

Diagnostyka techniczna konstrukcji żelbetowych

Degradacje konstrukcji żelbetowych

Degradacja konstrukcji żelbetowych jest wynikiem działania mechanizmów związanych ze zjawiskami fizycznymi, chemicznymi oraz biologicznymi. Aktywność i praktyczne znaczenie tych mechanizmów degradacji jest zróżnicowana i zależy od materiału, z którego konstrukcja jest wykonana, co przykładowo w przypadku konstrukcji żelbetowej i stalowej ilustruje tabl. 1.

Tablica 1

Aktywność mechanizmów degradacji w zależności od materiału konstrukcji [2]

Mechanizmy degradacji	Rodzaj konstrukcji	
	żelbetowa	stalowa
Fizyczne		
Akumulacja zabrudzeń nieorganicznych	•	•
Cykliczne zamrażanie/odmrażanie	•	o
Erozja	•	o
Krystalizacja	•	
Oddziaływanie ekstremalnych temperatur	o	•
Pelzanie	o	
Relaksacja	•	o
Skurcz	•	
Przeciążenia	•	•
Wymywanie	•	
Zmęczenie	o	•
Zmiany warunków geotechnicznych	•	•
Chemiczne		
Karbonatyzacja betonu	•	
Korozja	•	•
Oddziaływania substancji agresywnych	•	•
Reakcje między składnikami materiału	•	
Biologiczne		
Akumulacja zabrudzeń organicznych	•	•
Oddziaływania mikroorganizmów	•	•
Oddziaływania roślin	•	o

Oznaczenie: • – mechanizm podstawowy; o – mechanizm dodatkowy.

W różnych sytuacjach eksploatacyjnych intensywność procesów degradacyjnych może być różna. Może ona być spowolniona, gdy konstrukcja jest należycie zabezpieczona przed niekorzystnymi oddziaływaniami środowiskowymi, ale może też ulec przyspieszeniu na przykład w wyniku nagłego działania czynników mechanicznych (przeciążenie, uderzenie, wybuch), wystąpienia nadzwyczajnych czynników pogodowych bądź innych zdarzeń o charakterze losowym (ekstremalne opady, pożar), nieprawidłowej eksploatacji, braku dbałości o konstrukcję w czasie jej użytkowania, błędów wykonawczych lub projektowych itd.

Konsekwencją procesów degradacyjnych, w sytuacji, gdy trwałość pierwotna konstrukcji staje się niewystarczająca, jest pojawienie się w niej mniej lub bardziej poważnych uszkodzeń wymagających naprawy lub wzmocnienia [1÷3]. Ale może to być też przyczyną wystąpienia poważniejszych zniszczeń, w tym awarii lub katastrof konstrukcji.

Mając na uwadze trwałość, w tym bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetowych, poddaje się je okresowemu przeglądowi technicznemu, zgodnie z wymaganiami ustawy Prawo budowlane [5].

Stwierdzenie w wyniku dokonanych ocen okresowych istotnych nieprawidłowości, poważniejszych usterek lub uszkodzeń poszczególnych elementów bądź całych konstrukcji skutkuje zwykle potrzebą przeprowadzenia postępowania znacznie szczegółowszego i zaawansowanego w stosunku do przeglądu okresowego, nazywanego diagnostyką doraźną [4]. Rezultaty tej diagnostyki stanowią istotny, ale nie jedyny składnik opracowania zwanego ekspertyzą.

Przeprowadzanie szczegółowych diagnostyk konstrukcji żelbetowych na użytek opracowania ekspertyzowego może też wynikać z potrzeb ocen możliwości i warunków przeprowadzania planowanych modernizacji konstrukcyjno-budowlanych, nadbudów, rozbudów albo zmian technologicznych w obiektach, skutkujących zmianami charakteru czy wartości dotychczasowych obciążeń. W takich wypadkach diagnostyki takie są nazywane docelowymi i mogą mieć charakter dwuetapowy [8]. Podobnie jak diagnostyki doraźne, wymagają one przeprowadzenia całego szeregu postępowania, wśród których integralne są badania techniczne (diagnostyczne) i analizy, wymagające z kolei umiejętnego stosowania nowoczesnych metod badawczych i analitycznych. Konieczność stosowania takich metod jest niezbędna w celu dokonania dostatecznie dokładnych ocen właściwości technicznych konstrukcji, w tym m.in. identyfikacji wad, co stwarza podstawy zarówno do prawidłowej interpretacji i ocen występujących zjawisk, jak też formułowania praktycznych działań zaradczych.

Charakterystyka ogólna diagnostyk technicznych

• **Zagadnienia ogólne diagnostyk.** Bezpieczeństwo i niezawodność istniejących konstrukcji żelbetowych ocenia się na podstawie szeregu czynności, nazywanych diagnostyką [3 ÷22].

Problemy diagnostyki konstrukcji żelbetowych wraz z oceną ich stanu technicznego występują najczęściej przy przeglądach, remontach, renowacjach, rozbudowach, przebudowach i modernizacjach obiektów budowlanych.

Rozwiązywanie problemów występujących podczas diagnoz konstrukcji eksploatowanych jest często trudniej-

sze niż projektowanie konstrukcji nowych. Bierze się to stąd, że w czasie eksploatacji konstrukcje często ulegają niejednorodnemu osłabieniu i niszczeniu w wyniku korozji elementów, zmian warunków posadowienia, zmian obciążenia, działania szkodliwego ośrodka, działania czynników losowych itp.

Diagnostyki konstrukcji żelbetowych wymagają stosowania nowoczesnych metod badawczych i analitycznych, umożliwiających dostatecznie dokładną ocenę właściwości technicznych konstrukcji.

Diagnostyki techniczne konstrukcji żelbetowych przeprowadza się na podstawie wyników okresowych przeglądów podczas bieżącej eksploatacji lub w następstwie zmian spowodowanych naruszeniem struktury konstrukcji, zmian warunków eksploatacji lub zamiaru jej modernizacji.

W zależności od cech budowli i liczby diagnozowanych parametrów stawia się diagnozy mniej lub bardziej kompleksowe. Rozróżnia się diagnozy proste jednoparametrowe oraz diagnozy wieloparametrowe, ukierunkowane na wiele cech użytkowych obiektu żelbetowego.

Kompleksowe i szczegółowe diagnostyki techniczne, obejmujące wszystkie użytkowe cechy obiektów budowlanych, są trudne do przeprowadzenia i powinny być wykonywane przez zespoły specjalistów z różnych dziedzin techniki.

Ze względu na cel, zakres i specyfikację diagnoz stosuje się różne odmiany diagnoz technicznych, w których wykorzystuje się różne metody przeglądów i ocen.

W praktyce w wyniku przeglądów przeprowadza się najczęściej diagnozy wieloparametrowe, wymagające stosowania skomplikowanych badań, pomiarów, obserwacji oraz opracowań analitycznych.

