

Możliwości wykorzystania modelowania MES w trakcie geodezyjnych pomiarów kontrolnych budowli piętrzących

Model numeryczny dla zapory Besko

Janina Zaczek-Peplinska*, Paweł Popielski**

Wstęp

Budowle piętrzące należą do najstarszych i największych obiektów inżynierskich na świecie zarówno pod względem rozmiarów, jak i masy. Celowość budowy takich obiektów wynika ze stale wzrastających potrzeb energetycznych oraz podstawowych zadań gospodarki wodnej makroregionu i kraju. Budowla hydrotechniczna, inżynierska, jaką jest zapora wodna wraz z urządzeniami towarzyszącymi, podlega statycznym i dynamicznym obciążeniom, których efektem jest powstawanie odkształceń i przemieszczeń elementów jej konstrukcji. Jak wynika ze statystyk, na każde 100 zapór w ciągu 100 lat dwie z nich ulegają katastrofie.

Rzeczywiste zachowanie się budowli piętrzącej można ocenić wyłącznie za pomocą specjalistycznej aparatury kontrolno-pomiarowej oraz precyzyjnych pomiarów geodezyjnych. Systematyczne pozyskiwanie, przetwarzanie i analizowanie informacji pomiarowych umożliwia stałą kontrolę charakterystyk przestrzennych oraz wyznaczanie bieżących zmian parametrów geometrycznych zapory, a w przypadku przekroczenia projektowych wartości granicznych rozpoczęcia działań mających na celu zapobiegnięcie ewentualnej katastrofie, uruchomienie systemów ostrzegawczych lub sygnalizacji alarmowej.

Opierając się na wynikach wieloletnich pomiarów kontrolnych można wy-

konać modele zachowania się konstrukcji przy zmiennych obciążeniach, nie tylko związanych ze zmianami zwierciadła wody górnej (ZWG) w zbiorniku, ale też ze zmianami podłoża wynikającymi z długookresowego dociążenia gruntu samą konstrukcją oraz budowlami towarzyszącymi.

Modelowanie metodą elementów skończonych (MES) jest dobrym narzędziem do przewidywania pracy konstrukcji zapory betonowej. Wykonywana obecnie analiza ma odpowiedzieć na pytanie czy na podstawie wyników modelowania, obejmującego m.in. zachowanie dotychczas kontrolowanych geodezyjnie punktów obiektu, będzie można przeprowadzić wstępną terenową kontrolę wyników pomiaru geodezyjnego.

Kontrola danych pomiarowych powinna następować w czasie wykonywania pomiaru (jeżeli dysponujemy sprzętem pomiarowym umożliwiającym bieżące przesyłanie, gromadzenie i analizowanie danych pomiarowych) lub bezpośrednio po zakończeniu pomiaru, zanim zespół zakończy swój pobyt na obiekcie (wstępna kontrola terenowa), aby można było od razu powtórzyć lub uzupełnić o dodatkowe elementy (kąty, odległości) wykonane już obserwacje.

Potwierdzenie zgodności wykonanych obserwacji z modelem nie może być warunkiem uznania pomiaru za wiarygodny, wszystkie niezgodności muszą być

rozpatrzone także pod kątem możliwej sytuacji awaryjnej.

Obiekt testowy – zapora Besko

Obiektem hydrotechnicznym dla którego wykonano opisane w niniejszym artykule analizy jest zapora betonowa w Besko, usytuowana na 172,8 km rzeki Wisłok. Zapora została oddana do eksploatacji w 1978 r.

Zapora ta składa się z 12 sekcji głuchych o szerokości 12 m oraz dwóch sekcji przelewowych o szerokości 15 m. Maksymalna wysokość sekcji wynosi 38,2 m, zaś maksymalna wysokość zbiornika w rejonie sekcji przelewowych 29 m. Sezonowe wahania poziomu wody wynoszą od 3 do 5 m, maksymalnie 12,3 m.

