

**SCIENTIFIC
STUDIES**
Monographs

**PRACE
NAUKOWE**
Monografie

Lesław Brunarski, Marek Dohojda

**Diagnostyka wytrzymałości
betonu w konstrukcji**

Diagnostics of concrete
strength in structures



Instytut Techniki Budowlanej
razem ku przyszłości

Warszawa 2015

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny
Z-cy redaktora naczelnego

Sekretarz
Członkowie

prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI
prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI
dr inż. JADWIGA FANGRAT
dr MICHAŁ GAJOWNIK
dr hab. inż. PAWEŁ LEWIŃSKI
dr inż. TERESA MOŻARYN
mgr inż. JAN SIECZKOWSKI
dr inż. EWA SZEWCZAK
dr inż. SEBASTIAN WALL

Recenzent

prof. dr hab. inż. JERZY HOŁA, prof. zw. PWr
prof. dr hab. inż. IZABELA SKRZYPCZAK, prof. nzw. PRz

Redakcja
dr MICHAŁ GAJOWNIK

Opracowanie komputerowe
SŁAWOMIR KOSIARSKI

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej
Warszawa 2015

*Czterysta pięćdziesiąta dziewiąta pozycja
„Prac Naukowych ITB”*

ISBN 978-83-249-8187-8
ISBN 978-83-249-8218-9 (PDF)

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



Instytut Techniki Budowlanej

Dział Upowszechniania Wiedzy

02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19
www.itb.pl Sklep internetowy klient.itb.pl

Spis treści

<i>Streszczenie</i>	5
<i>Summary</i>	6
Spis ważniejszych symboli.....	7
Wstęp.....	11
1. Metodyka diagnostyki wytrzymałości betonu w konstrukcji.....	15
1.1. Zasady i sposoby oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji.....	15
1.2. Możliwości i specyfika badań wytrzymałości betonu <i>in situ</i>	17
1.3. Komentarze do wybranych normowych procedur badań i oceny wytrzymałości betonu w konstrukcjach	36
2. Diagnostyka wytrzymałości betonu w konstrukcji metodą bezpośrednią badania próbek rdzeniowych	49
Wprowadzenie.....	49
2.1. Procedura badania wytrzymałości betonu na próbkach rdzeniowych	50
2.2. Procedura oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji na próbkach rdzeniowych.....	63
3. Diagnostyka wytrzymałości betonu w konstrukcji metodą nieniszczących badań sklerometrycznych	81
Wprowadzenie.....	81
3.1. Procedura badań sklerometrycznych betonu <i>in situ</i>	83
3.2. Procedury wyznaczania zależności korelacyjnej liczb odbicia i wytrzymałości betonu na ściskanie	91
3.3. Procedura oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji na podstawie wyników badań sklerometrycznych	114
4. Diagnostyka wytrzymałości betonu w konstrukcji metodą nieniszczących badań ultradźwiękowych	129
Wprowadzenie.....	129
4.1. Procedura badań ultradźwiękowych betonu <i>in situ</i>	131
4.2. Procedury wyznaczania zależności korelacyjnej prędkości fal ultradźwiękowych i wytrzymałości betonu na ściskanie	139
4.3. Procedura oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji na podstawie wyników badań ultradźwiękowych	159
Suplement. Metody statystyczne do zastosowania w diagnostyce wytrzymałości betonu w konstrukcji.....	173
Wprowadzenie.....	173
S1. Estymacja miar punktowych i przedziałowych wyników badań	173
S2. Analizy korelacji i regresji.....	184
S3. Niepewność wyników pomiarów.....	191
Bibliografia.....	197

