

## ZNACZENIE WERYFIKACJI PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH RDZENIA W OCENIE BEZPIECZEŃSTWA ZAPORY NASYPOWEJ

Zdzisław Skutnik

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę oceny i weryfikacji parametrów geotechnicznych rdzenia zapory w Czorsztynie, która może być zastosowana również dla innych tego typu obiektów. Proponowana procedura przewiduje, w miarę postępu robót, wraz ze wzrostem wysokości budowanej zapory wykonywanie badań geotechnicznych (standardowych i specjalistycznych) oraz prowadzenie monitoringu i wykonywanie analiz numerycznych. W celu objęcia badaniami jak największej miąższości rdzenia i zastąpienie pomiarów punktowych ciągłymi profilami zaleca się wykonywanie sondowań CPT i DMT. Określenie wartości parametrów wytrzymałościowych, odkształceniowych i hydraulicznych w warunkach in situ w rzeczywistym stanie naprężenia pozwala właściwie ocenić stan techniczny zapory. Podejście takie umożliwia stosowanie nowoczesnych systemów oceny bezpieczeństwa i niezawodności zapór nasypowych z rdzeniami gruntowymi, np. systemów ekspertowych [Sorbjan 2004].

**Słowa kluczowe:** zaporą nasypowa, rdzeń zapory, parametry geotechniczne, weryfikacja parametrów, ocena bezpieczeństwa

### WSTĘP

Zaprojektowanie każdej budowli ziemnej, szczególnie zapory nasypowej, wymaga przyjęcia w obliczeniach projektowych wielu parametrów w tym parametrów geotechnicznych. Są to wielkości wyrażające ilościowo właściwości gruntów, wbudowywanych w zaporę. Wyróżniamy dwie zasadnicze grupy właściwości gruntów:

– fizyczne, obejmujące uziarnienie, wilgotność, granice konsystencji i gęstość objętościową, oraz

– mechaniczne, w których skład wchodzi ścisłość, wytrzymałość na ścinanie i przepuszczalność, charakteryzujące zachowanie się gruntu w zaporze.

Wartości właściwości fizycznych, łatwe do określenia za pomocą rutynowych badań geotechnicznych, pozwalających ocenić: wilgotność, gęstość objętościową szkieletu gruntowego, wskaźnik porowatości oraz stopień wilgotności, wykorzystywane są do wyznaczenia stanu zagęszczenia. Parametry mechaniczne zagęszczanych gruntów, zależne przede wszystkim od rodzaju i wilgotności oraz warunków wbudowywania (metody sypania, rodzaju zastosowanego sprzętu do zagęszczania itp.), określane są na podstawie wyników badań laboratoryjnych i terenowych [Czyżewski i in. 1973, Wolski i in. 1975, Anagnosti 1979, Skutnik 2002].

Parametry geotechniczne przyjęte przez projektanta zapory do sprawdzenia warunków stateczności określane są na podstawie badań gruntów występujących w złożu. W związku z tym wartości parametrów geotechnicznych przyjęte w obliczeniach projektowych powinny być traktowane jako wstępne, wymagające sprawdzenia przez porównanie z wynikami badań kontrolnych wykonywanych w czasie budowy w warunkach *in situ* i badań laboratoryjnych na próbkach pobranych z zagęszczonych warstw. W celu uzyskania wartości parametrów umożliwiających przeprowadzenie prognozy zachowania się gruntów w możliwych sytuacjach obciążeniowych warunki badań powinny być zbliżone do rzeczywistych [Barański i in. 1995, Wolski i in. 1997, Skutnik 2000].

Wyróżniane są trzy charakterystyczne okresy, w których występują największe zmiany obciążeń: budowa, pierwsze napełnianie oraz normalna eksploatacja.

