

Wojciech Kilian

WSPÓŁCZESNE METODY DIAGNOSTYKI MASYWNYCH KONSTRUKCJI BETONOWYCH

MODERN TESTING TECHNIQUES FOR NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF CONCRETE QUALITY IN MASSIVE STRUCTURES. LITERATURE SURVEY

Streszczenie

Konstrukcje masywne ze względu na swą specyfikę oraz ze względu na zjawiska związane z hydratacją cementu, twardnieniem i dojrzewaniem betonu cementowego, stanowią szczególną grupę wśród wszystkich konstrukcji betonowych. Proces projektowania, wznoszenia i monitorowania pracy tego rodzaju konstrukcji musi być czymś więcej niż tylko ekstrapolacją metod stosowanych w odniesieniu do „zwykłych” konstrukcji betonowych. Rozwój technologii materiałowej, technik pomiarowych i metod analizy informacji sprawia, że niezależnie od wciąż użytecznych w pewnym zakresie tradycyjnych narzędzi kontroli i diagnozowania stanu konstrukcji masywnych, pojawiają się i rozwijają nowe metody pomiarowe, pozwalające na dokładniejsze i szybsze rozpoznanie oraz ocenę zjawisk zachodzących także we wnętrzu masywu betonowego. Artykuł prezentuje zastosowanie wybranych metod diagnostycznych na podstawie aktualnej literatury światowej z okresu ostatnich kilkunastu lat.

Słowa kluczowe: betonowe konstrukcje masywne, diagnostyka konstrukcji, metody nieniszczące, trwałość betonu

Summary

Massive concrete structures form a specific group among the whole category of concrete structures, which require a separate approach to design, construction and control processes. Continuous progress in material science and technology, measurement devices and techniques, numerical modelling and computation and, last but not least, data analysis stimulates development of new diagnostic methods, that correspond well to the needs of massive concrete structures evaluation. These new methods allow determination of state of concrete on the structure

surface as well as inside the structure. The paper presents a literature survey of described cases of massive concrete structures evaluation from several past years.

Key words: *massive concrete structures, structure evaluation, non-destructive evaluation, durability of concrete*

WSTĘP

Specyfika masywnych konstrukcji betonowych oraz obiektów hydrotechnicznych została już wyczerpująco scharakteryzowana [Wolski i in. 2002; Kiernożycki 2003; Kilian 2003]. Beton w tego typu konstrukcjach narażony jest na wiele czynników, które nie występują z reguły w typowych elementach betonowych o niewielkim przekroju i zlokalizowanych w normalnym środowisku. Czynniki te mogą prowadzić do przyspieszonego zużycia konstrukcji. Należy tu wymienić, w kolejności chronologicznej, w betonie młodym: osiadanie mieszanki betonowej, skurcz plastyczny, naprężenia pochodzące od zróżnicowania wilgotności i temperatury w twardniejącej mieszance betonowej oraz od zmian temperatury i wilgotności w otoczeniu. W dojrzałym betonie czynnikami tymi mogą być: naprężenia wywołane zmianą temperatury oraz skurczem betonu, nierównomierne osiadanie podłoża, ruchy tektoniczne i sejsmiczne podłoża, zmiany wysokości piętrzenia wody, zmiany parametrów podłoża gruntowego oraz wiele oddziaływań następujących w trakcie eksploatacji obiektu, jak: agresja chemiczna wód powierzchniowych, gruntowych lub opadowych, ruch wody, parcie wody, parcie lodu, ciśnienie wywierane przez wodę zamarzającą w kapilarach masywu betonowego, transport masy wewnątrz materiału, dyfuzja zawartego w powietrzu CO₂, zmiany temperatury, szok termiczny, wilgotność powietrza, mgła lub mgła solna w rejonach nadmorskich, opady atmosferyczne, czynniki powodujące ścieranie i kawitację, mikroorganizmy, rośliny, zwierzęta, nadmierne lub zmienne obciążenia użytkowe. Należy też liczyć się z wystąpieniem reakcji pomiędzy składnikami betonu lub związkami rozpuszczonymi w wodzie, np. pomiędzy alkaliowymi zawartymi w cemencie a kruszywem.

Łączne działanie wymienionych czynników powoduje zazwyczaj w okresie kilku do kilkunastu lat wystąpienie pierwszych oznak uszkodzenia materiału lub konstrukcji. Mogą nimi być zarysowania masywu betonowego, zwiększona filtracja lub wystąpienie przecieków w korpusie konstrukcji, destrukcja powierzchniowa betonu, nadmierne odkształcenia konstrukcji i inne objawy. Podkreślenia wymaga fakt, że niezależnie od trudnych warunków wykonywania i eksploatacji konstrukcji masywnych mają one zwykle duże znaczenie dla bezpieczeństwa otoczenia, jak również silnie wpływają na otoczenie. Stąd wynika potrzeba dokładnego i bieżącego rozpoznania stanu konstrukcji w powiązaniu ze stanem oraz zjawiskami zachodzącymi w jej otoczeniu.