W ramach pomiarów kontrolnych dla zapory Besko są wykonywane całodobowe pomiary temperatury powietrza w otoczeniu zapory, cotygodniowe pomiary temperatur w galeriach, pomiary przemieszczeń pionowych reperów zastabilizowanych na koronie, stronie odpowietrznej i w galerii dolnej zapory, pomiary przemieszczeń celowników trygonometrycznych w górnych i dolnych partiach strony odpowietrznej zapory, pomiary punktów stałej prostej na koronie zapory, pomiary przemieszczeń względnych – szczelinomierzy, pochylomierzy i wahadeł, pomiary ciśnień w piezometrach, pomiary stanu wody w zbiorniku (ZWG), pomiary stanu wody dolnej.

Model numeryczny pracy konstrukcji wykonano dla sekcji 6. zapory.

Przygotowanie modelu pracy konstrukcji

Obliczenia numeryczne współpracy zapory betonowej i podłoża gruntowego wykonano za pomocą metody elementów skończonych. Obliczenia wykonano za pomocą pakietu programów komputerowych HYDRO-GEO [5].

HYDRO-GEO jest polskim programem wykorzystującym metodę elementów skończonych do analizy problemów geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska. Jest on rozwijany od końca lat 1970. na Politechnice Warszawskiej przy współpracy Politechniki Śląskiej i Ośrodka Technicznej Kontroli Zapór IMGW.

Oprogramowanie wykorzystuje metodę elementów skończonych w sformułowaniu przemieszczeniowym.

Obliczenia wykonano w płaskim stanie odkształcenia. Do symulacji pracy pod-

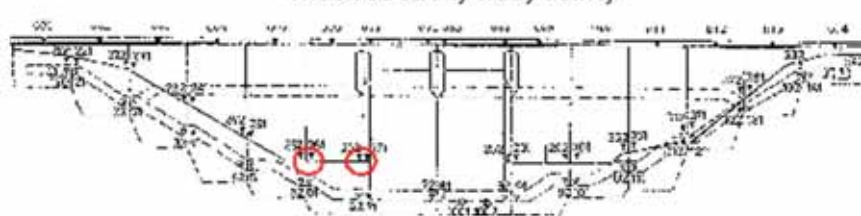
ROZMIESZCZENIE URZĄDZEŃ DO POMIARÓW KĄTOWO-LINIOWYCH.

Widok od strony wody dolnej.

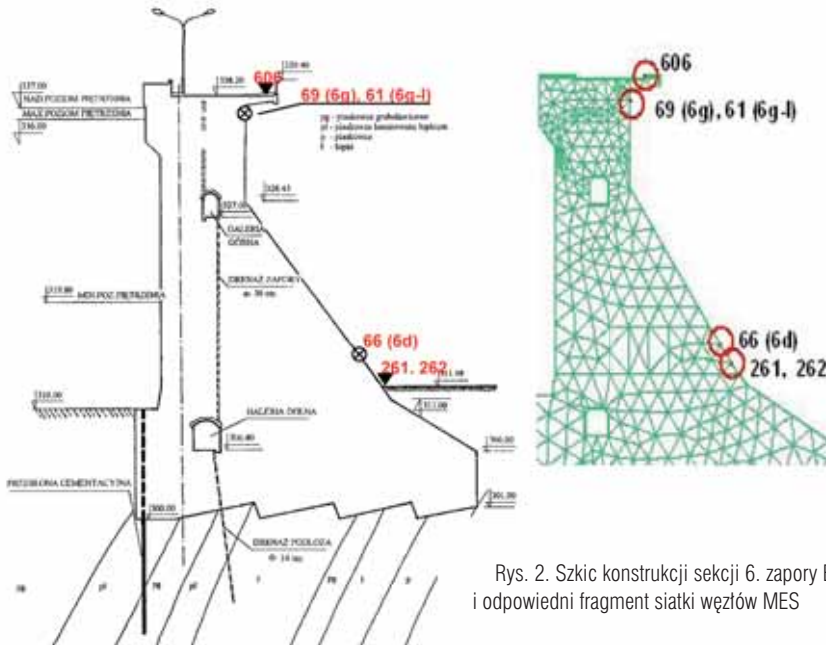


ROZMIESZCZENIE REPERÓW KONTROLOWANYCH.

Widok od strony wody dolnej.



Rys. 1. Zapora Besko – rozmieszczenie punktów kontrolowanych, kolorem czerwonym zaznaczono punkty sekcji 6.