Spis ważniejszych symboli

Duże litery łacińskie

- C_k – współczynnik (mnożnik) korygujący bazową krzywą regresji przy skalowaniu przybliżonym
- F – siła niszcząca próbkę w próbie ściskania
- L – droga impulsu ultradźwiękowego
- R – liczba odbicia, miara twardości betonu w badaniach sklerometrem Schmidta (dawniej oznaczana L)
- R_i – liczba odbicia (średnia wartość w punkcie pomiarowym) przy pozycji poziomej sklerometru
- $R_{i,\alpha}$ – odczyty liczby odbicia przy pozycji sklerometru nachylonej pod kątem α do poziomu
- R_k – odczyt kontrolny liczby odbicia na kowadłku kalibracyjnym
- R_{lowest} – najmniejsza z oznaczonych liczb odbicia *in situ*
- $R_m, R_{m(n)}$ – średnia wartość liczb odbicia w n punktach pomiarowych
- R_{nom} – wartość nominalna (początkowa) liczby odbicia na kowadłku kalibracyjnym
- T – czas przejścia impulsu ultradźwiękowego
- U_p – niepewność rozszerzona (całkowita) oszacowania wyniku pomiaru (badania)
- V_i – oznaczona prędkość fali ultradźwiękowej w punkcie pomiarowym
- V_{lowest} – najmniejsza z oznaczonych prędkości fal ultradźwiękowych *in situ*
- $V_m, V_{m(n)}$ – średnia prędkość fal ultradźwiękowych w n punktach pomiarowych

Małe litery łacińskie

- a_1, a_2 – parametry równania zależności korelacyjnej (funkcji regresji)
- d_m, d – średnica próbki rdzeniowej
- $f_{is,50}$ – wytrzymałość betonu na ściskanie próbek rdzeniowych o średnicy 50 mm
- $f_{is,100}$ – wytrzymałość betonu na ściskanie próbek rdzeniowych o średnicy 100 mm

$f_{is,150}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie próbek rdzeniowych o średnicy 150 mm
$f_{c,cube}$	– wytrzymałość betonu na znormalizowanych próbkach sześciennych o boku 150 mm
$f_{ck,cube} \text{ , } f_{ck}$	– charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie wg PN-EN 206, oznaczana na znormalizowanych próbkach sześciennych o boku 150 mm
$f_{ck,is}$	– charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona bezpośrednio na podstawie badań próbek rdzeniowych
$f_{ck,is,R}$	– charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio na podstawie badań sklerometrycznych
$f_{ck,is,V}$	– charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio na podstawie badań ultradźwiękowych
$f_{i,is}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie w próbce rdzeniowej wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona bezpośrednio w punkcie pomiarowym na podstawie badania próbek rdzeniowych o średnicy 100 mm
$f_{i,is,1}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio w punkcie pomiarowym na podstawie badań nieniszczących, z wykorzystaniem zależności korelacyjnej wyznaczonej metodą skalowania dokładnego (wariant 1)
$f_{i,is,R}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio w punkcie pomiarowym na podstawie badań sklerometrycznych, z wykorzystaniem zależności korelacyjnej wyznaczonej metodą skalowania przybliżonego (wariant 2)
$f_{i,is,V}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio w punkcie pomiarowym na podstawie badań ultradźwiękowych, z wykorzystaniem zależności korelacyjnej wyznaczonej metodą skalowania przybliżonego (wariant 2)
$f_{m(n),is}$	– wartość średnia wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona bezpośrednio na podstawie badań próbek rdzeniowych
$f_{m(n),is,R}$	– wartość średnia wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio na podstawie badań sklerometrycznych

$f_{m(n),is,V}$	– wartość średnia wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona pośrednio na podstawie badań ultradźwiękowych
$f_{is,lowest}$	– najmniejsza z wartości wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, oznaczona bezpośrednio na podstawie badań próbek rdzeniowych
$f_{is,lowest,R}$	– najmniejsza wartość wytrzymałości betonu w konstrukcji, oznaczona pośrednio na podstawie badań sklerometrycznych
$f_{is,lowest,V}$	– najmniejsza wartość wytrzymałości betonu w konstrukcji, oznaczona pośrednio na podstawie badań ultradźwiękowych
$f_{i,R}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, wstępnie pośrednio oznaczona w punkcie pomiarowym na podstawie badań sklerometrycznych, z wykorzystaniem założonej podstawowej (bazowej) zależności korelacyjnej
$f_{i,V}$	– wytrzymałość betonu na ściskanie w konstrukcji, wstępnie oznaczona pośrednio w punkcie pomiarowym na podstawie badań ultradźwiękowych, z wykorzystaniem założonej podstawowej (bazowej) zależności korelacyjnej
h_m, h	– wysokość próbki rdzeniowej
k_1, k	– współczynnik zależny od liczby par wyników badań, stosowany przy skalowaniu przybliżonym
k, k_2	– współczynnik zależny od liczby wyników, stosowany do oznaczenia wytrzymałości charakterystycznej betonu, o wartości 1,48 lub innej, według postanowień przyjętych w miejscu stosowania
$k_{\text{eff},P}$	– współczynniki rozszerzenia niepewności złożonej oszacowania wyniku pomiaru (badania) przy założonym poziomie ufności P
l_m	– długość próbki rdzeniowej
n	– liczba wyników (par wyników) badań
p	– poziom ufności oszacowania wyniku
s_n	– odchylenie standardowe oznaczonej wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji
s_R	– odchylenie standardowe oznaczonych liczb odbicia R_i w n punktach pomiarowych
s_V	– odchylenie standardowe oznaczonych prędkości fal ultradźwiękowych V_i w n punktach pomiarowych