Autor w tym artykule zajmuje się jednym z aspektów kontroli stanu technicznego betonowych konstrukcji masywnych, a mianowicie nieniszczącymi metodami diagnostycznymi, pozwalającymi określić kondycję betonu w warunkach jednostronnego dostępu do konstrukcji, której grubość wynosi kilka, kilkanaście lub nawet kilkadziesiąt metrów. Autor dokonał przeglądu literatury dotyczącej diagnostyki betonowych konstrukcji masywnych (głównie betonowych zapór) i zagadnień pokrewnych z okresu ostatnich około dziesięciu lat. Zamierzeniem autora było zweryfikowanie, na podstawie wybranych doniesień, praktycznych możliwości zastosowania wymienionych metod, a także próba syntezy informacji na temat ich ograniczeń i uwarunkowań.

METODY BADANIA BETONU DOJRZAŁEGO

Wśród metod badania betonu dojrzałego można wyróżnić trzy grupy. Metody niszczące polegają w ogólności na obciążaniu aż do zniszczenia próbek betonu celowo przygotowanych lub pobranych z konstrukcji, najczęściej w postaci odwiertów cylindrycznych o różnej średnicy i długości. Ograniczeniami wpływającymi na wiarygodność wyników uzyskanych za pomocą metod niszczących w odniesieniu do konstrukcji masywnych mogą być m.in. inne warunki dojrzewania betonu w konstrukcji w porównaniu do próbki o niewielkich wymiarach, niewielka ze względów technologicznych długość odwiertów, wynosząca w praktyce kilkadziesiąt centymetrów do kilku metrów [Shayan, Grimstad 2006], konieczność ingerencji w konstrukcję, połączona niekiedy z ryzykiem jej uszkodzenia lub osłabienia. Uzyskane wyniki pomiarów obarczone są przypadkowością, związaną z miejscem poboru próbki. Zwiększenie wiarygodności badania jest związane z koniecznością uzyskania większej ilości próbek.

Metody mało niszczące, z których najbardziej znane są metody Lock-Test, Capo-Test i Pull-off, polegają na określaniu parametrów betonu na podstawie próby wyrywania lub odrywania zakotwionego lub przyklejonego elementu z przypowierzchniowych warstw konstrukcji [Gromysz i in. 2002], a uzyskane wyniki można odnieść jedynie do tychże powierzchniowych warstw. Dlatego też nie są one przydatne w diagnostyce konstrukcji masywnych.

Trzecią grupę stanowią metody nieniszczące, w tym: sklerometryczne (np. test młotkiem Schmidta), ultradźwiękowe, sejsmiczne (wykorzystujące uderzenie jako czynnik wyzwalający drgania, np. Impact-Echo, Miniature Seismic Reflection), radarowe (Ground Penetrating Radar [Karastathis i in. 2002]), tomografia akustyczna i radarowa. Z wymienionych w tej grupie, tylko niektóre metody pozwalają uzyskać informacje o stanie głębiej położonych warstw konstrukcji i te właśnie metody ujęto w dalszym zestawieniu.

PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE WYBRANYCH METOD

W tabeli 1 scharakteryzowano poszczególne analizowane przypadki, w których efektywnie zdiagnozowano stan betonowych konstrukcji masywnych, używając opisywanych metod. Zestawienie ma charakter porównawczy. Cechy poszczególnych metod ujęto w pięć kategorii wymienionych w wierszu nagłówkowym tabeli 1.

Wśród wybranych doniesień znajdują się także takie, które nie dotyczą bezpośrednio badania betonu w konstrukcji, lecz pozwalają na bardziej precyzyjne i wieloparametrowe modelowanie jego zachowania w trakcie projektowania lub kontroli stanu obiektu. Najczęściej wykorzystuje się w tym celu Metodę Elementów Skończonych, zakładając rozmaite modele konstytutywne betonu, a także coraz bardziej zaawansowane rodzaje elementów, uwzględniające zagadnienia kontaktowe, z możliwością adaptacji siatki elementów skończonych do pojawiających się w konstrukcji nieciągłości materiału. Do opisu filtracji i transmisji ciepła w masywie betonowym, obok Metody Elementów Skończonych, stosuje się także Metodę Różnic Skończonych.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że wraz z rozwojem możliwości obliczeniowych coraz większe znaczenie uzyskują zaawansowane metody analizy danych otrzymywanych z pomiarów różnymi metodami [Wei-Du 1992; Haskins, Alexander 1995]. Pozwala to na znaczne poszerzenie efektu prowadzonych badań, identyfikację parametryczną zachodzących w konstrukcji zjawisk i poprawę czytelności wyników, prezentowanych w zaawansowanej formie graficznej.