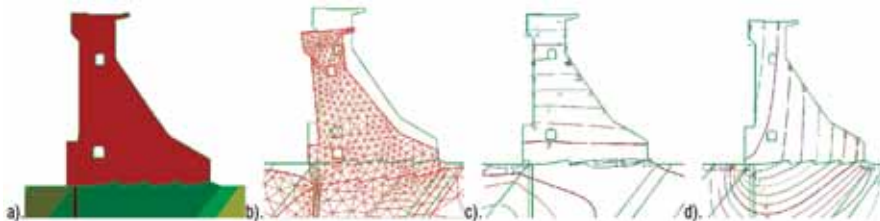


Rys. 2. Szkic konstrukcji sekcji 6. zapory Besko i odpowiedni fragment siatki węzłów MES

łoza przyjęto sprężysto-plastyczne modele ośrodka gruntowego, bazujące na warunku plastyczności Coulomba-Mohra. Stosowano prawo płynięcia, zakładając nieściśliwość materiałów w plastycznym zakresie ich pracy (tj. kąt dyatacji równy zero). W analizie numerycznej zastosowano sześciowzłowe trójkątne elementy izoparametryczne o funkcjach kształtu stopnia drugiego.

Do dyskretyzacji obszaru przyjętego do obliczeń wykorzystano narzędzia zawarte w pakiecie HYDRO-GEO. Po ustaleniu geometrii obszarów opisujących strefy materiałowe i znajdujące się w analizowanym przekroju obiekty, wygenerowano siatki elementów skończonych. Następnie wprowadzono dane dotyczące parametrów

nowej wykorzystano przekroje przez analizowane sekcje konstrukcji. Wierście odtworzono poszczególne elementy konstrukcji, takie jak: uskoki na ścianie do strony wody górnej, kształt korony, „zęby” na stopie zapory oraz układ galerii kontrolno pomiarowych i wewnętrznych pomieszczeń zapory. Na etapie przygotowania geometrii modelu uwzględniono położenie poszczególnych celowników i reperów zainstalowanych w konstrukcji. Siatka MES została wygenerowana w taki sposób, aby każdemu z punktów sieci kontrolnej na zaporze (tj. celowników, reperów i punktów „stałej prostej”) przyporządkowany był węzeł siatki MES. Siatka składa się z 2566 węzłów i zawiera 1213 elementów.



Rys. 3. Zapora Besko – model sekcji 6. (etap II): a) schemat konstrukcji i warstw podłoża, b) przemieszczenia od ciężaru konstrukcji (zbiornik suchy), c) izolinie przemieszczeń w kierunku poziomym kreślone co 0,0001 m, d) izolinie przemieszczeń w kierunku pionowym kreślone co 0,0001 m

materiałowych, warunków brzegowych, poziomów wody w zbiorniku, naprężeń początkowych.

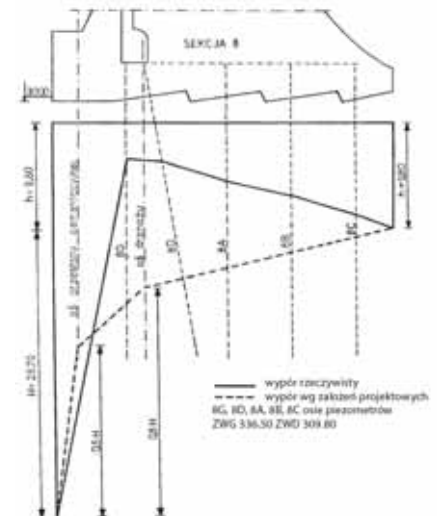
W modelu numerycznym [6] wykorzystano rozpoznanie podłoża zgodnie z dokumentacją geologiczno-inżynierską omówioną w opracowaniach [3, 4]. Odtworzono występujący w analizowanym przekroju układ i nachylenie poszczególnych warstw materiałów. Wartości parametrów materiałowych podłoża zaczerpnięto z opracowania [3]. Została wykonana analiza wstecz weryfikująca parametry materiałowe warstwy znajdującej się bezpośrednio pod stopą zapory.

Do wykonania modelu zapory beto-

stępującej w analizowanym przekroju. Uwzględniony układ warstw i poziom wody gruntowej.