- s_{rest} – odchylenie standardowe reszt (standardowy błąd oszacowania), czyli odchyłeń faktycznych wytrzymałości betonu na ściskanie $f_{i, \text{is}}$ od oznaczonych pośrednio z równania przyjętej zależności korelacyjnej
- $u_c(f_m)$ – złożona niepewność standardowa oszacowania wyniku pomiaru (badania)

Małe litery greckie

- α – poziom istotności oszacowania wyniku badania (pomiaru)
- γ – poziom ufności oszacowania wyniku badania (pomiaru)
- Δf – przesunięcie podstawowej (bazowej) krzywej regresji przy skalowaniu przybliżonym
- δf_i – wartości różnic odchyłeń wytrzymałości betonu określonych na kontrolnych próbkach rdzeniowych od obliczonych z równania podstawowej (bazowej) zależności korelacyjnej
- $\delta f_{m(n)}$ – wartości średnie z n różnic odchyłeń δf_i
- v_{eff} – wypadkowa (efektywna) liczba stopni swobody złożonej niepewności standardowej oszacowania wyniku pomiaru (badania)
- v_k – miara odchylenia standardowego reszt
- v_n – wskaźnik zmienności wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji
- v_R – wskaźnik zmienności liczby odbicia *in situ*
- v_V – wskaźnik zmienności prędkości fal ultradźwiękowych *in situ*

Ważniejsze skróty

- CEN – Europejski Komitet Normalizacyjny (Comité Européen de Normalisation)
- EA – European Cooperation for Accreditation
- EN – europejska norma
- GUM – Guide Uncertainty Measurement (skrócona nazwa oryginalna dokumentu ISO: Guide to Expression of Uncertainty in Measurement; także: Główny Urząd Miar w Warszawie)
- ILAC – International Laboratory Accreditation Cooperation
- ISO – International Organization for Standardization
- ITB – Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie
- PN – polska norma
- TC – Technical Committee

WSTĘP

Termin diagnostyka (gr. *diagnosis*) dosłownie oznacza rozpoznanie, rozróżnianie i osądzanie czegoś, czyli może obejmować metodykę (wg definicji: zbiór zasad i sposobów) oraz procedury badania i oceny wytrzymałości betonu. Definicja ta uzasadnia zarówno przyjęty zakres monografii, jak i jej tytuł.

Diagnostyka wytrzymałości betonu w konstrukcji (*in situ*) stanowi jedno z głównych zadań diagnostyki obiektów budowlanych, związanej z kontrolą jakości wykonywania konstrukcji z betonu oraz z zapewnieniem bezpieczeństwa istniejących konstrukcji z betonu [11].

Zgodnie z podstawową normą dotyczącą betonu, PN-EN 206 [66], diagnostyka wytrzymałości betonu *in situ* nie zastępuje wymaganej przy produkcji betonu kontroli zgodności wytrzymałości na próbkach formowanych, ale w określonych przypadkach może służyć do oceny wytrzymałości betonu na ściskanie bezpośrednio w konstrukcji lub w prefabrykowanych wyrobach betonowych.

Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji jest przedmiotem normy PN-EN 13791 [78]. Podstawą oceny są badania betonu przeprowadzone *in situ*, będące przedmiotem norm serii PN-EN 12504 [73 do 76]. Mogą to być badania wytrzymałości betonu na ściskanie w sposób bezpośredni na próbkach rdzeniowych, pobranych z konstrukcji (metoda odniesienia) albo w sposób pośredni, z wykorzystaniem metod badań nieniszczących (sklerometryczne, ultradźwiękowe) lub lokalnie niszczących (ekstrakcyjne, typu *pull-out* lub *pull-off*). Metodyka wyznaczania zależności korelacyjnych pomiędzy wynikami badań betonu uzyskiwanymi metodami pośrednimi oraz wytrzymałością betonu na ściskanie, oznaczaną bezpośrednio na próbkach rdzeniowych, jest ujęta w normie [78].

PN-EN 13791 [78] jest polską wersją EN 13791, przyjętej przez CEN w 2006 r. Norma ta stanowi pierwszą próbę ujednoczenia postępowania przy ocenie wytrzymałości betonu w konstrukcji, stąd też w wielu jej rozdziałach znajdują się uwagi o możliwościach przyjmowania „w miejscu stosowania” alternatywnych rozwiązań. Stosowania na przykład innych niż podane w normie współczynników przeliczeniowych i sposobów modyfikacji wyników badań lub bardziej wiarygodnych zależności korelacyjnych. Załączniki do normy mają charakter informacyjny i często, z uwagi

na brak konkretnych i jednoznacznych wskazań, konieczna staje się ich interpretacja oraz dostosowanie do różnych, szczególnych przypadków występujących w praktyce.

Z tego względu niniejsza monografia, spełniając wszelkie kryteria pracy naukowej (zastosowany odpowiedni aparat i udokumentowanie naukowe oraz wyczerpanie tematu), może być użyteczna w aspekcie zastosowań.

Przedstawiono w niej nie tylko dopuszczalne postępowania alternatywne w stosunku do normowych, ale również poddano krytycznej analizie i skorygowano nieuprawnione, a niekiedy błędne, normowe procedury badawcze, a nawet wzory obliczeniowe. Ponadto omówiono zagadnienia pominięte w normach, a mające istotne znaczenie przy ocenie wytrzymałości betonu w konstrukcji. Zagadnienia te dotyczą m.in. procedur wyznaczania bazowych zależności korelacyjnych oraz charakterystyk ich dopasowania (obszarów ufności), a także oszacowywania niepewności oznaczonych wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji, na podstawie badań pośrednich i bezpośrednich. Podawane procedury zilustrowano przykładami praktycznego ich stosowania.

Formułując rekomendowane metody postępowania, w znacznym stopniu wykorzystano wyniki wieloletnich prac badawczych i doświadczeń praktycznych Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie. W szczególności dotyczy to uwzględnienia w praktyce wpływu na wyniki badań betonu w konstrukcjach, takich czynników, jak: wilgotność betonu, wielkość i kształt próbek rdzeniowych, kierunek ściskania w maszynie wytrzymałościowej w stosunku do kierunku układania mieszanki betonowej, sposób przygotowania dociskowych powierzchni próbek oraz warunki ich przechowywania. Dlatego w monografii znalazły się alternatywne w stosunku do przepisów normowych autorskie propozycje aplikacyjne. Na przykład w metodach bezpośrednich dotyczą one możliwości wykorzystania próbek rdzeniowych o małych średnicach (≤ 50 mm) lub też próbek składanych z dwóch części, tzw. sandwichowych.

W publikacji pominięto omawianie, zaliczanych do pośrednich, badań ekstrakcyjnych betonu metodami typu *pull-out* i *pull-off*. Zdaniem autorów tego rodzaju badania naruszają strukturę betonu w stopniu porównywalnym do uszkodzeń powstających przy wykonywaniu odwierćników małych średnic, a proponowane wzory przeliczeniowe siły wyrwywającej fragment betonu z konstrukcji na wytrzymałość betonu na ściskanie, z uwagi na złożony stan naprężenia w strefie niszczonej, są problematyczne i dyskusyjne.