Diagnostyki konstrukcji żelbetowych obiektów eksploatowanych należą do najbardziej skomplikowanych. Obejmują one badania, obliczenia i analizy uwzględniające rzeczywisty stan konstrukcji, występujące obciążenia i wpływy eksploatacyjne oraz wymagają przyjęcia adekwatnej pracy konstrukcji. Stąd często diagnostyki konstrukcyjne wymagają zastosowania najlepszych i najnowocześniejszych metod badawczych oraz skomplikowanych wariantowych metod analitycznych, oczywiście z wykorzystaniem metod komputerowych.

• Rodzaje diagnostyk konstrukcji żelbetowych.

Wyróżnia się trzy rodzaje diagnostyk konstrukcji żelbetowych [8]:

- okresowe – przeglądy techniczne,
- doraźne,
- docelowe.

Diagnostyki okresowe są związane z wykonywaniem przeglądów technicznych, które powinny stanowić jeden z podstawowych warunków prawidłowej eksploatacji obiektu zgodnie z wymaganiami ustawy Prawo budowlane. Przestrzeganie harmonogramu przeglądów technicznych oraz ich realizację powinny należeć do użytkowników (zarządców). Diagnostyki okresowe mogą być wykonane ich siłami własnymi lub przez utworzone w tym celu zespoły specjalistów, przy czym powinny być przeprowadzane corocznie i wpisywane do książki obiektu.

Diagnostyki doraźne są przeprowadzane po stwierdzeniu uszkodzeń konstrukcji lub zauważeniu innych nieprawidłowości dotyczących zarówno elementów, jak i całych obiektów. Potrzebę przeprowadzenia tego rodzaju diagnostyk powinni sygnalizować użytkownicy obiektów

lub nadzory techniczne. Mogą one wynikać także z ocen dokonanych w ramach przeglądów technicznych lub z ocen państwowego nadzoru budowlanego.

Według ustawy Prawo budowlane diagnostyki doraźne powinny być wykonywane podczas normalnej eksploatacji, nie rzadziej niż co 5 lat, a w przypadku obiektów szczególnych – co 0,5 roku.

Diagnostyki docelowe są najczęściej związane z oceną możliwości i warunków przeprowadzania planowanych zmian lub modernizacji konstrukcyjno-budowlanych, rozbudowy, nadbudowy oraz zmian technologicznych w obiektach.

Diagnostyki doraźne i docelowe konstrukcji żelbetowych wykonuje się najczęściej z powodu:

- występujących uszkodzeń lub lokalnych zniszczeń elementów konstrukcji;
- planowanych zmian sposobu użytkowania lub przedłużenia planowanego okresu eksploatacji;
- pogorszenia się stanu technicznego konstrukcji na skutek eksploatacji, czynników środowiskowych lub obciążeń wyjątkowych (pożaru, wstrząsu, wybuchu itp.);
- planowanej modernizacji lub innych zmian, podczas których będą wymieniane elementy konstrukcyjne lub wprowadzane nowe elementy konstrukcyjne, obok istniejących układów konstrukcyjnych przenoszących obciążenia;
- obniżonej niezawodności konstrukcji na skutek wstrząsów parasejsmicznych, zalania wodą, działania pożaru itp.;
- wymagań nadzoru budowlanego, firm ubezpieczeniowych, właścicieli, zarządców, użytkowników itp.

Diagnostyki okresowe (przeгляд techniczny) mogą przeprowadzać własnymi siłami właściciele lub użytkownicy (zarządcy) obiektów budowlanych.

Diagnostyki doraźne lub docelowe, które wymagają przeprowadzenia badań technicznych i analiz, mogą wykonać zespoły specjalistów lub uprawnieni rzeczoznawcy.

W zależności od specyfiki poszczególnych przypadków, oceny (diagnozy) można realizować jednoetapowo lub dwuetapowo.

Jednoetapowe oceny stanów konstrukcji żelbetowych można wykonać w normalnym trybie postępowania (niewymuszonym wyjątkowo złym stanem technicznym konstrukcji lub koniecznością podjęcia szybkich decyzji w związku z planowaną modernizacją bądź z innymi czynnościami administracyjno-technicznymi [8]).

Dwuetapowe oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych należy przeprowadzać głównie w razie potrzeby podejmowania decyzji o doraźnym wzmocnieniu lub zabezpieczeniu konstrukcji znajdujących się w wyjątkowo złym stanie technicznym, a także w celu ukierunkowania dalszych działań [8]. Te systemy ocen mogą być również przydatne w sytuacjach, gdy jest konieczne uzyskanie szybkiego oszacowania dotyczącego możliwości adaptacji obiektów w razie planowanych zmian ich funkcji lub przewidywanych istotnych zmian technologicznych i organizacyjnych.

Dwuetapowe oceny konstrukcji żelbetowych składają się z ocen wstępnych i ostatecznych.

Bezpieczeństwo i niezawodność żelbetowych konstrukcji eksploatowanych mogą być (w zależności od wymagań) określane w sytuacjach:

- trwałych, odpowiadających normalnym warunkom użytkowania;
- przejściowych, odpowiadających warunkom występującym w czasie remontów, modernizacji lub wzmocnień;

– wyjątkowych, odpowiadających warunkom losowym (wypadkowym), nieujętych normami, jak pożar, uderzenie, wichura, zalanie, wybuch.

Postępowania diagnostyczne

• **Ogólne zasady postępowania.** Rezultaty postępowania diagnostycznych stanowią podstawy należyte sporządzonych opracowań ekspertyzowych przydatnych do celów, którym mają służyć. Niżej podano zasady ogólne, które warto wziąć pod uwagę w tych postępowaniach.

Istniejące konstrukcje żelbetowe należy oceniać zgodnie z aktualnymi normami. Wcześniejsze normy, obowiązujące w okresie projektowania tych konstrukcji, mogą stanowić tylko tzw. tło informacyjne. Poziomy bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji powinny być nie niższe niż poziomy wymagane przy projektowaniu nowych konstrukcji.

Postępowaniom diagnostycznym mogą być poddane, w zależności od potrzeb, całe konstrukcje żelbetowe albo tylko wybrane ich elementy, na przykład uszkodzone albo przewidziane do zmian konstrukcyjnych lub napraw albo do modernizacji. W takich przypadkach postępowaniami diagnostycznymi należy objąć też inne elementy konstrukcji, w stosunku co do których istnieje podejrzenie, że mogło ulec obniżenie ich wymaganych poziomów niezawodności i bezpieczeństwa użytkowania.

W badaniach konstrukcji żelbetowych lub elementów składowych tych konstrukcji należy uwzględniać rzeczywisty stan i rzeczywiste warunki ich pracy.

Wybór metod i technik diagnostycznych należy dostosować do warunków i stanu technicznego diagnozowanych konstrukcji. Szczególnie polecane są metody nieniszczące i seminieniszczące. W wyjątkowych sytuacjach można zastosować obciążenia próbne. Stosowane metody powinny zapewnić uzyskanie wyników o wymaganej dokładności i na tyle licznych, aby możliwa była ocena statystyczna wymagana przez przepisy normowe.