II. W drugim etapie modelowano wykonanie konstrukcji zapory. Zbiornik suchy. Do modelu dołączono elementy obrazujące konstrukcję zapory. Obciążenie stanowił ciężar wykonanej konstrukcji (przyjęto γ betonu hydrotechnicznego = 22,2 kN/m³), zgodnie z [3, 4].

III. W trzecim etapie modelowano przyłożenie obciążeń wynikające z napełnienia zbiornika wodą. Przyłożono obciążenia do ściany odwodnej zapory, dna zbiornika – wartości obciążeń wynikały z rzędnią napełnienia zbiornika. Przyłożono obciążenie do przesłony przeciw filtracyjnej oraz stopy zapory. Jako rzędnią zwierciadła wody po stronie odpowietrznej przyjęto poziom wody w otwartym piezometrze PO6d znajdującym się naprzeciwko analizowanej sekcji. Wartość obciążenia na stopę zapory obrazowała rzeczywisty rozkład ciśnienia pomierzony w piezometrach zamkniętych pod stopą zapory. Przykładowe porównanie wyporu rzeczywistego i przyjętego do obliczeń projektowych do obliczeń projektowych [1] przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Przykładowe porównanie wyporu rzeczywistego i przyjętego do obliczeń projektowych

Po zakończeniu obliczeń sprawdzono zgodność uzyskanych przemieszczeń węzłów-celowników z przemieszczeniami faktycznie uzyskanymi w czasie pomiarów kontrolnych, przyjmując za pomiar wyjściowy pomiar wykonany w marcu 1997 r., za pomiar kolejny – pomiar wykonany w kwietniu 1998 r. Wyniki porównania przedstawione są w tabeli 1.

Obliczenia wykonano w trzech etapach:

I. W pierwszym etapie wygenerowano w podłożu naprężenia początkowe i ciśnienia porowe wynikające z układu warstw gruntu i poziomu wody gruntowej wy-

		WG	WD	DX 69 (6g)	DX 66 (6d)
		332,75	309,79	0,00000	0,00000
Model:	03-1997	331,59	310,00	0,00009	0,00050
	04-1998				
Geodetic survey:	03-1997	331,59	310,00	0,00010	0,00050
	04-1998				

Tab. 1. Porównanie przemieszczeń uzyskanych z MES i pomiaru geodezyjnego

Następnie przygotowano modele dla ośmiu wybranych poziomów napełnienia zbiornika. Najniższy i najwyższy poziom napełnienia zbiornika przyjęte do obliczeń odpowiadają faktycznie obserwowanym najniższemu i najwyższemu poziomowi wody w okresie ostatnich 10 lat eksploatacji obiektu.

Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono wyniki modelowania MES dla trzech wybranych stanów obiektu. Wyznaczono przemieszczenia konstrukcji [zbiornik suchy] \Rightarrow [zbiornik napełniony do przyjętego poziomu WG] w węzłach odpowiadających lokalizacji geodezyjnych punktów kontrolnych.

Analizowano przemieszczenia (dX) w kierunku wody dolnej (WD), prostopadle do osi zapory – w kierunku X lokalnego układu współrzędnych dla obiektu. Zestawienie uzyskanych wartości przemieszczeń dX dla wybranych punktów kontrolnych sekcji 6. zapory Besko zawiera tabela 2.

Kontrola pomiaru geodezyjnego

Uzyskane wyniki – wielkości modelowanych przemieszczeń, powiązane z bieżącym stanem obiektu (wstępnie duże uproszczenie: uwzględnienie tylko poziomu wody górnej WG) – wskazują na zasadność wykorzystania modelo-

wania numerycznego do wstępnej terenowej kontroli pomiaru geodezyjnego, kontroli wykonywanej w czasie wykonywania pomiaru lub bezpośrednio po jego zakończeniu. Schemat takiej kontroli przedstawia rysunek 8.

Moduł obliczeniowy (dodatkowa kontrola danych) na podstawie wcześniej wykonanych pomiarów okresowych i prognoz opracowanych na podstawie pomiarów długookresowych, warunków zewnętrznych (np. atmosferycznych), aktualnego stanu obiektu (np. poziomu wody w zbiorniku) i bieżących danych pomiarowych powinien obliczać różnice między obserwacjami aktualnie pomierzonymi i oczekiwanymi, wyznaczonymi na podstawie wielokrotnego modelowania numerycznego (program HYDRO-GEO).

