

Krzysztof Radzicki

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej

Zastosowanie termomonitoringu do detekcji przecieków oraz erozji wewnętrznej w ziemnych budowlach piętrzących

Application of the thermal monitoring to leakage and erosion processes detection in the earth hydraulic structures

Streszczenie. Erozja wewnętrzna (sufozja, przebicie hydrauliczne) stanowi najpoważniejsze zagrożenie dla ziemnych obiektów piętrzących. Właściwy monitoring tego procesu jest kluczowy dla zagwarantowania bezpieczeństwa obiektu piętrzącego oraz do minimalizacji kosztów ewentualnych napraw w przypadku rozwoju erozji. W ciągu kilku ostatnich lat obserwuje się znaczny postęp w rozwoju metod termomonitoringu, to jest metod pozwalających na identyfikację i analizę procesów filtracyjno-erozyjnych za pomocą pomiarów temperatury. Obecnie, metody te są uważane za najskuteczniejsze w zakresie wczesnej detekcji erozji wewnętrznej, w identyfikacji jej przestrzennego przebiegu oraz w określaniu stopnia jej rozwoju. W niektórych przypadkach, analiza pomiarów temperatury z korpusu obiektu pozwala nawet na obliczenie wartości prędkości filtracji.

W artykule opisujemy metody termomonitoringu ziemnych obiektów piętrzących. Po wprowadzeniu przedstawiającym podstawy termomonitoringu obiektów piętrzących, opisujemy przykładowe systemy termomonitoringu wałów i zapór oraz rezultaty analizy pomiarów temperatury. Skuteczność prezentowanych metod została potwierdzona między innymi w eksperymencie planowej katastrofy czterech wałów na skutek erozji wewnętrznej w projekcie IJkdijk zrealizowanym w Holandii.

Abstract. Internal erosion is the most serious threats for earth dams. Suitable monitoring of this process is essential to guarantee the dam safety and to minimize the costs of their eventual reparations in the case of internal erosion development. In the last few years, an intensive progress of the dams' thermal monitoring methods is observed. Nowadays, they are considered as the most efficient ones in early detection of internal erosion, in identification its spatial location and in estimation its progress. An analysis of the temperature series of data from the dam allows even for seepage parameters estimation.

In the paper, we describe the thermal monitoring methods of the earth hydraulic structures. After a introduction of the thermal monitoring basis, we present several examples of the application of monitoring systems based on the fiber optics to dyke and canal surveillance. The efficiency of the method has been validated by predicting the failures of the four dam embankments breached by piping in the Dutch IJkdijk Project

1. Wprowadzenie

Termomonitoring procesów filtracyjno erozyjnych jest dynamicznie rozwijającą się dyscypliną naukowo-techniczną w zakresie kontroli i nadzoru obiektów hydrotechnicznych. Możliwość ciągłego mierzenia temperatury na długości obiektu za pomocą światłowodów oraz powstałe w ostatnich latach zaawansowane modele analizy pomiarów temperatury przyczyniły się do rekomendacji termomonitoringu ziemnych obiektów hydrotechnicznych przez Międzynarodowy

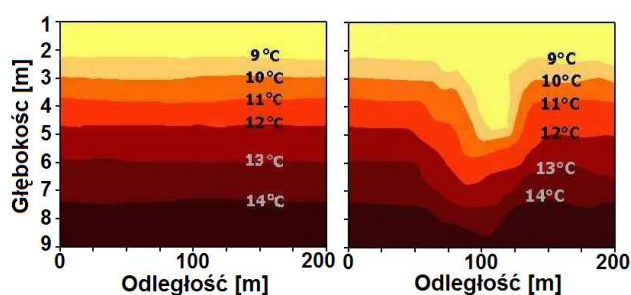
Komitet Wielkich Zapór ICOLD jako najskuteczniejszej metody w zakresie wczesnej i precyzyjnej detekcji przecieków i procesów erozyjnych [4].