WNIOSKI

Z przedstawionego przeglądu opisanych w literaturze przypadków diagnostyki betonowych konstrukcji masywnych wynika, że istnieje obecnie możliwość względnie precyzyjnego rozpoznania stanu masywnych konstrukcji betonowych, zarówno w odniesieniu do materiału, jak i do samej konstrukcji. Stosowane urządzenia pomiarowe mają jednak w większości przypadków charakter unikalny lub prototypowy. Z analizy źródeł wynika, że techniki i algorytmy analizy danych pomiarowych odgrywają aktualnie równie dużą, jeśli nie większą rolę, co sam sprzęt pomiarowy i metoda pomiaru. Dzięki temu i pomimo, że stosowane obecnie metody diagnostyczne wykorzystują od wielu lat te same podstawowe zjawiska i związki fizyczne, to precyzja, zakres i forma uzyskiwanych wyników jest daleko bardziej zaawansowana, a dzięki temu łatwiejsza jest ich analiza i aplikacja. Postęp w dziedzinie modelowania i obliczeń numerycznych sprawia, że modele konstrukcji coraz lepiej opisują obiekty rzeczywiste, tym samym rośnie rola numerycznej symulacji zachowania konstrukcji w stosunku do badań *in situ*. Szczególne korzyści można osiągnąć,

Tabela 1. Zestawienie przypadków zastosowania nieniszczących metod diagnostyki konstrukcji masywnych na podstawie wykazu literatury
Table 1. Statement of application cases of nondestructive test methods on massive structures, based on the bibliography

Nr No	Potrzeba Demand	Metoda Applied method	Narzędzia Tools	Wymagane dane Required data	Uzyskane efekty Obtained results
[Fedele i in. 2006]	modelowanie zachowania i parametrów betonu i lokalizacja i analiza uszkodzeń	MES (3D) – analiza odwrotna – identyfikacja parametryczna	oprogramowanie (sieć neuronowa)	informacje o przemieszczeniach konstrukcji	identyfikacja parametrów fizycznych materiału i konstrukcji
[Ballim 2004]	prognozowanie zmian temperatury w dojrzewającym betonie	MRS (2D)	– komercyjny arkusz kalkulacyjny – kalorymtr adiabatyczny	wyniki pomiarów emisji ciepła w kalorymtrze adiabatycznym	– określenie zmian temperatury w konstrukcji – doświadczalna weryfikacja wyników symulacji
[Malla, Wieland 1999; Léger i in. 1996]	rozpoznanie przyczyn zarysowania korpusu zapory i filara przelewu	MES (3D) – analiza termiczna	oprogramowanie	– dane obserwacyjne – wartości przemieszczeń korony – zapory	określono, że deformacje konstrukcji wynikają ze zwiększenia objętości betonu wskutek AAR
[Xie, Chen 2005]	określenie cech warstwy nieprzepuszczalnej w zaporzach wykonanej z betonu walcowanego (<i>roller compacted concrete</i>)	MES (3D) z siatką adaptacyjną	oprogramowanie	– temperatura początkowa – ciepło właściwe – współczynnik przewodności cieplnej	określenie zmian temperatury w czasie dla różnych wariantów warstwy szczelnej i składu betonu
[Araújo, Awruch 1998]	ocena ryzyka zarysowania korpusu zapory w fazie wznoszenia	MES (2D)	oprogramowanie	parametry termiczne medium i procesu	określenie współczynników prawdopodobieństwa zarysowania