## **METODY OCENY STANU TECHNICZNEGO I BEZPIECZNEGO FUNKCJONOWANIA ZAPORY ZIEMNEJ**

Do oceny stanu technicznego zapory nasypowej decydującego w głównej mierze o bezpiecznym funkcjonowaniu obiektu stosuje się, szczególnie w ostatnich latach, teorie bezpieczeństwa i niezawodności. Niestety możliwości, które dają nam teorie bezpieczeństwa i niezawodności nie zawsze w pełni mogą być wykorzystane w ocenie zapór nasypowych, a szczególnie zapór uszczelnionych rdzeniem gruntowym. Wynika to z faktu, że stosowane do budowy grunty oraz różniące się w każdym przypadku geometria sprawiają, że praktycznie każda tego typu zapora jest rozwiązaniem indywidualnym. Dlatego też nie można w sposób bezpośredni ekstrapolować danych z jednego obiektu na inny [Charles 1997].

Zachodzi więc konieczność stosowania w praktyce modeli deterministycznych oceny bezpieczeństwa, gdzie analizowana jest konkretna zapora. Podejście deterministyczne polega głównie na analizie informacji zbieranych podczas budowy i eksploatacji obiektu i interpretacji faktów na podstawie dostępnej wiedzy o typie danej zapory. Na bazie wszelkich dostępnych informacji o danej zaporze, obliczeń oraz literatury buduje się wzorzec, do którego przyrównuje się zachowanie zapory. Metody znacznie tańsze i bardziej uniwersalne, oparte na statystyce, a tym bardziej na probablistyce miały mniejsze znaczenie, były stosowane jedynie do ocen wstępnych, kiedy brakowało danych do zastosowania innej, bardziej dokładnej metody.

Niezawodność zapory osiąga się nie tylko dzięki trafnemu jej zaprojektowaniu, lecz także, a może przede wszystkim, dzięki dobrej jakości wykonania [Londe 1981, Barański i Sorbjan 1995, Di Biagio 2000]. Osiąga się to poprzez kontrolę jakości gruntów, właściwą technologię budowy, odpowiedni nadzór w czasie budowy, monitoring, a następnie użytkowanie obiektu zgodnie z ustalonymi w projekcie warunkami eksploatacji.

Prawidłowe zaprojektowanie i bezpieczne funkcjonowanie zapory nasypowej z rdzeniem gruntowym obejmuje nie tylko sprawdzenie stateczności ogólnej, lecz także stateczności wewnętrznej związanej przede wszystkim z odkształceniami i zjawiskami filtracyjnymi. Występowanie wyżej wymienionych niekorzystnych zjawisk związane jest głównie z rdzeniem gruntowym zapory. Dlatego jest on elementem, którego zachowanie się jest sprawą najistotniejszą dla bezpiecznej pracy zapory.

## BADANIA RDZENIA ZAPORY W CZORSZTYNIE

Terenowe badania geotechniczne rdzenia zapory w Czorsztynie zakresem swoim znacznie wykraczały poza badania standardowe i obejmowały:

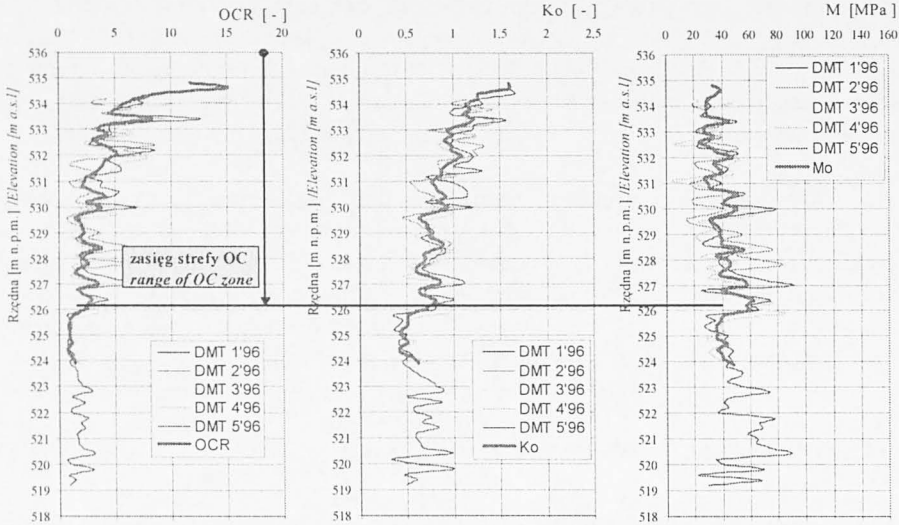
- sondowania statyczne sondą stożkową CPT (Cone Penetration Test),
- sondowania dylatometryczne DMT (Dilatometer Marchetti Test),
- badania systemem BAT,
- wiercenia z pobieraniem próbek gruntu o nienaruszonej strukturze NNS, próbnikiem Shelby,
- wykopy badawcze z pobieraniem próbek blokowych do badań laboratoryjnych.