W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące termomonitoringu, w tym opis relacji w sprzężonym transporcie ciepła i wody oraz wykorzystania światłowodu jako czujnika temperatury, jak również omówiono strefy instalacji systemów termomonitoringu na ziemnych obiektach hydrotechnicznych. Autor usystematyzował informacje dotyczące istniejących modeli analizy pomiarów temperatury i zakresu ich aplikacji wraz ze wskazaniem ich istotnych parametrów. Przedstawiono również przykłady zastosowania niektórych z modeli.

2. Podstawowe informacje dotyczące termomonitoringu i termodetekcji przecieków

2.1 Sprzężony transport ciepła i wody

Termiczne metody analizy przepływu wody w gruncie opierają się na relacji w procesach transportu ciepła i cieczy, które są procesami sprzężonymi. Zależności te opisuje równanie zachowania energii. Przy zerowej wartości prędkości wody występuje wyłącznie przewodzenie ciepła, które jest relatywnie wolnym procesem. W przypadku ruchu cieczy (filtracja, przeciek), wraz z masą wody transportowane jest również ciepło. Proces ten nazywa się adwekcją i jest dominujący w stosunku do przewodzenia. Ciepło ze zbiornika wraz z wodą (filtracja, przeciek) wnika w głąb korpusu obiektu i powoduje zaburzenie w istniejącym polu temperatur (Przykład, Rys. 1). W konsekwencji pomiar temperatur w korpusie i ich analiza pozwalają na identyfikację przecieków oraz monitoring procesów filtracyjnych.



Rys. 1. Przykład wpływu przecieku na rozkład temperatury w poprzecznym przekroju zapory. a) Brak przecieku. b) Zaburzenie termiczne spowodowane przeciekiem

2.2 Światłowody czujnik temperatury

Przełomem w aplikacji metod termicznych stała się możliwość zastosowania światłowodów jako czujników do pomiaru temperatury. W światłowód wprowadzany jest impuls laserowy. Światło w rdzeniu światłowodu porusza się odbijając się od płaszcza rdzenia, przy czym przy każdym odbiciu część fotonów wraca do punktu nadania impulsu jako tzw. rozproszenie wsteczne. Ponieważ prędkość światła jest wielkością stałą można obliczyć odległość, jaką przebyło światło i określić lokalizację punktu jego odbicia w światłowodzie. Analiza spektralna światła odbitego pozwala na określenie wielu parametrów punktu odbicia w tym jego temperatury [16]. Dla technologii stosowanych na obiektach hydrotechnicznych pomiar temperatury możliwy jest standartowo, co 1m długości światłowodu, pozwalając na „ciągły” na długości obiektu monitoring przecieków i procesów filtracyjnych.

Innymi zaletami światłowodowego pomiaru temperatur, jest kalibracja tylko jednego czujnika, jakim jest jeden światłowód i brak konieczności instalacji systemów złożonych z dziesiątków czy też setek czujników. Wiąże się to z minimalizacją złożoności systemu i zwiększeniem jego niezawodności. Światłowody stosowane do pomiaru temperatury na obiektach hydrotechnicznych posiadają specjalnie wzmocnione płaszcze. Umożliwia to ich łatwą instalację na budowie,

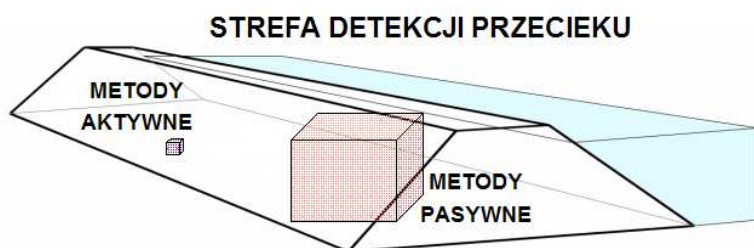
szczelność, bardzo dużą wytrzymałość oraz gwarantuje trwałość sięgającą minimum kilkudziesięciu lat [12].