Wizje lokalne i badania wizualne konstrukcji żelbetowych, zarówno eksploatowanych, jak i wyłączonych z użytkowania, powinno się poprzedzić analizą zarówno dostępnej dokumentacji technicznej, jak i innych dokumentów, do których należy zaliczyć m.in. projekty budowlane, projekty wykonawcze, inne dostępne projekty przeprowadzonych w przeszłości remontów albo modernizacji lub adaptacji, dziennik budowy, książkę obiektu, opinie, orzeczenia i ekspertyzy dotyczące konstrukcji. Źródłem informacji mogą być też wywiady przeprowadzone z wykonawcami konstrukcji, z jej użytkownikami i zarządcami, państwowym nadzorem budowlanym itp.

Podczas wizji lokalnych oraz badań należy zwracać uwagę na czynniki, które aktualnie nie wpływają bezpośrednio na stany graniczne nośności lub użyteczności ocenianych konstrukcji żelbetowych, ale pośrednio w dłuższym okresie mogą istotnie wpłynąć na ich bezpieczeństwo i niezawodność. Przykładami takich czynników mogą być: agresywne środowisko, brak zabezpieczeń przeciwilgociowych, drgania przenoszące się z sąsiedztwa.

Ze względu na bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetowych jest bardzo istotne, aby oceny dokonywać na podstawie aktualnych rzeczywistych danych, obejmujących m.in. wymiary elementów, właściwości i cechy betonów, w tym ich wytrzymałości i jednorodności, właściwości i cechy stali zbrojeniowych – rozmieszczenie zbrojenia, otulenie betonem, stopień skorodowania, parametry elementów prefabrykowanych, obciążenia i ich

charakter, modele (schematy) pracy, odkształcenia, lokalizację uszkodzeń i wad, parametry podłoża gruntowego.

• **Metody i techniki diagnozowania.** Według opracowań [3+5] rodzaje stosowanych metod i technik diagnozowania zależą w dużym stopniu od warunków i stanów technicznych diagnozowanych konstrukcji żelbetowych. Powinno się stosować metody umożliwiające uzyskanie rezultatów o wymaganych dokładnościach, umożliwiające statystyczne oceny badanych konstrukcji z dokładnością wymaganą przez stosowne przepisy, pozwalające na scharakteryzowanie aktualnych stanów ocenianych konstrukcji.

W diagnostykach konstrukcji żelbetowych wykorzystuje się zróżnicowane metody i techniki. Podstawowe wśród nich grupy zostały sklasyfikowane w [2]. W metodach zaliczanych do fizycznych wykorzystuje się zjawiska fizyczne, w metodach chemicznych – procesy chemiczne, a metody biologiczne są związane z procesami biologicznymi.

Metody diagnostyczne i techniki pomiarowe zestawiono w tabl. 2. Określono obszary przydatności tych metod w badaniach geometrii i właściwości materiałów konstrukcji, w wykrywaniu oraz identyfikacji uszkodzeń, wraz z podaniem informacji, czy dane metody są podstawowe w rozumieniu powszechności stosowania, czy uzupełniające.

• **Metody i techniki nieniszczące.** Spośród dostępnych metod i technik diagnostycznych dużą przydatnością w odniesieniu do konstrukcji żelbetowych cechują się metody nieinwazyjne, nieniszczące, których stosowanie nie powoduje naruszenia struktur badanych konstrukcji. Ogólny podział nieniszczących metod przydatnych w diagnostykach prowadzonych na użytek trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych podano w [7], a zestawienie metod nieniszczących przydatnych w ocenie wytrzymałości i jednorodności betonu oraz metod nieniszczących i seminieniszczących przydatnych do oceny innych cech niż wytrzymałość w [9]. Krótkie sygnałowe opisy niektórych z wyszczególnionych metod, w tym tych uznawanych obecnie za nowoczesne, zamieszczono niżej. Szczegółowe opisy większości wymienionych metod można znaleźć m.in. w pracach [2, 5, 8].

• **Metody optyczne.** Do metod optycznych stosowanych w diagnostykach konstrukcji żelbetowych można zaliczyć wiele technik pomiarowych, w których wykorzystuje się aparaturę badawczą w postaci m.in. endoskopów, borskopów, wideoskopów umożliwiających badanie powierzchni i miejsc niedostępnych wzrokowo, a także mikroskopy użyteczne w warunkach laboratoryjnych. Ponadto do tej grupy metod zaliczyć należy skaning laserowy. Ta nowoczesna metoda pomiarów geodezyjnych umożliwia zdalne wyznaczenie położenia zbioru punktów w przestrzeni trójwymiarowej, co daje możliwość rekonstrukcji trójwymiarowego obrazu (ukształtowania) całych obiektów budowlanych lub ich fragmentów, w tym konstrukcji [2]. Metoda ta może zostać wykorzystana na przykład do zdalnego pomiaru postępujących ugięć wybranych elementów konstrukcyjnych lub całych konstrukcji żelbetowych. Badania mogą być powtarzane w czasie, a ich rezultaty porównywane względem siebie i analizowane w ramach oceny bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji.

• **Metody akustyczne.** Spośród akustycznych nieniszczących metod badawczych przydatnych do oceny trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbe-

Tablica 2

Metody i techniki pomiarowe przydatne w diagnozowaniu konstrukcji żelbetowych

Metody i techniki badań	Geometria				Właściwości materiału						Uszkodzenia					
	Ukształtowanie przestrzenne	Wymiary elementów	Identyfikacja zbrojenia	Rodzaj materiału	Wytrzymałość/jednorodność	Moduł odkształcalności	Porowatość/nasiąkliwość	Mrozoodporność	Wilgotność	Skład chemiczny	Deformacje	Destrukcja materiału	Ubytki materiału	Utrata ciągliwości materiału	Zanieczyszczenia	Zmiany położenia
FIZYCZNE																
Bezpośrednie badania wizualne	•	o		•					o		•	o	•	•	•	•
Pośrednie badania wizualne	•	o		•					o		•	o	•	•	•	•
Metody geodezyjne	•	•									•		o			•
Metody laserowe	•	•									•					•
Metody termograficzne			o					o				o	o	o		
Metody radiograficzne			•									o	•	•		
Metody radioskopowe			o									o	•	•		
Tomografia komputerowa			•									o	•	•		
Metody impulsowe		•					•	•				o	•	•		
Metody ultradźwiękowe		•					•	•				o	•	•		
Tomografia ultradźwiękowa			o									o	•	•		
Emisja akustyczna																•
Metody magnetyczne			•													
Metody radarowe	o	o	•									o	•	•		
Metody indukcji elektromagnetycznej			•													
Pomiary potencjału elektrycznego									o			•	•			
Pomiary oporności elektrycznej									o			•	•			
Bezpośrednie pomiary geometryczne	•	•	o								•	o	•	•	•	•
Metody penetracyjne					•							o				
Metody sklerometryczne					•	o						o				
Metody ciśnieniowe							•					•				
Polowe metody badań cech fizycznych					•	•						•				
Laboratoryjne metody badań cech fizycznych				•	•	•	•	•	•			•				
CHEMICZNE																
Metody jakościowej analizy chemicznej				o					o		o					o
Metody ilościowej analizy chemicznej				•					•		•				•	
BIOLOGICZNE																
Metody makroskopowe												•				•
Metody mikroskopowe												•				•
Metody hodowlane												o				o