Wymienione badania wykonywano równolegle ze standardową kontrolą jakości robót ziemnych prowadzoną przez Laboratorium Budowy – Chemkop Laborgeo z Krakowa, polegającą głównie na ocenie wskaźnika zagęszczenia ( $I_s$ ) dla każdej zagęszczonej warstwy. Minimalna dopuszczalna wartość wskaźnika  $I_s$ , będąca podstawą odbioru danej warstwy, wynosiła 0,95 ( $I_s \geq 0,95$ ).

Przykładowe wyniki sondowań DMT wykonanych po zakończeniu sezonu budowlanego 1996 zamieszczono na rysunku 1. Na podstawie obliczonych wartości współczynnika prekonsolidacji (OCR) oraz wartości współczynnika  $K_o$  określono zasięg prekonsolidowanej strefy rdzenia.

Badania laboratoryjne obejmowały:

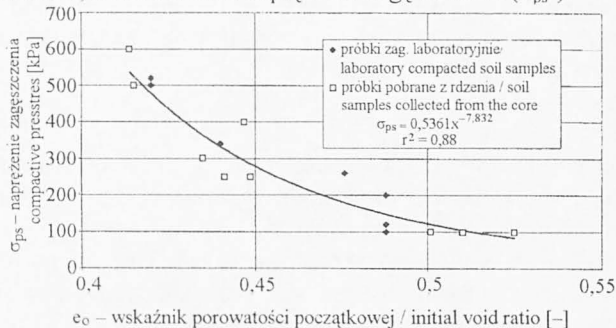
- oznaczenia podstawowych właściwości fizycznych (analiza uziarnienia, wilgotności naturalnej, granic konsystencji, gęstości właściwej szkieletu gruntowego, zawartości węglanów, zawartości części organicznych),
- badania ściśliwości w edometrze z zastosowaniem stopniowego wzrostu obciążenia, tzw. badanie IL (incremental loading) oraz w konsolidometrze ze stałą prędkością odkształcenia, tzw. badanie CRS (constant rate of strain),
- badania wytrzymałościowe w aparacie trójosiowego ściskania przy zastosowaniu następujących metod badań: z konsolidacją bez odpływu (CU) z nasączeniem, z konsolidacją bez odpływu (CU) w warunkach bez nasączenia, w warunkach izotropowej konsolidacji z odpływem (CID), w warunkach anizotropowej konsolidacji z odpływem (CK<sub>o</sub>D).



Rys. 1. Zmienność wskaźnika prekonsolidacji (OCR) oraz współczynnika parcia ( $K_0$ ) i modułu ścisłości ( $M$ ) w profilu rdzenia z sondowań dylatometrycznych DMT wykonanych po zakończeniu sezonu budowlanego 1996

Fig. 1. Changes of overconsolidation ratio (OCR), coefficient of earth pressure ( $K_0$ ) and modulus of compressibility ( $M$ ) in profile of the core from DMT tests carried out at the end of the construction season 1996