2.3 Pasywny i aktywny monitoring termiczny

Wyszczególnia się termomonitoring pasywny oraz aktywny. W pasywnym termomonitoringu analizowane są naturalne temperatury obiektu. Monitoring ten nie wymaga znaczących ilości energii, umożliwiając realizację pomiarów nawet za pomocą przenośnej aparatury. W przypadku monitoringu pasywnego, temperatura w punkcie pomiaru jest kształtowana głównie przez zewnętrzne obciążenia termiczne a więc zawiera informacje o ośrodku, przez który doszedł sygnał termiczny do punktu pomiaru [12]. Pozwala to monitorować duży obszar przekroju obiektu.

W termomonitoringu aktywnym, oprócz czujnika temperatury w grunt wprowadza się również generator ciepła, którym może być rozgrzewany z wykorzystaniem oporu elektrycznego metalowy drut. Badanie dystrybucji ciepła pozwala określić prędkość filtracji opływającej kabel światłowodowy [10]. Zasięg metody aktywnej ograniczony jest do strefy dystrybucji ciepła z generatora i sięga zwykle od kilku do kilkudziesięciu centymetrów w zależności od parametrów termicznych ośrodka oraz czasu pomiaru. Pomiar aktywny generuje znaczące koszty [1], wliczając w nie między innymi większy koszt samej instalacji w tym stacji transformatorowej jak również duży koszt energii zużytej do rozgrzania drutu. Bardziej skomplikowana instalacja jest również bardziej wrażliwa na awarię.

W konsekwencji, za podstawową metodę termodetekcji i termomonitoringu należy uważać metodę pasywną. W zależności od istotności monitorowanego obiektu, jako dodatkowy można przewidzieć również monitoring aktywny.



Rys. 2. Schemat zasięgu strefy detekcji przecieku za pomocą pasywnych i aktywnych pomiarów temperatury dla pojedynczego punktu pomiarowego

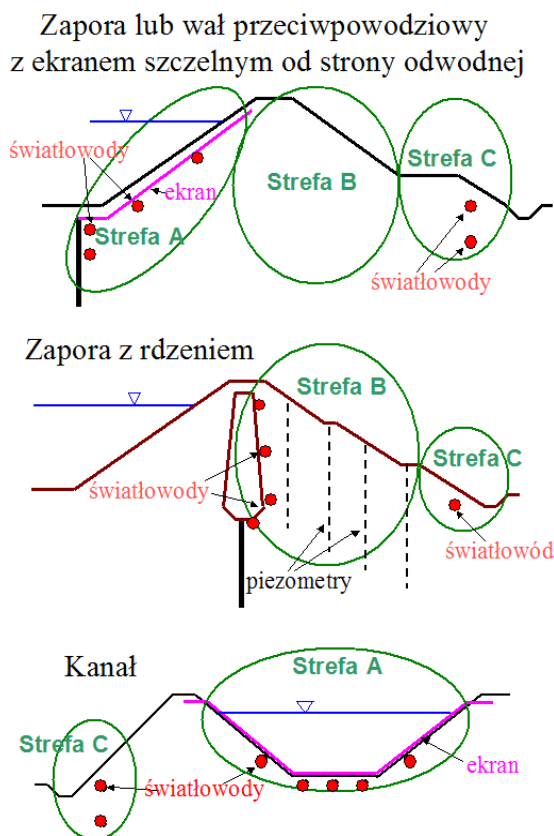
2.4 Strefy monitoringu termicznego ziemnych obiektów hydrotechnicznych

Możemy wyróżnić trzy strefy instalacji czujników temperatury w korpusie obiektu hydrotechnicznego. Nazwijmy je strefami A, B i C, znajdującymi się kolejno w części odwodnej korpusu, w jego części centralnej oraz w stopie odpowietrznej budowli.

Strefa A - monitoring tej strefy można stosować we wszystkich ziemnych obiektach piętrzących posiadających ekran po stronie odwodnej. Światłowód może być zainstalowany w strefie A podczas remontu uszczelnienia istniejącego obiektu lub budowy nowego obiektu. (Rys. 3a). Światłowód instaluje się za ekranem szczelnym na skarpie (monitoring przecieków przez ekran w głąb korpusu) oraz o ile to konieczne w podłożu, tuż za przesłoną szczelną (monitoring szczelności przesłony). Monitoring termiczny tej strefy umożliwia wczesną identyfikację minimalnego, punktowego przecieku ekranu, już rzędu 0,2 l/min/1mb [3].

