed zaistnieniem awarii zasowy jazu. Obliczenia wykonano metodą Taylora i Felleniusa.

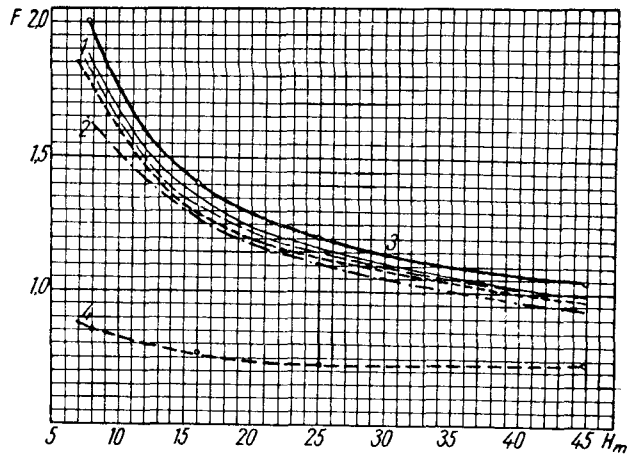
Metoda Taylora (6) jest metodą sił, w której współczynniki bezpieczeństwa uzyskuje się przez analizę wykresu, gdzie naniesione są stosunki

$$F\Phi_i = \frac{\text{tg } \Phi}{\text{tg } \Phi_i}; \quad F_{ci} = \frac{c}{c_i}$$

Z wykresów tych odczytano wyniki współczynników równowagi zbocza, przy których udział sił tarcia i spójności jest proporcjonalnie równy. Otrzymane wyniki podaje tabela I.

Tabela I

Nr osuwiska	Współczynnik stanu równowagi zbocza w warunkach hydrostatycznych F_s	Współczynnik stanu równowagi zbocza w warunkach hydrodynamicznych F_h
I	1,25	0,7
II	1,35	0,8

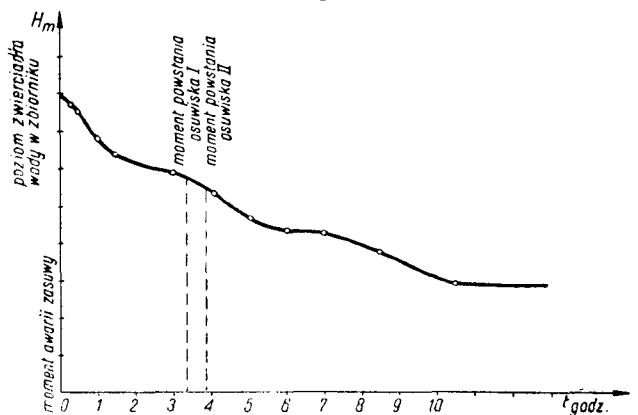


Ryc. 1. Współczynniki stanu równowagi zbocza oznaczone różnymi metodami wg I. W. Fiedorowa.

1 — metodą Terzaghi-Ohde-Lomnize, 2 — metodą kąta zsuwu $\text{tg } \psi = \text{tg } \varrho + \frac{c}{\delta}$, 3 — metodą Taylora-Goldszteina-Fiedorowa, 4 — metodą Fp-Masłowa.

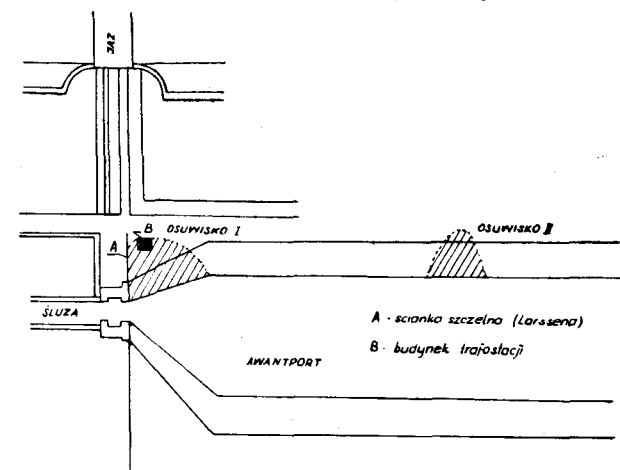
Fig. 1. Coefficients of equilibrium state of slope, determined by various methods, after I. W. Fiedorov.