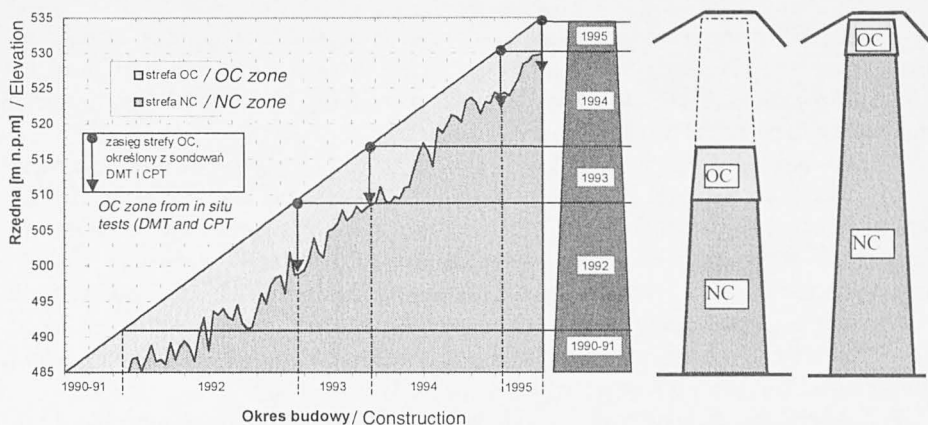
Na podstawie krzywych ścisłości wyznaczono moduły oraz naprężenie zagęszczenia ( $\sigma_{ps}'$ ) zarówno dla próbek zagęszczanych laboratoryjnie, jak i dla próbek pobranych z rdzenia. Naprężenie zagęszczenia wyznaczono metodą Casagrandego. Uzyskane z badań wartości naprężenia zagęszczenia ( $\sigma_{ps}'$ ) naniesiono na wykresy w zależności od początkowego wskaźnika porowatości (rys. 2). Następnie wykorzystując „metodę najmniejszych kwadratów”, znaleziono funkcję, za pomocą której, znając początkowy wskaźnik porowatości, można ocenić naprężenie zagęszczenia ( $\sigma_{ps}'$ ).



Rys. 2. Zależność naprężenia zagęszczenia ( $\sigma_{ps}'$ ) od wskaźnika porowatości początkowej ( $e_o$ ) po zagęszczeniu z badań ścisłości metodą CRS i IL – próbki zagęszczane w laboratorium oraz pobrane z rdzenia zapory

Fig. 2. Relationship between compactive prestress ( $\sigma_{ps}'$ ) and initial void ratio ( $e_o$ ) after compaction from laboratory compressibility tests CRS and IL of laboratory and field compacted soil samples

Zasięg strefy OC określony na podstawie rozkładu współczynnika  $K_o$  i wskaźnika OCR z sondowań DMT oraz obliczonego z zależności naprężenia zagęszczenia ( $\sigma_{ps}$ ) od wskaźnika porowatości początkowej ( $e_o$ ) przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zasięg strefy pekonsolidacji rdzenia zapory określony na podstawie zależności  $\sigma_{ps}' = 0,536e_o^{-7,83}$  uzyskanej z badań laboratoryjnych oraz określony na podstawie badań in situ (sondowań CPT i DMT)

Fig 3. Range of the overconsolidated OC zone of the core ( $\sigma_{ps}'$ ) calculated from the equation  $\sigma_{ps}' = 0.536e_o^{-7.83}$  and determined on the basis of in situ tests CPT and DMT

Efektywne parametry wytrzymałościowe określone na podstawie badań w aparacie trójosiowego ściskania niezależnie od metody badania (z odpływem czy bez odpływu) różnią się nieznacznie. Nie ma również wpływu na uzyskiwane wartości parametrów  $\Phi'$  i  $c'$  początkowy stan nasycenia próbki gruntu, gdyż w procesie konsolidacji próbki, poprzedzającym jej ścinanie, praktycznie następuje jej nasycenie. Wynika to z faktu, że początkowy stopień wilgotności gruntu rdzenia był wysoki i średnio wynosił 0,9 ( $S_r \approx 0,9$ ). Ostatecznie do obliczeń przyjęto następujące parametry wytrzymałościowe:

$\Phi' = 35^\circ$  i  $c' = 0$  kPa dla dolnej części rdzenia (strefa NC),

$\Phi' = 30^\circ$  i  $c' = 10$  kPa dla górnej części rdzenia (strefa OC).