Strefa B - jest centralną strefą korpusu obiektu. Jeśli w tej strefie jest element szczelny np. rdzeń to światłowód instaluje się tuż za uszczelnieniem po stronie odpowietrznej np. w filtrze odwrotnym lub drenażu. Instalacja światłowodu w tym obszarze jest możliwa wyłącznie podczas budowy obiektu lub jego przebudowy. Dla dużych zapór stosuje się monitoring w tej strefie także, jeśli element szczelny jest zlokalizowany na skarpie odwodnej.

Strefa C – usytuowana jest w odpowietrznej stopie obiektu, najlepiej w pobliżu drenażu (jeśli taki istnieje). W strefie tej następuje zwykle kumulacja przecieku. W przypadku istniejących obiektów zainstalowanie światłowodu w strefie C jest najtańszym rozwiązaniem umożliwiającym ciągły na długości monitoring obiektu, przy jednoczesnym minimalnym zakresie robót ziemnych. Termomonitoring w tej strefie umożliwia detekcję przecieku rzędu od 2l/min/1mb (wydatek przecieku mierzony od strony odwodnej) jak również oszacowanie stopnia nasilenia przecieku i ocenę dynamiki jego rozwoju [3, 13].



Rys. 3. Schematy lokalizacji światłowodów oraz stref detekcji termicznej dla różnych typów obiektów hydrotechnicznych

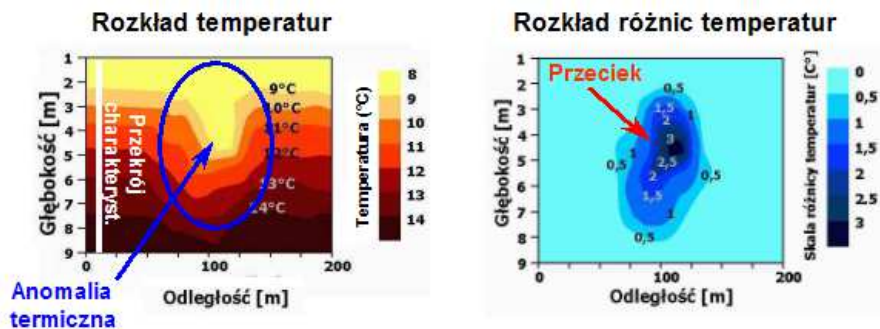
W zależności od typu obiektu hydrotechnicznego (zapora, kanał, wał przeciwpowodziowy), dostępności środków finansowych, a takżeżądanego poziomu gwarancji wczesnej identyfikacji przecieku, możliwe są różne układy systemu światłowodowego, które dostosowuje się indywidualnie do danego obiektu.

2.5 Modele analizy pasywnych pomiarów temperatury

2.5.1 Klasyczne, metody analizy pomiarów temperatury

Metody termodetekcji przecieków w zaporach ziemnych są stosowane od ponad dwudziestu lat [6]. Niemniej przez długi okres czasu ich zastosowanie było ograniczone wyłącznie do analizy strefy korpusu znajdującej się głęboko w zaporze, w której wpływ temperatury powietrza był pomijalnie mały. Jednocześnie wpływ temperatury wody oraz temperatury powietrza na temperaturę punktu pomiarowego uniemożliwiał często poprawną interpretację pomiarów. Analiza pomiarów temperatury opierała się na prostych metodach graficznych umożliwiającym porównanie wartości danych pomiarowych z różnych przekrojów obiektu, lub na porównaniu temperatur korpusu z temperaturami obliczonymi dla przypadku braku przecieku. W konsekwencji, niezaawansowane

metody analizy sygnału, ograniczały w znacznym zakresie możliwość odczytania zawartych w sygnale termicznych informacji [12].