1 — using Terzaghi-Ohde-Lomnize method, 2 — using slide angle $\text{tg } \psi = \text{tg } \varrho + \frac{c}{\delta}$, 3 — using Taylor-Goldstein-Fiedorow method, 4 — using F_p -Maslov method.



Ryc. 2. Wykres obniżania się zwierciadła wody w zbiorniku wskutek powstałej awarii zasowy jazu.

Fig. 2. Diagram of decrease of water level in reservoir due to the failure of weir gate.



Ryc. 3. Plan sytuacyjny miejsca awarii.

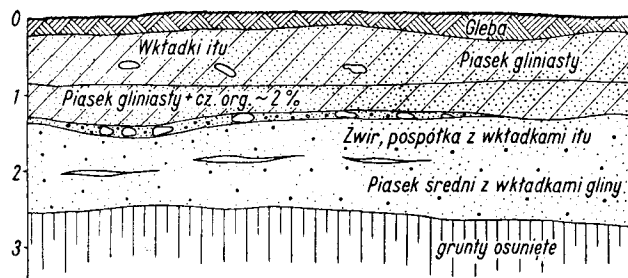
Fig. 3. Situation plan of failure site.

Metodą Felleniusa uwzględniono wpływ ciśnienia sphywowego w wartości momentów zgodnie z wzorami podawanymi przez B. Jacenkowa (3, 4). Wyniki otrzymane podaje tabela II.

Tabela II

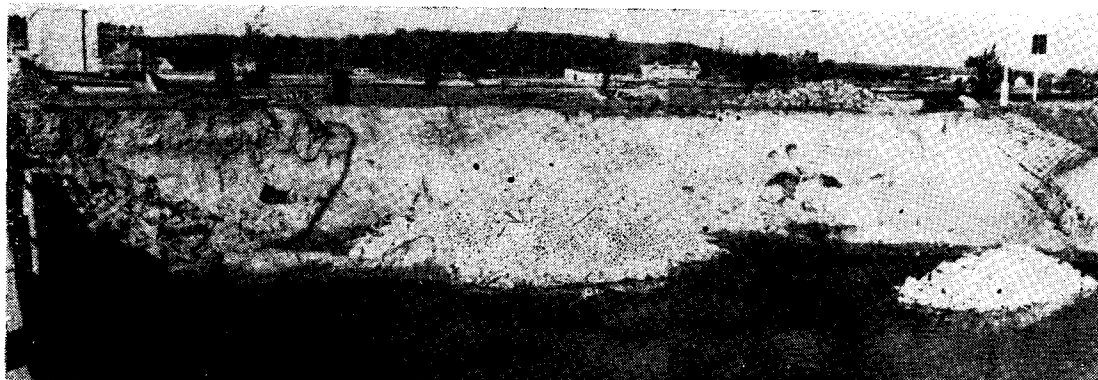
Nr osuwiska	F_s	F_h
I	1,27	0,79
II	1,31	0,88

Wyniki obliczeń metodą Taylora i Felleniusa są podobne, a współczynniki stanu równowagi przy uwzględnieniu czynników hydrodynamicznych F_h są znacznie



Ryc. 4. Profil odsłoniętych gruntów w skarpie osuwiska I.

Fig. 4. Profile of exposed grounds at the scarp of earth slide I.



Ryc. 5.
Fig. 5.

Ryc. 6.
Fig. 6.

mniejsze od jedności. Zakładając, iż warunki zadania zostały określone prawidłowo, należy stwierdzić, że osuwisko powinno już następować w chwili, gdy współczynnik stanu równowagi zbocza F staje się nieco mniejszy od jedności.

W analizowanych przypadkach współczynnik stanu równowagi zbocza w chwili awarii zależnie od metody obliczeń wynosił:

osuwisko I 0,7 – 0,79
osuwisko II 0,8 – 0,88,

a więc metody te dają pewien zapas bezpieczeństwa. Stwierdzenie to jest tym bardziej słuszne, iż w rozpatrywanym tu przypadku istniały warunki do ciągłej zmiany współczynnika F . W chwili awarii zasuwę jazu wartość współczynnika stanu równowagi wynosiła F_s , a w miarę obniżania się poziomu wody w zbiorniku zmniejszała się, aż do wartości krytycznej F_h , tzn. do momentu, gdy następowało osuwisko. Wobec tego w każdej pośredniej chwili wartość współczynnika stanu równowagi znajdowała się w przedziale:

$$F_s < F < F_h$$

Rozpatrywany przypadek niestateczności wałów pozwala stwierdzić jak duży udział mają siły hydrodynamiczne w warunkach szybkiego obniżania się poziomu wody w zbiorniku. Siły te spowodowały obniżenie współczynnika stanu równowagi o ok. 40%.