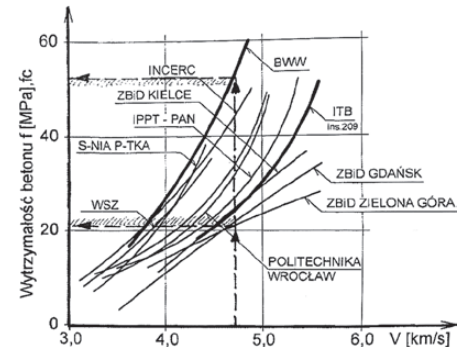
Oznaczenie: • – mechanizm podstawowy; o – mechanizm dodatkowy.

towych scharakteryzowano niżej metody: ultradźwiękową, odpowiedzi na impuls, młoteczkową, tomografią ultradźwiękową, emisji akustycznej.

a. Metody ultradźwiękowe są znane od dawna i stosowane do wiarygodnych ocen (w sposób pośredni) wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji [10÷19]. Mogą być także wykorzystywane do wykrywania nieciągłości strukturalnej w elementach żelbetowych w postaci pęknięć oraz do lokalizowania pustek powietrznych [13]. Aparatura składająca się z betonoskopu i głowic ultradźwiękowych jest powszechnie dostępna. Do oceny

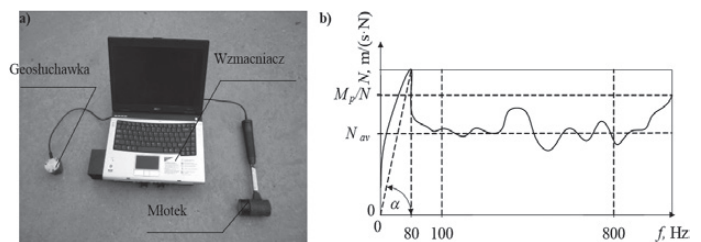
wytrzymałości betonu wymagane jest określenie prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych v_c rozprzestrzeniających się w badanych betonach i skorelowanie tych prędkości z wytrzymałością na ściskanie f_c uzyskaną na podstawie wytrzymałościowych badań próbek pobranych z konstrukcji. Wyniki pomiarów wytrzymałości betonu w konstrukcji należy uwiarygodnić przez wzorcowanie metody, polegające na doborze odpowiedniej zależności korekcyjnej lub hipotetycznej $v_c - f_c$. Prawidłowe stosowanie tych metod wymaga bezwzględnego przestrzegania zasad prowadzenia badań, podanych w pracy [10], w której jest omówiona szczegółowa procedura badań ultradźwiękowych betonu *in situ*. Ponadto obowiązują normy [11, 12].

Przykładowe zależności badawcze według metod ultradźwiękowych do oceny wytrzymałości betonu podano na rys. 1. Uzasadniają one potrzebę przybliżonego skalowania metody, uwzględniającego rodzaj betonu.



Rys. 1. Przykłady charakterystycznych zależności $f_c - V$ dla metody ultradźwiękowej (dla różnych betonów i różnych krajów)

b. Metody odpowiedzi na impuls (impulse response) są przydatne (m.in. do wykrywania pustek powietrznych pod płytami żelbetowymi ułożonymi na gruncie, delaminacji na stykach warstw, miejsc wadliwych i obszarów o dużej niejednorodności struktury betonu w masywnych elementach betonowych (tzw. honey-



Rys. 2. Metoda odpowiedzi na impuls (impulse response): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowy wykres zmiany parametru N_{av} w funkcji częstotliwości

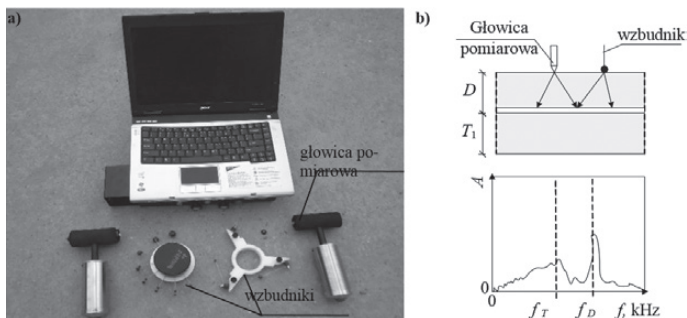
combing [7]). W skład zestawów badawczych pokazanych na rys. 2, wykorzystywanych w tych metodach, wchodzi specjalne młotki, geosłuchawki i wzmacniacze z przenośnymi odpowiednio oprogramowanymi komputerami.

W metodach tych dokonuje się wzbudzenia fal sprężystych w badanych elementach poprzez uderzenie skalibrowanym młotkiem z wbudowaną gumową końcówką. Rejestracja sygnału fali sprężystej rozprzestrzeniającej się w elemencie, o częstotliwości do 1000 Hz, następuje z użyciem geosłuchawki, niewymagającej użycia środka sprzęgającego akustycznie z powierzchnią badanego elementu, z równoczesnym jego wzmocnieniem za pomocą wzmacniacza. Przetwarzanie zarejestrowanych podczas badań sygnałów następuje za pomocą specjalistycznego oprogramowania. Ostatecznym wynikiem badań są tzw. mapy rozkładów wartości charakterystycznych parametrów powierzchni badanych elementów, tj. średnich zmienności N_{av} (average mobility), sztywności dynamicznych K_d (stiffness), skoków zmienności M_p (mobility slope), średnich zmienności pomnożonych przez skoki zmienności $N_{av} \times M_p$ (mobility times mobility slope) oraz współczynników wad v (vadis index), otrzymane w przypadku badanych powierzchni. Na podstawie analizy tych map można lokalizować rejon wadliwe.

c. Metody młoteczkowe (impact-echo) są przydatne m.in. do określania grubości elementów betonowych i żelbetonowych dostępnych jednostronnie oraz wykrywania w nich defektów.