Rys. 4. Identyfikacja lokalizacji przecieku metodą kontrastu

Ogólny podział modeli		Modele statystyczne		Modele z parametrami określającymi parametry fizyczne procesu		
Nazwa modelu	Typ obiektu	Model analizy dziennej sygnału (Daily Analysis model)	Model oddzielenia źródła sygnału (Source Separation model)	Modele analizy odpowiedzi funkcji impulsowej systemu (Impulse Response Function Analysis models)		Model amplitudy (Amplitude model)
				IRFTA	MORITO	
Min. okres pomiaru		1 dzień	2-3 miesiące		1 rok	
Zakres aplikacji	Warunki hydrauliczne	Ośrodek nasycony i nienasycony				Tylko ośrodek nasycony
	Warunki termiczne	Analiza w funkcji temperatury wody w zbiorniku oraz temperatury powietrza jak również w funkcji ewentualnych innych obciążeń termicznych.	Analiza w funkcji temperatury wody w zbiorniku oraz temperatury powietrza		Analiza wyłącznie w funkcji temperatury wody w zbiorniku; wpływ temperatury powietrza musi być zanedbywalnie mały.	
Istotna cecha modelu		Dzienna analiza pomiarów z wykorzystaniem metod analizy sygnału	Wykorzystanie metod oddzielenia źródeł sygnału.	Modelowanie pomiarów temperatury z opisem odpowiedzi systemu za pomocą funkcji odpowiedzi impulsowej.	Przybliżone rozwiązanie ściśle problemu dla filtracji w warstwie sufozycznej	
Zalety		Najszybsza metoda detekcji przecieków. Umożliwia stworzenie automatycznego systemu wczesnego ostrzegania o przecieku.	Metoda detekcji przecieków	Możliwość parametrycznego opisu sprzężonego transportu ciepła i wody w korpusie, w tym wykrywania przecieku oraz określenia nasilenia procesów filtracyjnych i ich dynamiki rozwoju. Model MORITO, w fazie wstępnego przetwarzania danych umożliwia odfiltrowanie sinusoidalnej, sezonowej rocznej zmienności temperatury	Umożliwia oszacować wartość prędkości filtracji w warstwie sufozycznej	
Przykłady aplikacji		[2]	[2], [8]	[12], [13], [1]	[2], [7]	

Rys. 5. Podział modeli analizy pomiarów pasywnych temperatury w ziemnych obiektach hydrotechnicznych

Przykładem takiej metody jest na przykład tzw. metoda kontrastu. Przykład pola temperatury uzyskanego poprzez wykonanie jednorazowego, jednoczesnego pomiaru temperatury światłowodem w osi zapory przedstawia rysunek 4a. Widać na nim anomalie w ułożeniu izoterm spowodowane przeciekiem. Porównanie pomierzonych temperatur z temperaturami przekroju charakterystycznego, dla którego zakładamy brak nasilonych procesów filtracyjnych umożliwia stworzenie pola różnic temperatury (Rys. 4b), na którym obszar największej różnicy temperatur wskazuje na największe nasilenie przecieku.

2.5.2 Zaawansowane modele analizy pomiarów temperatury

Obecnie, podstawowymi narzędziami analizy pomiarów temperatury są specjalistyczne modele opracowane w większości w ostatnim pięcioleciu. Podstawowe różnice pomiędzy nimi dotyczą, minimalnej długości ciągu pomiarów temperatury, oraz zakresu analizy rezultatów. Na rysunku 5, przedstawiono usystematyzowany podział omawianych modeli oraz ich podstawowe charakterystyki.