Nr No	Potrzeba Demand	Metoda Applied method	Narzędzia Tools	Wymagane dane Required data	Uzyskane efekty Obtained results
[Fatima, Leger 2006]	ocena bezpieczeństwa zapór zarysowanych oddziaływaniem sejsmicznym	nieliniowa MES, model sztywnych bloków z płaszczyzną poslizgową	oprogramowanie do analizy dynamicznej	odpowiedź dynamiczna konstrukcji w postaci akceleroграмów	akceleroграмы określone dla konstrukcji niezarysowanych konstrukcji zarysowanych
[Léger, Leger 1996]	określenie krytycznej postaci wymuszenia dynamicznego dla zarysowania masywu betonowego	MES (2D)	oprogramowanie do analizy dynamicznej	historyczne i symulowane drgania sejsmiczne	określono scenariusze zniszczenia w zależności od postaci wymuszenia
[Sortis De, Paoliani i in. 2007]	identyfikacja strukturalna zjawisk zachodzących w masywie betonowym	MES (2D i 3D) – analiza statystyczna	indywidualnie opracowane oprogramowanie	– przemieszczenia korony zapory – dane dotyczące środowiska	wykazano przewagę identyfikacji strukturalnej nad analizą statystyczną
[Rhim 2000]	ocena możliwości wykorzystania radaru do diagnostyki masywu betonowego	radar 3,4–5,8 GHz	oprogramowanie do analizy danych pomiarowych i wizualizacji	zmiany stałej dielektrycznej betonu na grubości elementu	wykazano praktyczną przydatność radaru do określania jakości betonu w masywie betonowym
[Hassani i in. 1997]	ocena jakości i ciągliwości strukturalnej betonu w masywie konstrukcji	MSR (Miniature Seismic Reflection)	dedykowane oprzyrządowanie	– wartość energii wzbudzenia – informacje o częstotliwości i fazie fali odbitej	potwierdzenie przydatności metody, badania wykonano na próbkach laboratoryjnych i zweryfikowano na obiekcie
[Davis 2003]	kontrola ciągliwości strukturalnej betonu w różnych konstrukcjach	IR (Impulse Response Test)	dedykowane oprzyrządowanie, oprogramowanie do analizy danych (FFT)	– wartość energii wzbudzenia – energia odpowiedzi układu z odbiornika	przydatność metody potwierdzona w praktyce, w zastosowaniu do konstrukcji masywnych, płytowych, słupowych, pali, itp.

Nr No	Potrzeba Demand	Metoda Applied method	Narzędzia Tools	Wymagane dane Required data	Uzyskane efekty Obtained results
[Ardito, Cocchetti 2006]	ocena parametrów strukturalnych masywu betonowego pod obciążeniem statycznym za pomocą radaru	– Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) – analiza odwrotna i identyfikacja parametryczna – MES	zaawansowana analiza danych pomiarowych	wartości przemieszczeń wywołanych obciążeniem statycznym	– określenie przestrzennego rozkładu modułu sprężystości podłużnej – wykazanie zalet badania statycznego w stosunku do ekscytacji dynamicznej
[Karastathis i in. 2002]	kontrola jakości betonu w celu wykrycia osłabionych obszarów w konstrukcji zapory Maraton w Grecji po silnym wstrząsie sejsmicznym	– badania geoelektryczne – sejsmiczne rozpoznanie dynamicznych cech materiału zapory – GPR do lokalizacji anomalii strukturalnych	– dedykowane oprogramowanie	– dane obserwacyjne – wyniki pomiarów otrzymanych przy użyciu poszczególnych metod	– wykonano inspekcję zapory i podłoża – zlokalizowano anomalie – udowodniono przydatność metod geotechnicznych do badania masywów betonowych.
[Bond i in. 2000; Kepler i in. 2000]	lokalizacja defektów struktury i innych anomalii wewnątrz masywu betonowego zapory grawitacyjnej	Acoustic Travel Time Tomography (ATTT)	dedykowane oprogramowanie	dane pomiarowe o czasie przejścia fali akustycznej zbierane przez zestaw przetworników	– uzyskanie obrazu struktury wewnątrz masywu – uzyskanie informacji o przestrzennej dystrybucji modułu sprężystości podłużnej

Skróty zastosowane w tabeli 1.: MES – Metoda Elementów Skończonych; MRS – Metoda Różnic Skończonych; 2D, 3D – model 2-, 3-wymiarowy; ATTT – Tomografia Akustyczna Czasu Przejścia; GPR – radar penetrujący podłoże; DinSAR – interferometryczny różnicowy radar o sztucznej aperturze; MSR – odbicie sejsmiczne o niewielkiej energii; IR Test – test reakcji na udar; Nr – pozycja w spisie literatury
Abbreviations used in Table 1: MES – Finite Element Method; MRS – Finite Difference Method; 2D, 3D – 2- or 3-dimensional model; ATTT – Acoustic Travel Time Tomography; GPR – Ground Penetrating Radar; DinSAR – Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar; MSR – Miniature Seismic Reflection; IR Test – Impact Response Test; No – number in the bibliography

stosując w diagnostyce równolegle różne metody. Pozwala to także na częściową weryfikację wyników uzyskanych za pomocą każdej z nich, a tym samym zwiększenie wiarygodności badania. Istnieje korzystna tendencja do łączenia istniejących narzędzi w systemy, co tworzy nową jakość kontroli i zarządzania obiektem. Rozwój technologii instrumentacji, pomiarów, akwizycji danych i ich transmisji umożliwia obecnie tworzenie systemów rozproszonej kontroli, monitorujących pracę i stan konstrukcji w czasie rzeczywistym [Ansari 1997; Gliśić, Simon 2000; Darbre 1995].