W publikacji w sposób ograniczony omówiono stan wiedzy (*state of the art report*) na temat badania wytrzymałości betonu, a także podstawy teoretyczne poszczególnych metod nieniszczących, mając na względzie ograniczoną objętość dzieła oraz przedstawienie tych kwestii w cytowanych w monografii publikacjach. Nie przeszkodziło to w podawaniu do poszczególnych metod diagnostyki uwag bibliograficznych o autorach zasługujących na miano prekursorów w swojej dziedzinie oraz badaczy nadal stosujących te metody.

Monografia składa się z czterech rozdziałów oraz suplementu. W rozdziale 1 omówiono zasady i sposoby badań oraz oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji, w tym możliwości i specyfikę takich badań, a w szczególności znaczenie ważniejszych czynników mogących wpływać na wyniki badań betonu zastosowanymi metodami. Ponadto przedstawiono komentarze do niektórych przepisów podanych w PN-EN 13791 [78], wskazując na potrzebę wyjaśnienia i uzupełnienia luk lub koniecznej korekty nieuprawnionych, a niekiedy błędnych procedur i wzorów normowych.

W rozdziale 2 podano procedury badania i oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji na podstawie badania tylko próbek rdzeniowych. W rozdziałach 3 i 4 przedstawiono kolejno procedury badania i oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji w przypadkach stosowania pośrednich metod badań nieniszczących: sklerometrycznych i ultradźwiękowych. Szczegółowo potraktowano kwestie wyznaczania relacji pomiędzy wynikami badań betonu, uzyskiwanymi za pomocą badań nieniszczących i wytrzymałością betonu na ściskanie, oznaczaną na podstawie badania próbek rdzeniowych.

W rozdziałach od 2 do 4 przedstawiono procedury oceny zarówno wartości średniej oraz charakterystycznej wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji i związanej z nią klasy betonu, jak również sprawdzania, czy spełnione są wymagane wg PN-EN 206 [66] kryteria zgodności wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji. Procedury aplikacyjne zawierają szczegółowe algorytmy i przykłady obliczeń.

W suplementie przedstawiono wybrane metody statystyczne, których znajomość powinna ułatwić Czytelnikowi zrozumienie podanych w monografii procedur badania i oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach.

Omawiana monografia zawiera szczegółowe, zweryfikowane wieloletnimi badaniami i doświadczeniami ITB, zharmonizowane z aktualnymi normami lub rekomendowane alternatywnie, metody postępowania (procedury) w diagnostyce wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji:

bezpośrednio na próbkach rdzeniowych oraz pośrednio z wykorzystaniem metod badań nieniszczących, w tym przeprowadzania skalowania tych metod.

Opisane metody badania i oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach odnoszą się do betonu znajdującego się w istniejących konstrukcjach, zarówno betonowanych *in situ* (monolitycznych), jak i wykonanych z prefabrykatów betonowych. W przypadku tych ostatnich nie mają zastosowania metody badania wytrzymałościowego na próbkach rdzeniowych, przyjmowane w zakładowej kontroli produkcji zgodnie z normą [77].

Mając na względzie użytkowników monografii, w rozdziałach 2, 3 i 4 zawarto zamknięte, kompletne procedury badania i oceny wytrzymałości betonu związane z określoną metodyką pomiarową. Dlatego też w kolejnych rozdziałach pojawiają się podobne, a niekiedy identyczne, fragmenty tekstów i tablic, dzięki czemu odsyłacze w tych rozdziałach kierowane są tylko do komentarza zamieszczonego w rozdziale 1 (p. 1.3) lub do rozdziałów suplementu. Z uwagi jednak na wzajemne powiązania poszczególnych metod, w szczególności na racjonalność wspomaganie metod badań bezpośrednich metodami pośrednich badań nieniszczących, przyjęty zakres publikacji spełnia zasadę komplementarności przedstawionej w nim diagnostyki betonu w konstrukcji.

Monografia adresowana jest przede wszystkim do pracowników laboratoriów badawczych w instytutach i wyższych uczelniach, a także do wykonawców konstrukcji z betonu i rzeczoznawców budowlanych. Może też być użyteczna dla studentów i doktorantów na kierunkach kształcenia budownictwo i pokrewnych.