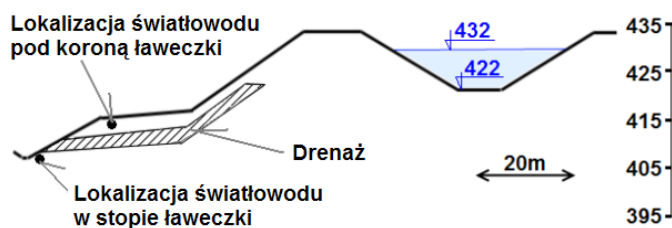
Z jednej strony, wyróżnić można modele statystyczne bazujące na metodach analizy sygnału, umożliwiające wyłącznie identyfikację miejsca przecieku. Przykładem tego typu narzędzia jest model analizy dziennej pomiarów temperatury, opracowany przez EDF, umożliwiający między innymi termomonitoring wałów przeciwpowodziowych oraz bardzo szybką detekcję przecieku. Opis testu tego modelu na holenderskim badawczym obiekcie hydrotechnicznym opisano w rozdziale 4.

Z drugiej strony, opracowano również modele, które wymagają dłuższego czasu pomiaru temperatur, ale pozwalają określić parametry procesów filtracyjnych, co jest kluczowe dla ekspertów oceniających stan zapór ziemnych i wałów kanałów. W rozdziale 3 opisano przykład aplikacji modelu IRFTA. Model ten umożliwia identyfikowanie przecieków, ale przede wszystkim pozwala na określenie nasilenia procesów filtracyjnych w zaporze oraz umożliwia oceniać ich dynamikę rozwoju.

Z kolei model amplitudy, opracowany w 1997r. [6], wymaga aż jednorocznych pomiarów temperatury oraz posiada liczne ograniczenia aplikacji szerzej opisane przez Radzicki, Opaliński [15] ale pozwala na oszacowanie prędkości filtracji w warstwie sufozycznej w zaporze ziemnej

3. Przykład analizy procesów filtracyjnych w wale kanału Oraison

Wał kanału Oraison jest jednym z licznych obiektów piętrzących we Francji opomiarowanych termometrycznie siecią światłowodową. Schematyczny przekrój wału pokazano na rysunku 6. Średnia wysokość wału wynosi 27m. Dno i ściany kanału pokryte są szczelnym ekranem z płyt betonowych. Kabel światłowodowy jest usytuowany w stopie obiektu, na długości około 1000m, następnie na długości kilkudziesięciu metrów jego położenie wznosi się. Przez kolejne około 700m kabel biegnie pod koroną odpowietrznej ławeczki.



Rys. 6. Schemat przekroju wału kanału Oraison.

Analizę pomiarów temperatury wału Oraison autor artykułu zrealizował stosując model IRFTA – *Impulse Response Function Thermal Analysis model* opracowany przez Radzicki, Bonelli [12, 13, 1] w ramach współpracy Politechniki Krakowskiej oraz Cemagrefu (Francja). W modelu tym, opisując sprzężony transport wody i ciepła funkcją Greena z zastosowaniem funkcji odpowiedzi impulsowej systemu, zakłada się, że pomierzona temperatura stanowi superpozycję odpowiedzi ośrodka porowatego korpusu obiektu piętrzącego na wpływ temperatur wody w zbiorniku i temperatury powietrza. Model IRFTA posiada cztery parametry. Dwa z nich, α_w i η_w , opisują transformacje sygnału termicznego od strony skarpy odwodnej (obciążenie ciepłem wody). Z kolei, parametry α_p i η_p określają transformacje sygnału termicznego od strony skarpy odpowietrznej (obciążenie termiczne ciepłem powietrza). Aplikacja modelu IRFTA, polega na modelowaniu ciągów pomiarów temperatury pomierzonych dla poszczególnych punktów pomiarowych na długości światłowodu. W rezultacie, dla każdego modelowania, określone zostają wartości parametrów modelu, dla których dopasowanie modelu do danych pomiarowych jest najdokładniejsze. Wykorzystanie definicji fizycznej parametrów modelu, w relacji do wartości tych parametrów umożliwi szczegółowe rozpoznanie procesów hydro-termicznych w obiekcie, w tym umożliwi określenie lokalizacji, stopnia nasilenia i dynamiki procesów filtracyjnych w tym przecieków.