Zastrzec należy, że potwierdzenie zgodności przemieszczeń punktów uzyskanych z modelowania pracy konstrukcji z przemieszczeniami punktów kontrolnych wyznaczonymi z pomiaru geodezyjnego nie może być warunkiem uznania pomiaru za prawidłowy. Przemieszczenia wyznaczonych teoretycznie i danych otrzymywanych z pomiaru geodezyjnego nie można traktować na tym samym poziomie wiarygodności. Dane niegeodezyjne powinny tu mieć tylko i wyłącznie charakter kontrolny, na poziomie wstępnego terenowego opracowania wyników pomiaru.

Wyznaczone różnice mogą wskazywać na konieczność powtórzenia pomiaru geodezyjnego (całego lub pewnych jego elementów) lub wykonanie pomiaru dodatkowych elementów i przy potwierdzeniu niezgodności zachowania obiektu z jego prognozowanym stanem – wskazywać na stan awarii konstrukcji.

Podsumowanie

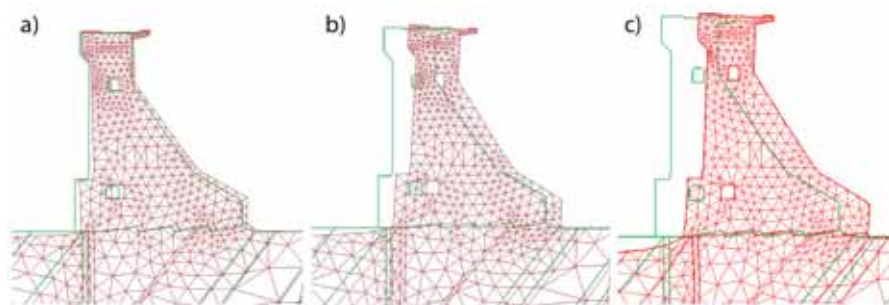
Opisane powyżej wyniki analizy są zgodne z oczekiwaniami i wskazują na możliwość wykorzystania modelowania MES w procesie terenowej kontroli pomiaru geodezyjnego. Należy zaznaczyć, że przedstawione obliczenia to dopiero początek prac mających na celu opisanie algorytmów kontrolnych oraz stworzenie modułu obliczeniowego wykorzystującego modelowanie MES.

Kolejnym etapem powinna być analiza możliwości uwzględnienia większej liczby parametrów opisujących bieżący stan konstrukcji (np. wskazań czujników niegeodezyjnych zainstalowanych w korpusie zapory). Powinny one być podstawą do wnikliwej analizy stanu naprężeń konstrukcji, uwzględniającej rozkład zmian temperatury w obiekcie i możliwe zmiany w podłożu spowodowane przez zjawiska filtracyjne.

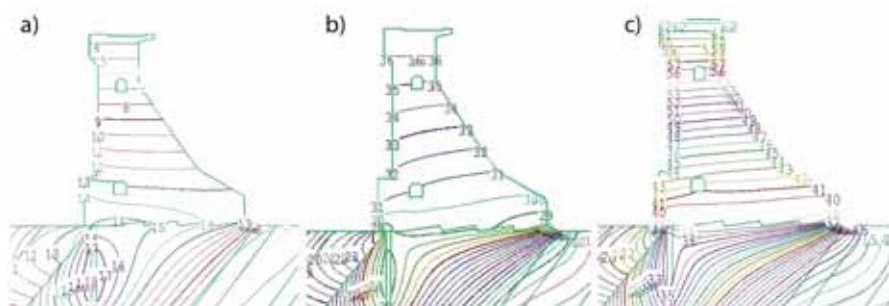
Wszystkie wstępne obliczenia, mające na celu prawidłowe „wytarowanie” modelu winny być porównane z wynikami pomiarów archiwalnych wykonanych

WG	dX 66 [m]	dX 069
336,99	0,004555	0,006233
334,50	0,003638	0,004467
332,75	0,003118	0,003534
331,59	0,002817	0,002932
329,00	0,002170	0,001897
328,00	0,001948	0,001546
326,00	0,001540	0,000936
323,42	0,001098	0,000358