Należy także zwrócić uwagę na właściwy dobór gruntów, które będą użyte do budowy wałów. Zawartość domieszek pylistych w piaskach lub wkładki gruntów spoistych zmniejsza znacznie wartość współczynnika filtracji i powoduje powolniejsze odsączenie wody ze zbocza, co przy nagłym opróżnieniu prowadzi do zwiększenia sił hydrodynamicznych. Zagadnienie



to opracował E. Reinius (6), uzależniając wielkość sił hydrodynamicznych od współczynnika filtracji, szybkości opróżniania zbiornika oraz porowatości gruntu.

W ten sposób wyjaśnić można powstanie dwóch tylko osuwisk, gdy inne partie zbocza zachowały równowagę. Osuwiska te powstały w czasie, kiedy szybkość opadania zwierciadła wody była znaczna (ryc. 2). Podobna szybkość opadania utrzymywała się jeszcze przez ok. 80 min. od chwili powstania osuwiska II. Po tym czasie szybkość opadania zmalała, co pozwoliło na wypływ wody ze skarpy, bez naruszenia stanu równowagi.

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza osunięcia się wałów zapory ziemnej pozwala stwierdzić, iż przy szybkim obniżaniu się zwierciadła wody udział sił hydrodynamicznych jest znaczny i w omawianym przypadku stanowił on

40% krytycznej wartości współczynnika stanu równowagi.

W celu zmniejszenia wpływu sił hydrodynamicznych na stateczność zbocza należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór gruntu, o zdolności filtracyjnej dostosowanej do największej szybkości opadania wody w danym zbiorniku.

LITERATURA

1. Bishop A. — The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slops. Geotechnique, 1955, No 1.
2. Fiedorow I. W. — Metody rachunku ustoiczności skłonów i odkosów. Moskwa 1962.
3. Jacenkov B. — Wpływ sił hydrodynamicznych na stateczność uskoku naziomu. Arch. hydrotechniki VIII, 1961.
4. Jacenkov B., Iwanowska B. — Badanie stateczności wału przeciwpowodziowego z uwzględ-

SUMMARY

The article presents an analysis of earth dam slide caused by a rapid decrease of water level in a reservoir (5 m in 10 hours), due to the failure of weir gate. Owing to formation of hydrodynamical forces under difference of pressures, two earth slides have originated, the earth slide No I of a volume amounting 4500 m³, and the earth slide No II of about 2000 m³. Table I gives computations of safety coefficient made by various methods for escarpments, with or without hydrodynamical forces taken under consideration.

It was ascertained computations made that the hydrodynamical forces have lowered the safety coefficient about 40 per cent, in relation to the incipient state.

nieniem sił hydrodynamicznych. Rozprawy hydrotechniczne, Poznań 1962.

5. Penalva E. — Nota sobre metodos de verificação da estabilidade de Barrageus de terra. Lisboa 1961.
6. Reinius E. — The Stability of the Upstream Slope of Earth Dams. Statens Komitté for Byggnadsforskning, Meddelanden 12, Stockholm 1948.
7. Taylor D. — Osnovy mechaniki gruntów. Moskwa 1960. Tłumaczenie rosyjskie z angielskiego wydania 1954.
8. Terzaghi K. — Teoria mechaniki gruntów. Moskwa 1961. Rosyjskie tłumaczenie z angielskiego wydania 1942.
9. Uhlig D. — Einfluss einer Stauspiegelsenkung auf die Standsicherheit der wasserseitigen Boschung eines Staudammes. Wasserwirtschaft — Wasser technik 1962, nr 8.

РЕЗЮМЕ

В статье анализируются причины сползновения земляной плотины, произошедшего после быстрого снижения уровня воды в водоеме (5 м в течение 10 часов) вследствие аварии задвижки плотины. Под влиянием гидродинамических сил, возникших вследствие изменения давления, возникли два оползня: один объемом 4500 м³ и второй — 2000 м³. В таблице I приведен расчет коэффициента устойчивости откосов, произведенный различными методами с учетом и без учета гидродинамических сил.

Произведенные расчеты показывают, что воздействие гидродинамических сил снизило почти на 40% коэффициент устойчивости по сравнению с исходным состоянием.