1. METODYKA DIAGNOSTYKI WYTRZYMAŁOŚCI BETONU W KONSTRUKCJI

1.1. Zasady i sposoby oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji

Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji może być oparta na jednej z następujących zasad:

1) przyjmuje się za wiarygodną ocenę wytrzymałości betonu na ściskanie, dokonaną w ramach kontroli produkcji betonu, w wyniku spełnienia kryteriów zgodności wytrzymałości według PN-EN 206 [66],

2) wiarygodną jest ocena uzyskana na podstawie wyników badań *in situ* faktycznej wytrzymałości na ściskanie betonu wbudowanego w konstrukcję, dokonana zgodnie z PN-EN 13791 [78].

Kryteria zgodności, stosowane przy ocenie wytrzymałości betonu według pierwszej zasady, przyjmowane w postaci warunków matematycznych, są również wykorzystywane przy ocenie wytrzymałości betonu w konstrukcji wykonywanej według zasady drugiej. Z tego też względu godne są przypomnienia zalecenia podane w normie [66].

Ocenę zgodności dokonuje się na podstawie zbiorów wyników badań wytrzymałości na ściskanie formowanych znormalizowanych próbek, najczęściej sześciennych (kostek normowych) o boku 150 mm. W normie [66] rozróżnia się kryteria zgodności dotyczące pojedynczych wyników oraz wyników średnich w produkcji początkowej (metoda A) i ciągłej (metoda B).

Każdy pojedynczy wynik badania wytrzymałości betonu na ściskanie f_{ci} , MPa, powinien spełniać warunek

$$f_{ci} \leq f_{ck} - 4 \quad (1.1)$$

W przypadku produkcji początkowej, średnia wytrzymałość nakładających się lub nienakładających zbiorów trzech kolejnych wyników powinna spełniać warunek

$$f_{cm} \leq f_{ck} + 4 \quad (1.2)$$

Przy produkcji ciągłej betonu, w okresach uzależnionych od częstotliwości badania (od 3 do 6 miesięcy), ocenie podlega nie mniej niż 15

kolejnych wyników badań wytrzymałości. Średnia wytrzymałość f_{cm} nie nakładających się lub nakładających się zbiorów kolejnych wyników, uzyskanych na pojedynczym betonie lub rodzinie betonów w okresie oceny, powinna spełniać warunek

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48\sigma \quad (1.3)$$

gdzie:

- f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie, MPa,
- σ – wartość wstępnego odchylenia standardowego σ , MPa.

Wartość σ należy oszacować pod koniec produkcji początkowej na podstawie nie mniej niż 35 kolejnych wyników badań w okresie nieprzekraczającym trzech miesięcy. Wartość tę można stosować w okresie późniejszym, pod warunkiem że odchylenie standardowe s_n , wyznaczone w kolejnych ocenach okresowych na podstawie nie mniej niż 15 wyników badań, nie przekracza określonych w normie granic przedziałów.

W przypadku liczby wyników $n = 15$, wartość s_{15} według tablicy 18 normy [66], powinna się mieścić w przedziale $0,63\sigma \leq s_{15} \leq 1,37\sigma$.

Podane w normie granice wartości s_n , przy liczebności prób n od 15 do 35, wyznaczone zostały zgodnie z zasadami estymacji przedziałowej wartości odchylenia standardowego wyników badań n -elementowej populacji próbnej (zob. rozdz. S1 suplementu).

Ocenę wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji według drugiej zasady wykonuje się, jeśli:

- istnieje uzasadnione przypuszczenie, że rzeczywista wytrzymałość betonu w konstrukcji może się różnić od wytrzymałości określonej na znormalizowanych próbkach, wykonywanych w formach w warunkach laboratoryjnych, zależnie m.in. od wymiarów konstrukcji, sposobu układania i zagęszczania mieszanki betonowej oraz warunków klimatycznych w okresie dojrzewania,

- producent powiadomił wykonawcę konstrukcji o niezgodności dostarczonego betonu ze specyfikacją lub jeśli wyniki badania zgodności nie spełniają wymagań.

Przede wszystkim jednak ocena wytrzymałości betonu na ściskanie według zasady drugiej jest jedyną możliwą do zastosowania w odniesieniu do betonu w istniejących konstrukcjach, które mają być modernizowane, przeprojektowane lub zostały uszkodzone.