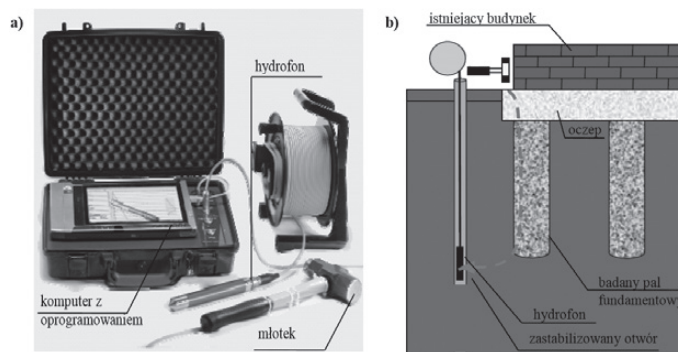
Metody te bazują na wzbudzeniu w badanych elementach fal sprężystych przez uderzenia w ich powierzchnię wzbudnikami w postaci kulek stalowych, w punktach pomiarowych rozmieszczonych co około 100 mm. Częstotliwości wygenerowanych drgań zależą od średnic użytych w badaniach kulek i wynoszą od około 10 do 150 kHz. Specjalistyczne oprogramowania umożliwiają zapisy graficzne obrazów fal sprężystych rozprzestrzeniających się w badanych elementach, w układzie amplituda – czas, a następnie przekształcenie tego obrazu w widmo amplitudowo-częstotliwościowe za pomocą szybkiej transformaty *Fouriera*. Widma te podlegają dalszym analizom. Zaletą tych metod są duże dokładności w zlokalizowaniu wad, wynikające z małej odległości między punktami pomiarowymi, natomiast niedogodnością jest brak możliwości oceny rozmiarów wad wypełnionych wodą. Zestaw pomiarowy, w którego skład wchodzi głowice pomiarowe ze wzbudnikami (kulki stalowe różnych średnic) i komputer przenośny, przedstawiono na rys. 3.

d. Metody sejsmiczne (parallel seismic) są stosowane w badaniach betonowych i żelbetonowych pali fundamentowych, zarówno prefabrykowanych, jak i wykonanych



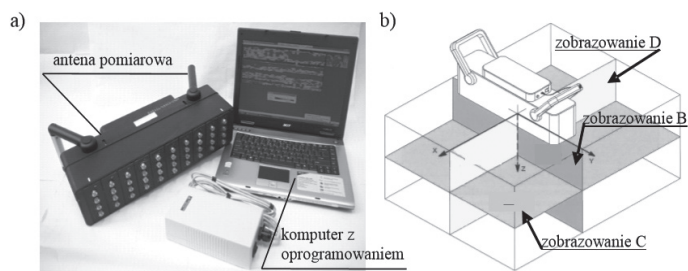
Rys. 3. Metoda młoteczkowa (impact-echo): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowe widmo amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane w przypadku istnienia w badanym elemencie wady

w miejscu wbudowania, w zakresie kontroli ich długości i ciągłości przekroju na długości [14]. W metodach tych jest wymagane wykonanie w gruncie, wzdłuż badanego elementu, otworu na głębokość większą niż przewidywane długości elementów. W otworach tych umieszcza się hydrofon, pracujący w paśmie częstotliwości zbliżonym do 40 kHz i z użyciem skalibrowanego młotka dokonuje się uderzeń w głowicę pala lub w oczep zespołu pali. Wykorzystując hydrofon przemieszczający się w otworze wzdłuż pala, rejestruje się, po każdym uderzeniu, czas przejścia fali akustycznej z badanego pala do hydrofonu. Analiza czasu przejścia tej fali umożliwia, za pomocą specjalistycznego oprogramowania, określenie długości i ciągłości przekroju badanego pala. Zestaw pomiarowy stosowany w metodzie parallel seismic i przykładowy schemat badania pala pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Metoda sejsmiczna (parallel seismic): a) zestaw pomiarowy, b) przykładowy schemat badania

e. Metody tomografii ultradźwiękowej są najnowszymi spośród metod akustycznych [2, 7, 14]. Są przydatne do badania dostępnych jednostronnie elementów betonowych i żelbetonowych grubości do 2500 mm w celu określenia ich grubości, wykrycia rozmieszczenia zbrojenia w postaci na przykład kilku warstw siatek, wykrycia niewidocznych na powierzchni pęknięć, obcych wtrąceń, pustek powietrznych albo obszarów wypełnionych cieczą bądź materiałem różniącym się właściwościami fizycznymi od otaczającego go betonu [7, 8]. Metody bazują na wzbudzeniu i analizie fal sprężystych w badanych elementach. Wzbudnikami są wielogłowicowe anteny, mające wbudowanych kilkadziesiąt niezależnych głowic ultradźwiękowych zamocowanych sprężynowo, służących również do odbierania i przetwarzania sygnałów ultradźwiękowych. Głowice generują impulsy ultradźwiękowe o częstotliwości 50 kHz. Na rysunku 5 przedstawiono tomograf ultradźwiękowy, w którego skład wchodzi specjalna wielogłowicowa antena ultradźwiękowa i komputer wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym zapis graficznego

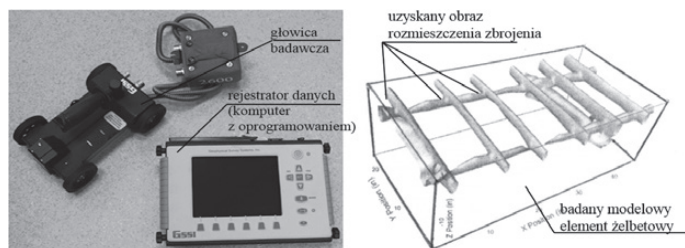


Rys. 5. Widok tomografu ultradźwiękowego [7]: a) zestaw pomiarowy, b) antena pomiarowa w układzie współrzędnych i możliwe do uzyskania zobrażenia

obrazu [7]. Za pomocą tomografu jest możliwe uzyskanie zobrażeń w dowolnym przekroju w trzech wzajemnie prostopadłych przekrojach oraz przestrzennego obrazu badanego elementu, ale interpretacja uzyskanych rezultatów w wielu sytuacjach jest utrudniona. W metodach tych nie jest wymagane stosowanie środka „sprzęgającego” powierzchnię badanego elementu z głowicami ultradźwiękowymi, co jest bardzo istotną zaletą. Stosowane są tu suche styki (dry point contact).

f. Metody emisji akustycznej to metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko powstawania i rozprzestrzeniania się w strukturze materiału fal sprężystych wysokiej częstotliwości, powodowanych obciążeniem. Mogą to być obciążenia narastające statycznie, wielokrotnie zmienne, dynamiczne, ale też i obciążenia niemechaniczne [15]. Metody nadają się do diagnostyki i obserwacji zarówno eksploatowanych elementów i konstrukcji żelbetowych, jak i elementów konstrukcji poddawanych obciążeniom próbnym. Są one użyteczne w ocenie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych, bo umożliwiają m.in. lokalizację i identyfikację uszkodzeń powstających w badanych elementach. Znamioną cechą metod jest to, że znacznie wcześniej niż inne metody sygnalizują rozwój procesów destrukcyjnych mogących spowodować na przykład zniszczenie, dając w ten sposób czas potrzebny do odciążenia konstrukcji. Interpretacja wyników badań uzyskiwanych tymi metodami wymaga dużego doświadczenia.