Większe różnice występują natomiast w wartościach parametrów odkształceniowych. Zarówno wyniki badań edometrycznych (modułów ściśliwości  $M_o$ ), jak i wyniki badań trójosiowych (modułów odkształcenia  $E_o$ ) potwierdziły duży wpływ wilgotności początkowej i wskaźnika porowatości ( $e_o$ ) na te parametry. Wzrost wilgotności i wskaźnika porowatości zwiększają ściśliwość gruntu rdzenia. Różnice w wartościach modułu ściśliwości ( $M$ ), określonych na podstawie sondowań CPT i DMT, świadczą o konieczności korekty wzorów interpretacyjnych dla tych badań. Wartości modułu ( $M_o$ ) uzyskane z sondowań CPT i DMT wykorzystano jedynie do podziału rdzenia na strefy o różnej ściśliwości, do obliczeń zaś przyjęto moduły odkształcenia ( $E_o$ ) uzyskane z badań trójosiowych. Przyjęte do obliczeń wartości modułów ( $E_o$ ) zawierały się w zakresie od 15 do 20 MPa.

## PROPONOWANA METODA WERYFIKACJI PARAMETRÓW JAKO PODSTAWOWY ELEMENT SYSTEMU OCENY BEZPIECZEŃSTWA ZAPORY ZIEMNEJ

System oceny bezpieczeństwa zapory wymaga opracowania modelu, do którego porównywane będzie bieżące zachowanie się obiektu. Wymaga to wielu informacji ilościowych i jakościowych dotyczących przede wszystkim właściwości wbudowanych gruntów, czyli parametrów geotechnicznych.

W celu określenia wiarygodnych parametrów geotechnicznych proponuje się metodę weryfikacji obejmującą: badania standardowe, badania specjalistyczne, monitoring, analizę numeryczną [Skutnik 2002]. Schemat blokowy proponowanej metody weryfikacji parametrów przedstawia rysunek 4. Podobnie jak w „metodzie obserwacyjnej”, którą stosował przez wiele lat Terzaghi, a sformalizował i opisał Peck [1969], od momentu rozpoczęcia budowy rdzenia zapory wykonywane są badania geotechniczne, prowadzony jest monitoring zachowania się budowanego rdzenia oraz prowadzona jest analiza obliczeniowa naprężeń, odkształceń i ciśnienia wody w porach.

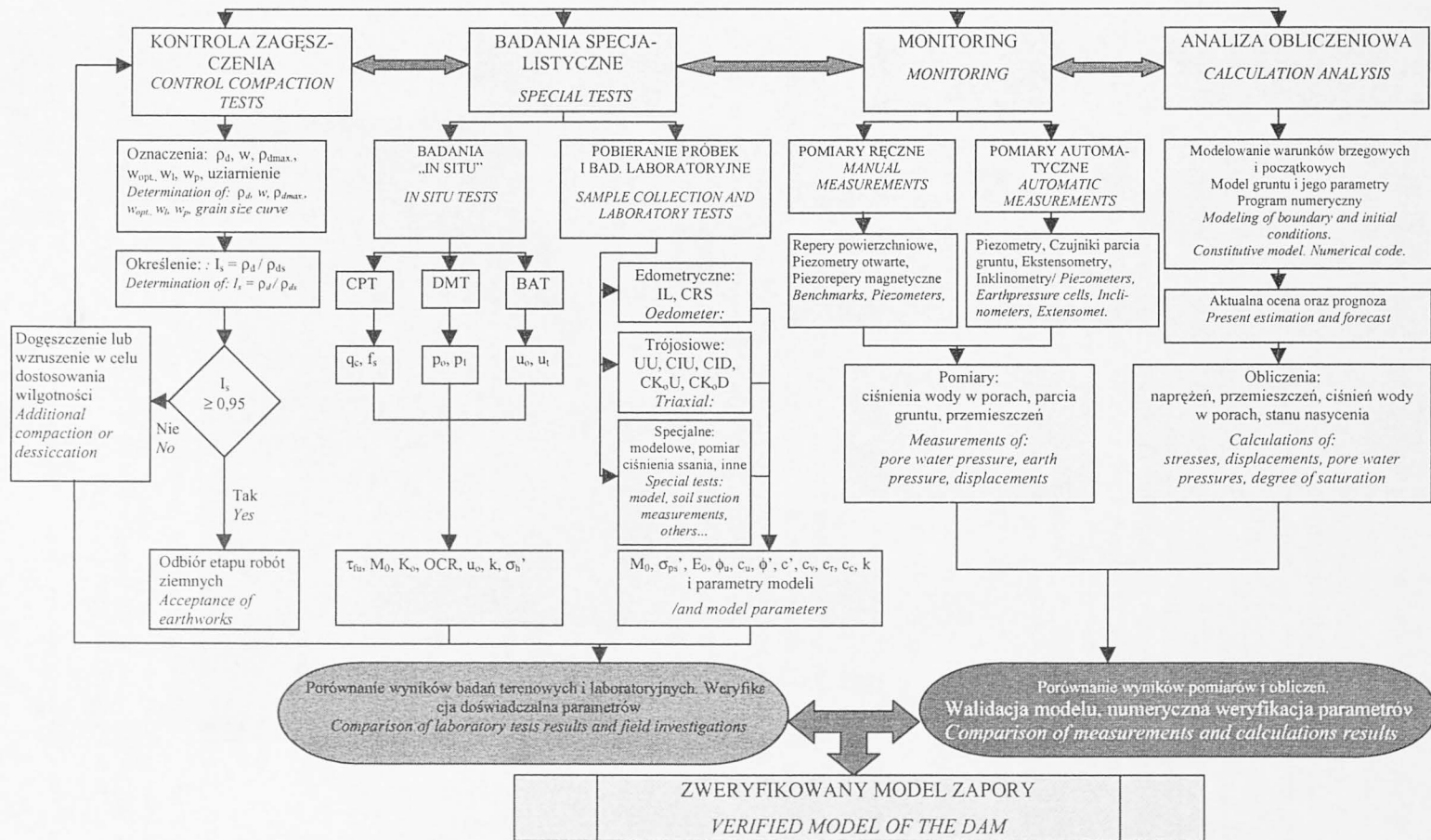
W uzupełnieniu standardowych badań kontrolnych zagęszczenia proponowana procedura przewiduje wykonywanie badań specjalistycznych, obejmujących badania in situ, jak również badania laboratoryjne. Badania tego typu nie były dotychczas stosowane w kontroli jakości wbudowanego w zapórę gruntu, z wyłączeniem sytuacji ekstremalnych (obserwowanych uszkodzeń, awarii).