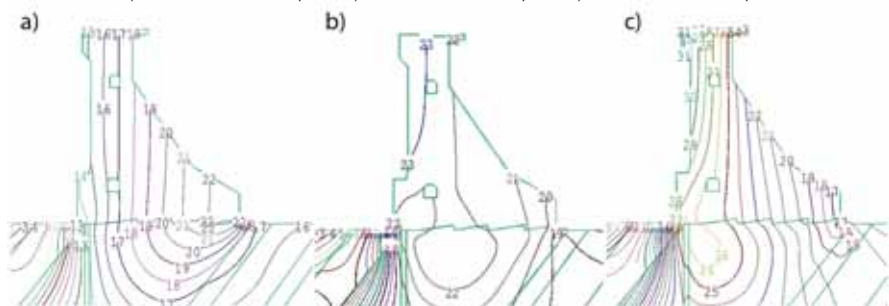
Tab. 2. Uzyskane z modelowania MES przemieszczenia punktów 66 i 69 w kierunku poziomym dla różnych stanów napełnienia zbiornika



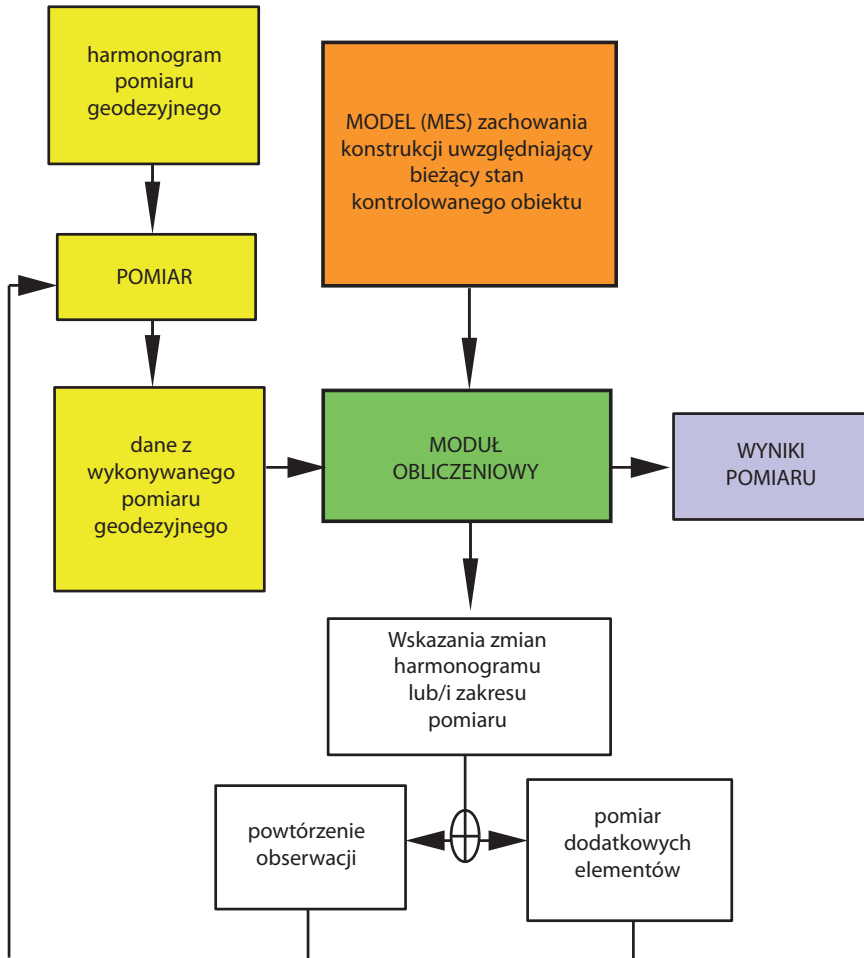
Rys. 5. Zapora Besko – model sekcji 6. (etap III), przemieszczenie konstrukcji przy napełnieniu zbiornika: a) WG = 323,42 m n.p.m., b) WG = 332,75 m n.p.m., c) WG = 336,99 m n.p.m.