▪ **Metody elektromagnetyczne.** Z nieniszczących metod elektromagnetycznych przybliżono radarową GPR (Ground Penetrating Radar). Metoda ta jest wykorzystywana do określenia lub wykrywania w dostępnych jednostronnie elementach betonowych i żelbetowych, zwłaszcza płytowych, grubości, rozwarstwień, rozległych wad, usytuowania prętów zbrojeniowych. Głowice badawcze, nadawczo-odbiorcze (anteny), w zależności od przeznaczenia radaru generują fale elektromagnetyczne o częstotliwości od 0,1 do 2,5 GHz. Aparatura może przemieszczać się po powierzchni badanego elementu. Z rejestratorem danych jest połączona kablem transmisyjnym lub połączeniem radiowym. Zaletą tej metody jest możliwość szybkiego badania elementów o dużych powierzchniach, szczególnie w zakresie lokalizowania zbrojenia, natomiast wadą – mała dokładność określenia średnicy i grubości otuliny zbrojenia. Przykładowy zestaw radarowy pokazano na rys. 6 [7].

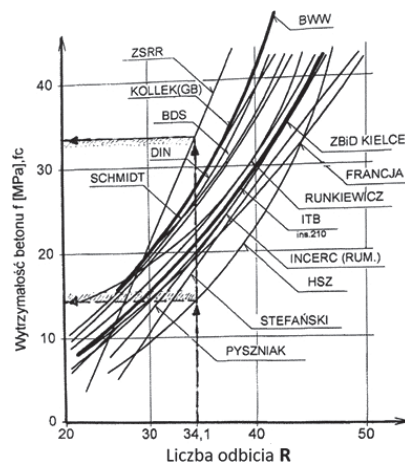


Rys. 6. Zestaw radarowy i przykładowe zobrazenie pokazujące rozmieszczenie zbrojenia w modelowym elemencie żelbetowym

▪ **Metody sklerometryczne.** Podobnie jak metody ultradźwiękowe znane są od dawna i stosowane do wiarygodnej oceny, w sposób pośredni, wytrzymałości i jednorodności betonu w konstrukcji. W praktyce diagnostycznej dominuje metoda dynamiczna. Powszechnie stosowanym urządzeniem pomiarowym jest sklerometr *Schmidta*. W tej

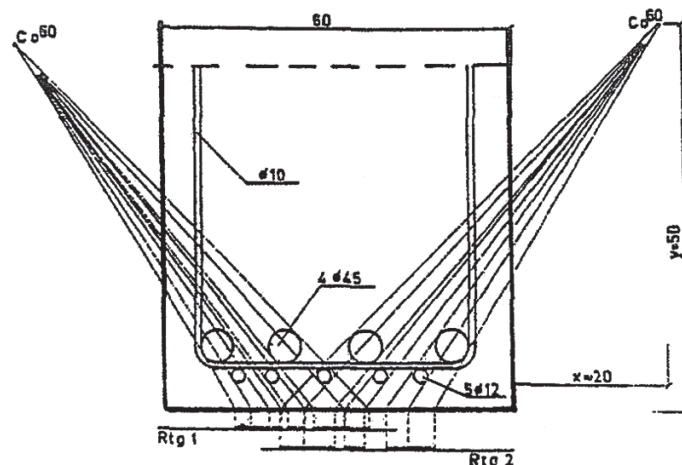
metodzie jest wymagane określenie parametru w postaci tzw. liczby odbicia R i skorelowanie jej z wytrzymałością na ściskanie f_c przez dobór odpowiedniej zależności korelacyjnej lub hipotetycznej $f_c - R$. Wytrzymałości na ściskanie są określone na podstawie badań próbek pobranych z konstrukcji. Prawidłowe stosowanie tej metody, zapewniające uzyskanie wiarygodnych rezultatów, wymaga bezwzględnego stosowania zasad prowadzenia badań, podanych w pracach [5, 17]. Ponadto obowiązują normy [12, 18].

Przykładowe zależności badawcze metodami sklerometrycznymi do oceny wytrzymałości betonu podano na rys. 7. Uzasadniają one potrzebę uproszczonego skalowania metody w przypadku każdego rodzaju betonu.



Rys. 7. Przykładowe zależności empiryczne $f_c - R$ dla sklerometrów *Schmidta* typu N (dla różnych betonów i różnych krajów)

▪ **Metody radiologiczne.** Wśród metod radiologicznych można wyróżnić metodę radiograficzną [8], stosowaną m.in. w ocenie rozkładu zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych. Przykład oceny zbrojenia w belce żelbetowej pokazano na rys. 8. Metody te są opisane w wielu publikacjach i znormalizowane.



Rys. 8. Ocena zbrojenia dolnego w belce (w środku przęsła) za pomocą metody radiograficznej

▪ **Metody i techniki seminieniszczące.** Podobnie jak metody nieniszczące, również metody seminieniszczące cechują się dużą przydatnością w ocenie trwałości, bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji żelbetowych. Ich stosowanie nie powoduje istotnego naruszenia struktury badanej konstrukcji. Propozycję ogólnej klasyfikacji

podstawowych metod i technik seminieniszczących przydatnych w diagnostyce konstrukcji żelbetowych podano w pracy [7]. Wyróżniono metody fizyczne, chemiczne i biologiczne, z podziałem na przydatne w badaniach polowych (terenowych) oraz stosowane w laboratoryjnych badaniach próbek, w tym na przykład rdzeniowych pobranych z konstrukcji. Ważniejsze czynniki mające wpływ na trwałość, bezpieczeństwo i niezawodność użytkowania konstrukcji żelbetowych, możliwe do zidentyfikowania za pomocą rozpatrywanych metod seminieniszczących, podano w tabl. 3. Syntetyczne omówienia niektórych z wyszczególnionych w [7] metod i technik zamieszczono niżej, natomiast ich szczegółowe opisy są podane m.in. w pracach [2, 5, 6].

Tablica 3

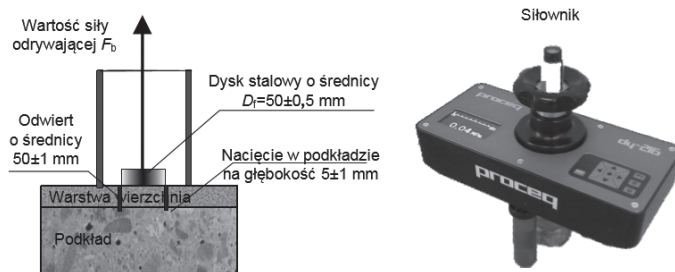
Czynniki mające wpływ na trwałość, bezpieczeństwo i niezawodność konstrukcji żelbetowych, identyfikowane za pomocą metod seminieniszczących

Metoda seminieniszcząca	Czynnik				
	1	2	3	4	5
	1. struktura materiału 2. parametry mechaniczne materiału 3. nieciągłość materiału 4. wodo- i gazoprzepuszczalność 5. skład chemiczny				
METODY POLOWE					
Metoda wrywania	-	•	-	-	-
Metoda odrywania	-	•	-	-	-
Test momentu obrotowego	-	•	-	-	-
Metody penetracyjne	-	•	-	-	-
Test wodoszczelności	o	-	-	•	-
Metody polaryzacyjne	-	-	-	-	•
Test pH	-	-	-	-	•
Pomiar głębokości karbonatyzacji	-	-	-	-	•
Test alkaliczny	-	-	-	-	•
Test chlorkowy	-	-	-	-	•
Test elektroanalizy	-	-	-	-	•
Biologiczne metody makroskopowe	o	-	o	-	-
Biologiczne metody mikroskopowe	o	-	o	-	-
METODY LABORATORYJNE					
Określenie wytrzymałości na ściskanie	-	•	-	-	-
Określenie parametrów elastycznych	-	•	-	-	-
Test nasiąkliwości	o	-	-	•	-
Test porowatości	•	-	-	•	-
Badanie mrozoodporności	-	•	-	-	-
Badanie ścieralności	o	•	-	-	-
Mikrotomografia komputerowa	•	o	o	-	-
Metody elektroanalizy	-	-	-	-	•
Analiza spektralna	-	-	-	-	•
Metody chromatograficzne	-	-	-	-	•
METODY HODOWLANE					
Analiza mikrobiologiczna	o	-	o	-	-

• – metoda podstawowa; o – metoda dodatkowa; – nie dotyczy.