W początkowym okresie budowy od miąższości rdzenia około 1,5 m wykonuje się wykopy badawcze, w których przeprowadza się badania ścian wykopów (penetrometrem kieszonkowym i ścinarką) oraz pobiera próbki blokowe do badań laboratoryjnych.

Następnie, kiedy rdzeń osiągnie wysokość 12–15 m, wykonuje się sondowania CPT i DMT przez całą jego miąższość. Na podstawie sondowań typuje się miejsca, w których wykonuje się wiercenia w celu pobrania próbek gruntu o nienaruszonej strukturze NNS. W dalszych etapach, po osiągnięciu wysokości 25–30 m, chcąc wykonać sondowania CPT lub DMT przez całą miąższość rdzenia, stosuje się cięższy sprzęt geotechniczny, sondy o nacisku 20–30 T.

Na podstawie sondowań oraz analizy wyników badań standardowej kontroli zagęszczenia typowane są miejsca „wątpliwe”, w których uzyskanie wymaganego wskaźnika było trudne bądź parametry sondowań odbiegają od pozostałych, z których pobiera się próbki gruntu NNS do badań laboratoryjnych.

W badaniach laboratoryjnych wykonywanych na próbkach pobranych z rdzenia zapory odtwarzany jest stan naprężenia określony za pomocą sondowań, stąd np. badania trójosiowe wykonywane są metodami  $CK_0U$  i  $CK_0D$ . Aby jak najlepiej odwzorować rzeczywisty stan naprężenia, przyjmowane są różne ścieżki obciążenia. Stosowanie nowoczesnych komór z tłokiem, zapewniającym dobry kontakt z próbką, pozwoliło też na określenie modułów odkształcenia w zakresie bardzo małych odkształceń (0,1%), co do tej pory było praktycznie niemożliwe. Badania ściśliwości wykonywano głównie w konsolidometrach metodą stałej prędkości odkształcenia (CRS). Stosowanie tej metody znacznie przyspiesza badanie oraz eliminuje wpływ czynników zewnętrznych na wyniki badań (np. zmiany temperatury).