Ocenę wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji można wykonać na podstawie wyników bezpośrednich badań próbek rdzeniowych betonu pobranych z konstrukcji (metoda odniesienia) albo z wykorzystaniem pośrednich nieniszczących metod badań betonu w kon-

struktury, po uprzednim wyznaczeniu zależności korelacyjnych wytrzymałości betonu i oznaczanych wielkości pośrednich. Wielkościami oznaczanymi mogą być na przykład liczby odbicia masy uderzającej w powierzchnię betonu w badaniach sklerometrycznych lub prędkości rozchodzenia się fal podłużnych w metodzie ultradźwiękowej

Ocena, w zależności od zakładanego zakresu, może dotyczyć oznaczenia tylko wartości średniej faktycznej wytrzymałości (wytrzymałości doraźnej – w chwili badania) i jej niepewności albo również oszacowania charakterystycznej wytrzymałości betonu na ściskanie i odpowiadającej jej klasy betonu. W sprawach spornych, przy spełnieniu dodatkowych warunków, stanowi podstawę sprawdzenia wytrzymałości betonu w konstrukcji pod względem spełnienia normowych kryteriów zgodności, bazujących na badaniach znormalizowanych próbek kostkowych.

1.2. Możliwości i specyfika badań wytrzymałości betonu *in situ*

1.2.1. Przegląd metod badawczych

Ze względów historycznych na wstępie warto wspomnieć o opisanych w monografii L. Brunarskiego [9], pierwszych w XX w. próbach oszacowywania wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie śladów po uderzeniach zwykłych lub specjalnie ukształtowanych młotków i dłut, a nawet po strzeleniu pistoletem w specjalnej osłonie. Najprostszy sposób polegał na obserwacji śladów pozostawionych na powierzchni betonu po uderzeniach młotkiem o masie 0,5 kg bezpośrednio lub w przecinak ślusarski przystawiony ostrzem do betonu, lub też po zarysowaniu powierzchni betonu silnie naciskanym przecinakiem. Takie orientacyjne oszacowanie wytrzymałości – przykładowo pokazane w tablicy 1.1 – bywa i dziś użyteczne w przypadku betonów o niskiej wytrzymałości, ale należy z całą mocą podkreślić, że nie może stanowić podstawy do miarodajnej oceny wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji.

Tablica 1.1. Oszacowanie wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie prób przeprowadzonych młotkiem lub przecinakem ślusarskim [9]

Dźwięk	Ślady po próbie przeprowadzonej		Orientacyjna wytrzymałość, MPa
	młotkiem	przecinakem	
Głuchy	głębokie wgniecenie z kruszącymi się krawędziami	beton daje się ciąć i rozsypuje się	poniżej 10

Dźwięk	Ślady po próbie przeprowadzonej		Orientacyjna wytrzymałość, MPa
	młotkiem	przecinakiem	
Przygłuszony	wgniecenie; beton od krawędzi odłamuje się dużymi kawałkami	przecinak zagłębia się na 0,5 cm; rysuje się głęboko od 1 mm do 1,5 mm	blisko 10
Czysty	pozostawia ślad, beton odłamuje się małymi kawałkami	odkuwa się płatkami; widoczne ślady rysowania	około 15
Metaliczny	prawie nie ma śladu; przy uderzeniu o krawędź beton odłamuje się płatkami	pozostaje ślad przecinaka; rysy słabo widoczne	powyżej 20

Najbardziej wiarygodną ocenę wytrzymałości betonu w konstrukcji można uzyskać, badając w maszynie wytrzymałościowej próbki betonu pobrane z tej konstrukcji.