• **Metody przydatne w badaniach polowych.** Można tu zaliczyć metody umożliwiające ocenę parametrów wytrzymałościowych betonu, a przede wszystkim wytrzymałości na ściskanie na podstawie pomiarów sił wrywających zabetonowanych uprzednio lub w nawierconych w betonie otworach kotew (metody pull-out i torque tests)

oraz przyczepności na odrywanie (metoda pull-off) polegającej na pomiarze sił odrywających metalowe krążki od podłoża betonowych. Metody te są opisane w [7] i znormalizowane [19]. Najnowszy zestaw do wykonywania badania metodą pull-off przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Widok najnowszego zestawu do wykonywania badań metodą pull-off

Do metod wykorzystywanych w badaniach polowych zalicza się również te, które umożliwiają ocenę odporności betonu na penetrację soli chlorkowych i jego wodoszczelności. Służą do tego penetration tests i water resistance tests. Wśród metod penetracyjnych na uwagę zasługują metody znormalizowane.

Spośród metod seminieniszczących niektóre są przydatne do oceny skorodowania zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (potencjometryczna, rezystancyjna, polaryzacji liniowej). Metody polaryzacji liniowej dają wiarygodne wyniki na podstawie pomiarów natężenia prądu korozyjnego, ale w ich przypadku jest wymagany bezpośredni kontakt ze stalą zbrojeniową. Mankament ten niwelują metody pomiaru potencjału i rezystancji betonowej otuliny, w tym zmodyfikowana metoda czterech punktów *Wennera* [20].

Do metod umożliwiających określanie w warunkach polowych składu i parametrów chemicznych betonu na podstawie analizy próbek materiału pobranych podczas badań na obiekcie zalicza się: pH tests, rainbow tests i chloride tests.

Większość zestawów do pomiaru pH betonu bazuje na wizualnym porównywaniu koloru na papierze lakmusowym. Są jednak dostępne nowoczesne zestawy do oceny pH z wykorzystaniem elektrody pomiarowej.

Prostym sposobem oceny stopnia skarbonatyzowania betonowych otulin prętów zbrojeniowych w warunkach polowych jest pobranie betonu i oznaczenie wielkości pH pehametrem.

Rainbow test z kolei służy do oceny zasięgu procesu karbonatyzacji przypowierzchniowych warstw betonu. Pomiar głębokości karbonatyzacji badanego elementu mają zastosowanie na przykład w określeniu pozostałego czasu eksploatacji, w sytuacji gdy stopień korozji jest czynnikiem krytycznym, obserwowaniu efektywności procesu realkalizacji otuliny betonowej [7]. Na rysunku 10 przedstawiono odwiert rdzeniowy pobrany z konstrukcji betonowej,



Rys. 10. Widok odwiertu rdzeniowego z zaznaczonym betonem skarbonatyzowanym ocenianym za pomocą rainbow test [7]

z zaznaczoną głębokością karbonatyzacji betonu, ocenioną za pomocą rainbow test.

Z kolei metoda chloride test umożliwia w prosty sposób, bezpośrednio na obiekcie, określenie zawartości chlorków, głębokości penetracji oraz profilu ich rozkładu w przekroju elementu betonowego. Sposób badania opisano w [6].

• **Metody stosowane w laboratorium.** Powszechnie stosuje się tu metody bezpośredniej oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji. Są one stosowane w badaniach wytrzymałości próbek betonu pobieranych z konstrukcji. Urządzeniem badawczym jest w tym przypadku maszyna wytrzymałościowa. Badania te pełnią bardzo istotną rolę w wiarygodnej ocenie bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji *in situ*.

Należy zaznaczyć, że ocena wytrzymałości betonu *in situ* jest przedmiotem normy [12]. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie mogą być realizowane bezpośrednio na próbkach rdzeniowych pobranych z konstrukcji albo pośrednio z wykorzystaniem metod nieniszczących ultradźwiękowej lub sklerometrycznej. Szczegółowe procedury badania wytrzymałości betonu na ściskanie *in situ* na próbkach rdzeniowych oraz oceny tej wytrzymałości w konstrukcji na podstawie wyniku badania próbek rdzeniowych są podane w pracy [12]. Badanie wytrzymałości betonu na próbkach rdzeniowych obejmuje: pobieranie rdzeni betonowych z konstrukcji i ich przygotowanie do badań, oznaczenie wytrzymałości na ściskanie próbek rdzeniowych, opracowanie zestawienia wyników badań wytrzymałości tych próbek wraz z opracowaniem raportu z badań. Z kolei ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji na próbkach rdzeniowych obejmuje m.in. obliczanie wartości średniej i odchylenia standardowego wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oszacowanie niepewności obliczonej wartości średniej, ocenę charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji. W diagnostyce wytrzymałości betonu w konstrukcji *in situ* można wzorować się na pracach [10 i 12].

Jeżeli chodzi o bezpośrednią ocenę parametrów stali zbrojeniowej, to badania obejmują zazwyczaj określenie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużalności i w tym celu są pobierane z konstrukcji żelbetowych, z miejsc najmniej wyciężonych, odcinki prętów konstrukcyjnych danego kierunku zbrojenia, które – podobnie jak pobierane z konstrukcji próbki betonowe – są badane następnie w laboratorium w maszynie wytrzymałościowej.

Spśród metod stosowanych w laboratorium najnowocześniejsza jest rentgenowska mikrotomografia komputerowa, umożliwiająca rekonstrukcję trójwymiarowego obrazu próbki betonu pobranej z badanej konstrukcji na podstawie dwuwymiarowych projekcji uzyskanych w trakcie jej skanowania wiązką promieni rentgenowskich. Metoda ta umożliwia określenie wielu parametrów charakteryzujących strukturę betonu, m.in. porowatości, rozkładu porów pod względem wielkości, rozmieszczenia ziaren kruszywa, rozmieszczenia mikrouszkodzeń, rozmieszczenia zbrojenia rozproszonego, a w przypadku betonu skarbonatyzowanego również określenie wartości modułu sprężystości. Rezultaty badań uzyskane tą metodą mogą być przydatne na przykład w interpretacji przyczyn powstania uszkodzeń konstrukcji.