Rys. 4. Schemat blokowy (algorytm) proponowanej procedury badawczej i metody weryfikacji parametrów

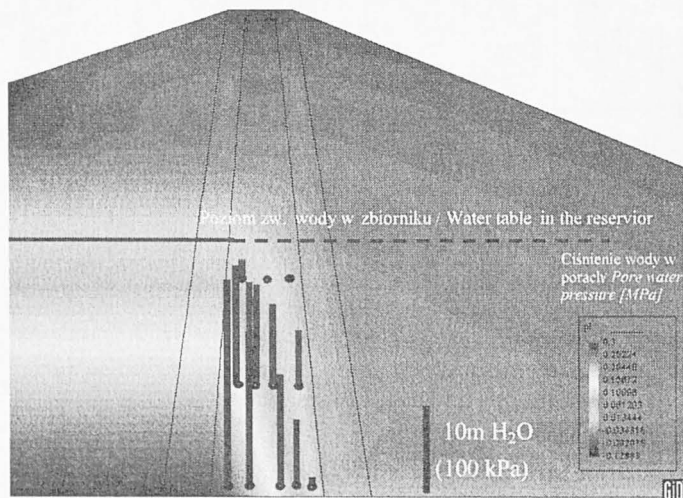
Fig. 4. Flow chart of the proposed method of geotechnical parameters verification

Proponowana metoda oprócz badań geotechnicznych, standardowej kontroli zagęszczenia i badań specjalistycznych przewiduje prowadzenie obserwacji i wykonywanie pomiarów za pomocą aparatury kontrolno-pomiarowej (akp) sukcesywnie instalowanej w rdzeniu zapory. Wskazania akp porównywane są z wynikami obliczeń numerycznych naprężeń, przemieszczeń oraz ciśnienia wody w porach.

Do obliczeń numerycznych przyjmuje się parametry określone na podstawie prowadzonych badań dodatkowych *in situ* i laboratoryjnych. Profile sondowań pozwalają ocenić jednorodność (monolityczność) rdzenia, tzn. zbadać, czy w rdzeniu nie występują szczeliny, rozwarstwienia oraz zlokalizować ewentualne „słabsze” strefy. Dla wydzielonych stref rdzenia przyjmowane są odpowiednie parametry geotechniczne, a następnie przeprowadza się obliczenia numeryczne. Poprawność przyjętych parametrów weryfikowana jest poprzez porównanie wyników obliczeń z wynikami wskazań akp. W przypadku rozbieżności poszukiwane jest źródło błędu (dodatkowe badania laboratoryjne oraz przyjęcie innych modeli konstytutywnych gruntu).

## PODSUMOWANIE

Zweryfikowane za pomocą proponowanej metody parametry pozwoliły na wiarygodną ocenę stanu technicznego zapory oraz właściwą interpretację wyników pomiarów aparaturą kontrolno-pomiarową zainstalowaną w zaporze. Przykład porównania wyników obliczeń ciśnienia wody w porach na podstawie zweryfikowanych parametrów z wynikami pomiarów aparaturą kontrolno-pomiarową przedstawiono na rysunku 5. Zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów wartości ciśnienia wody w porach potwierdza zarówno poprawne określenie parametrów hydraulicznych rdzenia, jak również zastosowanie odpowiedniego programu numerycznego i modelu obliczeniowego.



Rys. 5. Porównanie obliczonych programem CODE\_BRIGHT i pomierzonych aparaturą kontrolno-pomiarową ciśnień wody w porach (piętrzenie 30 m – przekrój pomiarowy 3-3)

Fig. 5. Comparison of calculated (using CODE\_BRIGHT program) and measured values of the pore water pressure within the core (water level 30 m – cross section 3-3)



Opracowanie prognozy opartej na parametrach ustalonych na podstawie badań in situ, a następnie porównanie tej prognozy z modelem fizycznym w skali 1 : 1, tj. rdzeniem zapory wyposażonym w aparaturę kontrolno-pomiarową, z jednej strony pozwala na właściwą walidację przyjętego modelu gruntu, z drugiej zaś strony zwiększa jej wiarygodność.