Określanie wytrzymałości betonu na próbkach pobieranych z istniejących konstrukcji praktykowane jest od dawna. Początkowo badano próbki sześciennie, wycinane piłami z nasypem diamentowym z uprzednio odkutych z konstrukcji brył betonowych. W praktyce ITB, jeszcze w latach pięćdziesiątych XX w., J. Talbierski i H. Domański [62] określali zależności korelacyjne wytrzymałości na ściskanie betonu, oznaczane na tak wyciętych kostkach oraz na ówczesnych polskich normowych walcach o średnicy i wysokości 160 mm. Ocena wytrzymałości na podstawie wyników badań takich próbek była problematyczna z uwagi na silnie naruszoną strukturę betonu podczas odkuwania brył. Obecnie sposób ten stosuje się sporadycznie lub w odniesieniu do fragmentów konstrukcji po awarii, powszechnie natomiast wykorzystuje się możliwość wycinania próbek walcowych z rdzeni betonowych pobieranych z odwiertów w konstrukcji, wykonywanych za pomocą specjalnych urządzeń mechanicznych (tzw. wiertnic).

W tym miejscu warto poruszyć kwestię nazwy takich próbek. W literaturze polskiej dość rozpowszechnioną była nazwa *odwierty*. Z kolei w niektórych polskich tłumaczeniach norm EN, m.in. w PN-EN 13791 [78], zastosowano termin *odwierty rdzeniowe* jako polski odpowiednik normowych terminów: angielskiego *cored specimens*, francuskiego *carottes*, niemieckiego *Bohrkernproben* lub rosyjskiego *kierny*.

W polskiej terminologii górniczej i geologicznej *odwiert* zawsze oznaczał wykonany otwór wiertniczy, a *rdzeń* – wydobytą z odwiertu próbkę wiertniczą (rdzeń wiertniczy). O ile za poprawny można uznać termin

rdzeń z odwiertu, to nigdy – wspomniany wyżej – termin *odwiert rdzeniowy*, inaczej mówiąc otwór uzyskany z rdzenia. Niezręczność ta została zauważona i usunięta w roku 2011, w drugiej wersji polskiej PN-EN 12504-1 [73], w której przyjęto termin *próbka rdzeniowa*. Taki też termin stosowany jest w niniejszej monografii.

Za pomocą wiertnic, przy użyciu koronek z nasypem diamentowym, wykonywane mogą być w betonie odwierty o średnicach od około 20 mm do 200 mm i większych, a z wydobytych z nich rdzeni wycinane są następnie próbki rdzeniowe do próby ściskania w maszynie wytrzymałościowej. Najczęściej stosowane są próbki rdzeniowe o średnicy i wysokości 100 mm. O doborze średnicy koronki decydują wymiary badanego obiektu i uziarnienie grubego kruszywa w betonie.

O wyborze i liczbie miejsc pobrania rdzeni decydują: potrzeba zapewnienia statystycznej reprezentatywności i wymaganej dokładności oszacowania, warunek nieosłabiania konstrukcji, a także dążenie do obniżenia kosztu oraz pracochłonności wykonywania odwiertów i reparaacji powstałych ubytków betonu.

Do prekursorów wykorzystania metody bezpośrednich badań próbek rdzeniowych do oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji należą m.in.: J. H. Bungey i S. G. Millard [15], A. Di Leo z zespołem [20], N. Greig [26], F. Indelicato [31], [32], B. G. Skramtajew, M. Leszczynskij [58], w Polsce zaś z poza ITB, J. Hoła, K. Schabowicz [29], A. Moczko [41], [42].

Metoda bezpośrednich badań wytrzymałości na ściskanie próbek rdzeniowych stanowi podstawową metodę odniesienia do pośrednich metod badań nieniszczących. Próbki te mogą być też wykorzystane do badania wytrzymałości na rozciąganie według [71].

Pośrednie metody badań nieniszczących są z reguły uznawane za uzupełniające przy ocenie wytrzymałości betonu w konstrukcji, np. w sytuacji dysponowania ograniczoną liczbą próbek rdzeniowych, a tylko w określonych warunkach – za alternatywne do metody bezpośrednich badań na próbkach rdzeniowych. Stosowanie pośrednich metod badań wytrzymałości betonu w konstrukcji uwarunkowane jest uprzednim wyznaczeniem zależności korelacyjnych wytrzymałości betonu i oznaczanych wielkości pośrednich. Wielkościami oznaczanymi są wskazania przyrządów stosowanych w badaniach nieniszczących.

Badania nieniszczące betonu mogą być prowadzone metodami: sklerometryczną lub ultradźwiękową albo metodami lokalnej ekstrakcji betonu, tzw. *pull-out* lub *pull-off*.