Długość czasowa modelowanych serii pomiarowych z wału Oraison wynosiła 2 miesiące. Był to minimalny czas pozwalający na dopasowanie modelu do danych, przy czym uzyskane odwzorowania były bardzo dokładne. Uzyskane wartości współczynnika korelacji były bliskie jedności. W wyniku modelowania rozpoznano w obiekcie pięć stref hydrotermicznych bezpośrednio powiązanych z różnym stopniem zaawansowania procesów filtracyjnych. Analiza wartości parametrów modelu umożliwiła fizyczną interpretację przebiegu badanych procesów oraz pozwoliła określić stopień ich nasilenia. Stwierdzono brak filtracji w wale stanowiącej zagrożenie dla tego wału lub wymagającej podjęcia jakichkolwiek prac remontowych. Z braku miejsca w niniejszym artykule, nie prezentuje się szczegółowego opisu modelu IRFTA i modelowania wału kanału Oraison, zostały one przedstawione w [13, 14].

4. Ijkdijk test - przykład detekcji przecieków w wale przeciwpowodziowym

Od 2008 roku rząd holenderski realizuje cykl testów pod nazwą Ijkdijk [17] polegających na metodycznej weryfikacji metod umożliwiających detekcję i monitoring procesów filtracyjno-erozyjnych. W tym celu konstruuje się badawcze, ziemne obiekty piętrzące w rzeczywistej skali, a następnie doprowadza się do ich katastrofy poprzez wytworzenie i rozwój procesu erozyjnego.



Rys. 7. Katastrofa wału ziemnego na skutek przebicia hydraulicznego, projekt Ijkdijk (fot. Deltares)

W testach sprawdzane są metody klasyczne (ciśnienia, drenaż, przemieszczenia,) jak i geofizyczne (termiczne, elektrooporności, potencjału własnego, sejsmiczne, akustyczne). W roku 2009 przeprowadzono badania rozwoju przebicia hydraulicznego na styku korpusu wału ziemnego (wysokości 3,5m) i podłoża w warunkach zbliżonych do przejścia fali powodziowej dla wału przeciwpowodziowego. Przeprowadzono cztery testy, każdorazowo aż do katastrofy obiektu, czyli przerwania wału ziemnego (Rys. 7). Metody termiczne okazały się najskuteczniejsze w porównaniu

z innymi zastosowanymi metodami umożliwiając lokalizację przecieków i przekroju przerwania wału ze znacznym wyprzedzeniem przed momentem katastrofy. Jedynie pomiar ciśnień z czujnika zainstalowanego dokładnie w strefie przebicia umożliwił podobny zakres detekcji. Szczególnie wartościowa okazała się analiza pomiarów termicznych opracowanym przez EDF (Francja) modelem dziennej analizy sygnału. Przyjmując za czas trwania testu okres pomiędzy początkiem napełniania zbiornika a przerwaniem wału, testy trwały kolejno 4, 6, 5 oraz 5 dni, w trzech testach identyfikacja miejsca przyszłego przerwania wału nastąpiła już po pierwszym dniu pomiarów. [2,9].

6. Wnioski

Metody światłowodowego termomonitoringu procesów filtracyjnych oraz termodetekcji przecieków staną się wkrótce standardem nowoczesnych systemów kontroli technicznej ziemnych obiektów piętrzących. Potwierdza to systematycznie rosnąca liczba tych instalacji na całym świecie oraz ich rekomendacja przez Międzynarodowy Komitet Wielkich Zapór ICOLD. Na skuteczność omawianych metod złożył się równoczesny rozwój metod pomiaru temperatury oraz modeli analizy pomiarów temperatury. Podstawowymi zaletami tych metod jest wczesna detekcja przecieków, ciągły na długości obiektu monitoring oraz możliwość założenia instalacji kontroli technicznej na już istniejących obiektach w ich stopie odpowietrznej.