Rys. 6. Zapora Besko – model sekcji 6. (etap III), izolinie przemieszczeń w kierunku poziomym kreślone co 0,0001 m: a) WG = 323,42 m n.p.m., b) WG = 332,75 m n.p.m., c) WG = 336,99 m n.p.m.



Rys. 7. Zapora Besko – model sekcji 6. (etap III), izolinie przemieszczeń w kierunku pionowym kreślone co 0,0001 m: a) WG = 323,42 m n.p.m., b) WG = 332,75 m n.p.m., c) WG = 336,99 m n.p.m.



Rys. 8. Schemat wstępnej terenowej kontroli pomiaru geodezyjnego

na badanym obiekcie. Analiza ta ma na celu uwiarygodnienie wyników modelowania numerycznego – potwierdzenie prawidłowego doboru parametrów brzegowych pracy konstrukcji oraz wykorzystania charakterystyk podłoża gruntowego zgodnych ze stanem rzeczywistym (na podstawie badań geologicznych i geotechnicznych).

Literatura

1. Beynar-Czczcott E., Reszka T.: *Interpretacja bieżących wyników badań i pomiarów kontrolnych oraz ocena stanu technicznego zapory w Besku*. IMGW – Zakład Inżynierii Wodnej. Warszawa 1981.
2. Boros-Meinike D.: *Analiza i interpretacja wyników pomiarów kontrolnych*

oraz ocena stanu technicznego i bezpieczeństwa zapory Besko za okres od X 2002 do VII 2004 roku. IMGW OTKZ. Warszawa 2004.

3. Dłużewski J., Gajewski T., Tomaszewicz A., Boros-Meinike D.: *Analiza wytrzymałościowa sekcji betonowej celem wcześniejszego wykrycia ewentualnych uszkodzeń i potwierdzenia prognozy przemieszczeń na przykładzie sekcji 8 zapory w Besku*. IMGW OTKZ. Warszawa 1995.
4. Dłużewski J., Gajewski T., Tomaszewicz A., Boros-Meinike D.: *Analiza przemieszczeniowo-wytrzymałościowa sekcji 8 zapory betonowej w Besku w celu interpretacji pomierzonych przemieszczeń*. IMGW OTKZ. Warszawa 1996.
5. Dłużewski J.: *HYDRO-GEO – program metody elementów skończonych dla geotechniki, hydrotechniki i inżynierii środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1997.
6. Popielski P., Zaczek-Peplinska J.: *Wykorzystanie modeli numerycznych w eksploatacji budowli piętrzących*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór. Stare Jabłonki 19–22 czerwca 2007.
7. Zaczek-Peplinska J.: *Omówienie wybranych wariantów modernizacji sieci kontrolnych zapór wodnych*. XII Międzynarodowa Konferencja Technicznej Kontroli Zapór. Stare Jabłonki 19–22 czerwca 2007.

* Politechnika Warszawska, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, Instytut Geodezji Gospodarczej;

e-mail: j.peplinska@gik.pw.edu.pl

** Politechnika Warszawska, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, Instytut Zaostrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego; e-mail: pawel.popielski@is.pw.edu.pl



Przedsiębiorstwo Produkcyjno-Usługowe

WYKOPY-SERWIS Sp. z o.o.

64-510 Wronki, Szklarnia 7

tel. +48 67 254 11 96 • fax +48 67 254 11 26 • e-mail: marketing@kopras.pl

www.kopras.pl

KOPRAS SHORING SYSTEMS

SPECJALIZUJEMY SIĘ W PRODUKCJI:

- PUNKTOWYCH I LINIOWYCH OBUDÓW DO ZABEZPIECZANIA WYKOPÓW - do głęb. 8,5 m
- OBUDÓW SKRZYNIOWYCH (BOKSÓW) - do głęb. 3,9 m
- OBUDÓW SŁUPOWYCH do głęb. 7,4 m
- SZALUNKÓW ALUMINIOWYCH
- SZALUNKÓW DO WYKOPÓW PUNKTOWYCH (lekkie do awarii wodociągowych)
- AGREGATÓW PRÓŻNIOWYCH DO ODWADNIANIA WYKOPÓW

Posiadamy wypożyczalnię w Warszawie, Kościerzynie i na Śląsku