Rezultatem prac prowadzonych w ramach proponowanej metody jest opracowany zweryfikowany model zapory. Dalsze obserwacje i wyniki monitoringu pozwolą na wykonanie analiz statystycznych długich ciągów danych, które mogą mieć istotne znaczenie dla bezpieczeństwa zapory (Di Biagio 2000, Höeg 2001).

## PIŚMIENNICTWO

- Anagnosti P., 1979. Design parameters for fills. VII ECSMFE, Brighton.
- Barański T., Król P., Skutnik Z., Wolski W., 1995: Kompleksowe badania jakości rdzenia zapór Czorsztyn i Klimkówka. Sympozjum „Zagadnienia konstrukcyjno-budowlane zapór Czorsztyn i Klimkówka”, Czorsztyn – Klimkówka.
- Barański T., Król P., Skutnik Z., Wolski W., 1997. Determination of „during construction characteristics” of embankment dam clay cores. XIX ICOLD, Florence, Italy.
- Barański T., Sorbjan P., 1995. System oceny stanu i bezpieczeństwa zapory ziemnej na przykładzie zapór Czorsztyn i Klimkówka. Sympozjum „Zagadnienia konstrukcyjno-budowlane zapór Czorsztyn i Klimkówka”, Czorsztyn – Klimkówka.
- Barański T., Sorbjan P., 1997. Numeryczna weryfikacja wyników pomiarów aparatury kontrolno-pomiarowej w zaporze Czorsztyn. *Gospodarka Wodna*, 12, 420–425.
- Charles J.A., 1997. General report. Special problems associated with Earthfill dams. XIX ICOLD, Florence, GR Q.73, II, 499–519.
- Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A., 1973. Zapory ziemne. Arkady, Warszawa.
- Di Biagio E., 2000. General report. Monitoring of dams and their foundations, XX ICOLD, Beijing, GR Q.78, III, 1457–1495.
- Höeg K., 2001. Embankment – dam engineering, safety evaluation and upgrading. XV ICSMGE, Istanbul.
- Londe P., 1981. Wnioski z katastrof zapór ziemnych. *Gospodarka Wodna* 7–8, 195–202.
- Peck R.B., 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique* 19, 2, 171–187.
- Skutnik Z., 2000. Evaluation of geotechnical parameters and stress states of the clay core during construction. *Ann. Warsaw Agricult. Univ. – SGGW, Land Reclam.* 29, 63–70.
- Skutnik Z., 2002: Weryfikacja parametrów geotechnicznych rdzenia zapory nasypowej na podstawie badań prowadzonych podczas budowy. Rozprawa doktorska (maszynopis). Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Sorbjan P., 2004: Zastosowanie systemu ekspertowego do bieżącej kontroli stanu technicznego zapór ziemnych. Rozprawa doktorska (maszynopis). Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.
- Wolski W., Skutnik Z., Król P., Barański T., 1997: Parametry geotechniczne rdzenia zapory Czorsztyn – weryfikacja „podczas budowy”. *Gospodarka Wodna* 12, 414–417.
- Wolski W., Wójcicki S., Fürstenberg A., 1975: Dobór parametrów gruntu do obliczeń. Zapory ziemne i skarpy, CBS i PBW „Hydroprojekt” oraz Inst. Bud. Mel. i Roln. SGGW-AR, Warszawa.

## IMPORTANCE OF GEOTECHNICAL PARAMETERS VERIFICATION OF THE CORE IN SAFETY EVALUATION OF EMBANKMENT DAM

**Abstract.** In the paper the method of estimation and verification of the geotechnical parameters of Czorsztyn Dam clay core is presented. This procedure can be applied also for others objects like Czorsztyn Dam. The point of the proposed method is that with the progress of the earthworks, geotechnical investigations especially soundings CPT and DMT are successively introduced and performed. The main idea of this way is to cover the whole dam body and exchange the point measurements into tested profiles. The determination of shear strength parameters as well as the deformation and hydraulic parameters for in situ stress-state conditions allows estimating the performance quality of the dam properly. All records and observations gathered on the site are included in the system of safety evaluation of the dam.

**Key words:** embankment dam, clay core, geotechnical parameters, parameters verification, safety evaluation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.04.2005