Bibliografia

1. Artières O., Bonelli S., Fabre J.-P., Guidoux C., Radzicki K., Royet P., Vedrenne C. *Active and passive defences against internal erosion, in Assessment of the Risk of Internal Erosion of Water Retaining Structures: Dams, Dykes and Levees*. TUM Edt, pp 235-244, 2007
2. Beck Y.L., Cunat P., Guidoux C., Artieres O., Mars J., Fry J.J. *Thermal monitoring of embankment dams by fiber optics*. Proc. 8th ICOLD European Club Dam Symposium. Innsbruck, Austria, September 22-23, pp.461- 465, 2010
3. Cunat P. *Adaptation of a controlled site for leakage detection and quantification with fiber optics*. Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, 12-14 kwiecień, Granada, Hiszpania, 2010
4. Fry J.J., Fell R. *Internal erosion of existing embankment dams and their foundations*. Draft of ICOLD bulletin presented at Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain, 2010
5. Fry J.J. *Threats caused by internal erosion on hydraulic structures and surveillance to control them*. Seminarium Zagrożenia wynikające z erozji wewnętrznej dla budowli piętrzących oraz ich monitoring i nadzór celem ich kontroli, 27 października, Politechnika Krakowska, 2010.
6. Johansson S., *Localization and quantification of water leakage in ageing embankment dams by regular temperature measurements*, 17eme Congrès des Grands Barrages, Vienna, Q.65-R.54, pp.991-1005, 1991
7. Johansson S. *Seepage monitoring in Embankment Dams*. PhD Rapport, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1997.
8. Khan A.A., Vrabie V., Mars J.I., Girard A, D'Urso G. *A source separation technique for processing of Thermometric Data From Fiber-Optic DTS Measurements for Water Leakage Identification in Dikes*. IEEE Sensors J., Vol.8, no7, pp.1118-1129, 2008
9. Koelewijn. A. *Ijkdijk Piping experiments-four large-scale field tests leading to failure by seepage erosion, instrumented with both traditional and experimental detection techniques*. Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain, 2010
10. Perzmaier S., Straßer K.H., Strobl T., Aufleger M. *Integral seepage monitoring on open channel embankment dams by the DFOT heat pulse method*. 74th Annual Meeting, Int. Comm. On Large Dams, Barcelona, Spain, 2006
11. Pinette P., Guidoux C., Artieres O., Khan A.A., Beck Y.L., Courivaud J.R. Fry J.J. *Return on experience from the 2009 Ijkdijk piping tests : early detection of Internal Erosion precursors with Fiber Optics Early Warning Systems*, Presentation at the Workshop of European Working Group in Internal Erosion of ICOLD, Granada, Spain, 2010
12. Radzicki K. *Analyse retard des mesures de températures dans les digues avec application à la détection de fuites (Zastosowanie analizy odpowiedzi opóźnionej w pomiarach temperatury ziemnych obiektów hydrotechnicznych do identyfikacji przecieków)*, Praca doktorska, AgroParisTech (Paryż), 2009
13. Radzicki K. Bonelli S. *Thermical seepage monitoring in the earth dams with Impulse Response Function Analysis model*, 8h ICOLD European Club Symposium, 22-25 september, pp. 649-654, Innsbruck, Austria, 2010
14. Radzicki K., Bonelli S. *Lokalizacja procesów filtracyjnych oraz określenie stopnia ich nasilenia za pomocą analizy modelem IRFTA światłowodowych pomiarów temperatury*, materiały pokonferencyjne, XXII Konferencja Naukowa – Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych, Korbielów, 2010
15. Radzicki K., Opaliński P. *Weryfikacja aplikacji modelu amplitudy do określania prędkości filtracji w zaporze ziemnej na podstawie analizy pomiarów temperatury*, XXIII onferencja Naukowa – Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych, 28 luty – 3 marca, Korbielów, 2011

16. Vogel L. B., Cassens C., Graupner A., Trostel A. *Leakage detection systems by using distributed fiber optical temperature measurements*. Proc. SPIE Smart Structures and Materials 2001, vol. 4328, pp. 23–34, 2001.
17. IJkdijk-Piping (2009). Leaflet available on the website www.ijkdijk.eu, 4p.

dr inż. Krzysztof Radzicki

Politechnika Krakowska,

Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej,

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Tel: +48 12 628 28 53, email: radzicki@hotmail.fr