BIBLIOGRAFIA

- Ansari F. *Fiber Optic Sensors – an emerging diagnostic tool for concrete*. Cement and Concrete Composites 19, Elsevier 1997.
- Araújo de J. M., Awruch A. M. *Cracking safety evaluation on gravity concrete dams during the construction phase*. Computers and Structures 66, Pergamon 1998.
- Ardito R., Cocchetti G. *Statistical approach to damage diagnosis of concrete dams by radar monitoring: Formulation and pseudo-experimental test*. Engineering Structures 28, Elsevier 2006.
- Ballim Z. *A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete*. CCR 26, 2004.
- Bond L. J. i in. *Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part I – theory*. Construction and Building Materials 14, Elsevier 2000.
- Darbre G. R. *Instrumentation of dams by accelographs*. Canadian Journal of Civil Engineering 22 (1), 1995.
- Davis A. G. *The nondestructive impulse response test in North America: 1985-2001*. NDT&E International 36, Elsevier 2003.
- Fatima M. B., Léger P. *Seismic stability of cracked concrete dams using rigid blocks model*. Computers and Structures 66, Pergamon 2006.
- Fedele R., Maier G., Miller B. *Health assessment of concrete dams by overall inverse analysis and neural networks*. International Journal of Fracture 137, Springer 2006.
- Glišić B., Simon N. *Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor*. Cement and Concrete Composites 22, Elsevier 2000.
- Gromysz K. I in. *Nowoczesne metody diagnostyki konstrukcji żelbetowych*. Materiały XVII Ogólnopolskiej Konferencji Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 2002.
- Haskins R., Alexander A. M. *Computer interpretation of ultrasonic pulse-echo signs for concrete dams*. NDT Abstracts, 1995.
- Hassani F. P. i in. *Application of nondestructive evaluation techniques on concrete dams*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences vol. 34, no. 3/4, Elsevier 1997.
- Karastathis V. K. i in. *Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams. Application at the Marathon Dam*. Journal of Applied Geophysics 50, Elsevier 2002.
- Kepler W. F. i in. *Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part I – application*. Construction and Building Materials 14, Elsevier 2000.
- Kiernożycki W. *Betonowe konstrukcje masywne*. Polski Cement, Kraków 2003.
- Kilian W. *Jakość betonu cementowego w budowlach hydrotechnicznych w świetle wymagań normowych*. Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu, nr 339, seria Konferencje XXXI, 2003.
- Léger P., Côté P., Tinawi R. *Finite element analysis of concrete swelling due to alkali-aggregate reactions in dam* Computers and Structures 60, Pergamon 1996.

- Léger P., Leclerc M. *Evaluation of earthquake ground motions to predict cracking response of gravity dams*. Engineering Structures vol. 18, No. 3, Elsevier 1996.
- Malla S., Wieland M. *Analysis of an arch-gravity dam with a horizontal crack*. Computers and Structures 72, Pergamon 1999.
- Materiały III Konferencji Naukowej BITBW, Kamień Śląski
- Rhim H. C. *Condition monitoring of deteriorating concrete dams using radar*. CCR 31 Elsevier 2000.
- Shayan A., Grimstad J. *Deterioration of concrete in a hydroelectric concrete gravity dam and its characterization*. CCR 36, Elsevier 2006.
- Sortis De A., Paoliani P. *Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring*. Engineering Structures 29, Elsevier 2007.
- Topçu I. B. *Alternative estimation of the modulus of elasticity for dam concrete*. CCR 35, Elsevier 2005.
- Wei-Du L. *Frequency spectrum analysis of ultrasonic testing signal in concrete*. NDT Abstracts, 1992.
- Wolski W., Kledyński Z., Król P. *Konstrukcje hydrotechniczne*. Materiały XLVIII Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Opole-Krynica 2002.
- Xie H., Chen Y. *Determination of the type and thickness for impervious layer in RCC dam*. Advances in Engineering Software 36, Elsevier 2005.

Dr inż. Wojciech Kilian
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Inżynierii Środowiska
Zakład Mechaniki i Konstrukcji Inżynierskich
50-363 Wrocław
Plac Grunwaldzki 24
tel. +48 71 3205570
e-mail: kilian@iis.ar.wroc.pl

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Bednarczyk