• **Obciążenia próbne konstrukcji.** Jedną z metod wiarygodnej oceny bezpieczeństwa i niezawodności ele-

mentów konstrukcji żelbetowych są – stosowane w przypadkach uzasadnionych – obciążenia próbne. Sygnalizując ten problem, należy zauważyć, że wykonuje się je na przykład w sytuacji, gdy zachodzi potrzeba upewnienia się co do aktualnego stanu granicznego nośności albo stanu granicznego użyteczności elementu konstrukcyjnego, a nie można tego z różnych przyczyn dokonać wiarygodnie na drodze badawczej i obliczeniowej. Przyczyną tego może być na przykład pożar, któremu obiekt uległ w przeszłości. Zazwyczaj obciążenia próbne mają charakter nieniszczący i mogą być realizowane w warunkach polowych lub w laboratorium.

Ze względu na cele i sposoby prowadzenia badań, obciążenia próbne według [5, 19] mają m.in. za zadanie wykazać, czy elementy lub konstrukcja zostały wykonane prawidłowo i zachowują się zgodnie z założeniami projektowymi, a także sprawdzenie zachowania się konstrukcji pod obciążeniami projektowymi. Nośności są określone na podstawie pomiaru odkształceń.

W trakcie obciążeń próbnych przedmiotem pomiarów może być ugięcie badanego elementu żelbetowego, szerokość rozwarcia rys lub też rozwój procesów destrukcyjnych w betonie i na styku betonu z prętami zbrojeniowymi, powodowany narastającym obciążeniem próbnym. W zależności od przedmiotu pomiaru należy dobrać odpowiednią metodę badawczą (aparaturę), zapewniającą taki pomiar. Przykładowo do „śledzenia” rozwoju wymienionych wyżej procesów destrukcyjnych jest przydatna metoda emisji akustycznej [15, 16].

Należy podkreślić, że planując obciążenia próbne elementu konstrukcyjnego żelbetowego trzeba w dużej mierze polegać na własnej wiedzy inżynierskiej, bo brak jest szczegółowych wytycznych odnośnie do ustalania wartości tych obciążeń. Pewne praktyczne wskazówki w tej kwestii można znaleźć w pracach [3, 5, 21]. Zasadą jest jednak to, że obciążenia powinny być poprzedzone szczegółową diagnostyką elementu lub konstrukcji, m.in. w zakresie: określenia charakterystyk materiałowych betonu i stali zbrojeniowej, otulenia zbrojenia betonem, ustalenia rzeczywistych wymiarów geometrycznych, rozpoznania warunków podparcia, połączenia itd.

Podsumowanie

Przedstawiona w artykule tematyka, dotycząca zasad wykonywania diagnostyk konstrukcji żelbetowych, kwalifikuje się – zdaniem autorów – do kluczowych w rozumieniu starych o zapewnienie należytego bezpieczeństwa, niezawodności i trwałości tych konstrukcji. Kontynuacją tej myśli jest niniejszy artykuł, przygotowany przede wszystkim z myślą o tych, którzy nie sporządzali ekspertyz konstrukcji żelbetowych lub mają w tym stosunkowo niewielkie doświadczenie. Dlatego w części wstępnej przybliżono i naświetlono sytuacje uzasadniające potrzebę sporządzania opracowań o charakterze diagnostycznym. Dużo uwagi poświęcono postępowaniu diagnostycznemu, które jest bardzo ważne, niezbędne i konieczne do należytego sporządzenia opracowania ekspertyzowego, przydatnego do celu, któremu ma służyć. Sprecyzowano w tej kwestii ogólne zasady, których należy przestrzegać, dokonano przeglądu dostępnych metod i technik diagnostycznych w celu ułatwienia ich doboru w konkretnych sytuacjach diagnostycznych. Ponadto przedstawiono najważniejszą literaturę, wśród której zwracają uwagę opracowania książkowe [1, 2, 5, 6, 10, 17, 25].

PIŚMIENNICTWO

- [1] *Czarnecki L., Łukowski P., Garbacz A.*: Naprawa i ochrona konstrukcji z betonu. Komentarz do PN-EN 1504. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [2] *Bień J.*: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. WKŁ, Warszawa 2010.
- [3] *Runkiewicz L.*: Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych. Poradnik. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2016.
- [4] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 roku. Prawo budowlane. DzU nr 89 z 1994 r. z późniejszymi zmianami.
- [5] *Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.*: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [6] *Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.*: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 2: Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [7] *Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K.*: Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability. Bulletin of the Polish Academy of Science. Technical Sciences, No. 1/2015.
- [8] *Runkiewicz L.*: Badania konstrukcji żelbetowych. Biuro Gamma, Warszawa 2002.
- [9] *Hoła J., Schabowicz K.*: Diagnostyka obiektów budowlanych. „Materiały Budowlane”, nr 5/2015.
- [10] *Brunarski L., Runkiewicz L.*: Instrukcja ITB nr 209. Instrukcja stosowania metody ultradźwiękowej do nieniszczącej kontroli jakości betonu w konstrukcji. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1997.
- [11] PN-EN 12504-4:2005 Badania betonu – Część 4: Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej.
- [12] PN-EN 13791:2008 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
- [13] *Hoła J., Stawiski B.*: Badania przydatności metody ultradźwiękowej do szybkiej oceny jakości konstrukcji wykonanych z betonu. Zeszyty Problemowe Badań Nieniszczących. 32. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Międzyzdroje 2003.
- [14] *Hoła J., Schabowicz K.*: State-of-the-art. Nondestructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. Archives of Civil and Mechanical Engineering, No. 3/2010.
- [15] *Hoła J.*: Emisja akustyczna w betonach. [W:] Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowania. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Biuro Pascal, 1994.
- [16] *Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.* i inni: Zastosowanie metody emisji akustycznej do analizy procesu zarysowania belek żelbetowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej: Budownictwo i Inżynieria Środowiska. Zeszyt 59, 2012.
- [17] *Runkiewicz L., Sieczkowski J.*: Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie badań sklerometrycznych. Poradnik. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2018.
- [18] PN-EN 12504-2:2013-03 Badania betonu w konstrukcjach – Część 2: Badania nieniszczące – Oznaczenie liczby odbicia.
- [19] PN-EN 12504-3:2006 Badania betonu w konstrukcjach – Część 3: Oznaczanie siły wyrwywającej.
- [20] *Sadowski Ł.*: Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half – cell potential and concrete resistivity measurements. The Scientific World Journal, 2013.
- [21] *Lewicki B.*: Obciążenia próbne konstrukcji istniejących budynków. Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1997.
- [22] *Stefaniuk D., Sadowski Ł.*: Wykorzystanie rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej do oceny wybranych cech mikrostruktury betonu. Krajowa konferencja badań radiograficznych „Popów 2016”.
- [23] *Brunarski L., Dohojda M.*: Diagnostyka wytrzymałości betonu w konstrukcji. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2015.