

mgr inż. Aleksandra Powęzka^{1*)}

ORCID: 0000-0002-5749-8618

inż. Mateusz Banaś¹⁾

ORCID: 0000-0003-4521-6334

Badanie jednorodności i wytrzymałości betonu na ściskanie metodą sklerometryczną

Examination of homogeneity and compressive strength of concrete by the sclerometric method

DOI: 10.15199/33.2020.12.01

Streszczenie. W artykule opisano metodę badań nieniszczących wykonanych po 1, 7, 28 dniach dojrzewania betonu. Pomiarzy zostały wykonane młotkiem Schmidta typu N. Stworzono dla badanego betonu krzywą skalowania. Oszacowano wytrzymałości betonu na ściskanie z uprzednio wyznaczonych wykresów wytrzymałości na ściskanie w funkcji liczby odbicia. Sprawdzono hipotetyczną krzywą regresji na podstawie badań próbek wykonanych w prasie wytrzymałościowej. Dokonano oceny jednorodności stwardniałego betonu. Ponadto omówiono kwestie prowadzenia badań metodą sklerometryczną, pobierania próbek, przygotowania powierzchni do badania.

Słowa kluczowe: metody badawcze; metoda sklerometryczna; młotek Schmidta; wytrzymałość betonu na ściskanie; jednorodność betonu.

Abstract. The article presents the methodology of non-destructive testing performed after the 1st, 7th, 28th day of concrete maturing. The measurements were made with a type N. Schmidt hammer. A scaling curve was created for the concrete tested. The compressive strength of concrete from the previously determined compressive strength graphs as a function of the number of reflections was estimated. The hypothetical regression curve was verified on the basis of tests of samples made in the strength press. The homogeneity of hardened concrete was evaluated. In addition, the following issues were discussed: conducting sclerometer testing, sampling, preparing the surface for testing.

Keywords: research methods; sclerometric method; Schmidt hammer; compressive strength of concrete; concrete homogeneity.

Do oceny cech fizycznych i wytrzymałościowych materiałów w różnych fazach realizacji i eksploatacji, w sytuacji gdy nie ma możliwości przeprowadzenia pełnych badań niszczących, powinny być stosowane metody nieniszczące lub seminiszczące. Wśród badań nieniszczących stosowane są metody optyczne, akustyczne, radiologiczne, elektromagnetyczne, laserowe, termograficzne, sklerometryczne oraz obciążenia próbne. Badania sklerometryczne polegają na pomiarze wielkości odcisku lub odskoku ciężaru po uderzeniu w beton. Pozwalają one na oszacowanie wytrzymałości w konstrukcji z zastosowaniem właściwej korelacji twardość-wytrzymałość.

Wytrzymałość powierzchniowej warstwy betonu znacznie różni się od wytrzymałości warstwy wgłębnej. Młotek Schmidta jest powszechnie używany na całym świecie ze względu na dużą

łatwość w obsłudze (badanie może przeprowadzić jedna osoba) i niską cenę urządzenia. Metoda sklerometryczna miała jednak zawsze zwolenników i przeciwników. Zwolennicy widzieli w niej możliwość łatwego określenia wytrzymałości, przeciwnicy dostrzegali bardzo małą wiarygodność. Badanie powierzchniowe może być obarczone błędem pomiarowym $\pm 20\%$. Wyniki badań sklerometrycznych bez wspomagających badań niszczących mogą być mało miarodajne [1, 2, 4, 5, 15 ÷ 19].

Celem artykułu jest przybliżenie najczęściej stosowanej metody nieniszczącej oraz wymagań zawartych w normach [3, 7, 9, 10], a także określenie jednorodności i wytrzymałości betonu na ściskanie na podstawie badań własnych prowadzonych przy użyciu młotka Schmidta typu N. Metoda sklerometryczna może ułatwić prewentywom właściwe realizowanie obowiązków służbowych, gdyż pozwala dość szybko określić nośność danego elementu konstrukcyjnego w istniejącym obiekcie oraz stwierdzić, czy zachowuje odporność ogniową oraz spełnia funkcję oddzielającą.

Założenia metody sklerometrycznej

Sklerometr służy do badania betonu w konstrukcjach i prefabrykacjach betonowych, żelbetowych i sprężonych. Główne obszary zastosowania młotka Schmidta to ocena jednorodności betonu w konstrukcji, lokalizowanie obszarów konstrukcji o obniżonej jakości betonu oraz oszacowanie wytrzymałości na ściskanie. Prowadząc pomiary za pomocą sklerometru, należy mieć świadomość, że na badanie mają wpływ następujące czynniki: rodzaj powierzchni; duża porowatość; wiek betonu; wilgotność powierzchni; karbonatyzacja; temperatura; kalibracja sklerometru; przemieszczenie betonu podczas badania; kierunek badania; wykończenie powierzchni [3, 6, 7, 10].

Do badań najlepiej nadają się powierzchnie pionowe konstrukcji, które powinny być gładkie i oczyszczone, bez miejsc: uszkodzonych, spękanych, skorodowanych, z widocznymi porami, kawernami, miejsc nagromadzenia mleczka cementowego i grubego kruszywa, warstw betonu przemarzniętego w okresie dojrzewania oraz miejsc leżących

¹⁾ Szkoła Główna Służby Pożarniczej; Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa i Ochrony Ludności

^{*)} Adres do korespondencji: apowezka@sgsp.edu.pl

na śladach szczelin z deskowania. Przewodzenie badań sklerometrycznych jest niedopuszczalne w linii przebiegania przerwy technologicznej w betonowaniu, w miejscach z wkładkami stalowymi, ceramicznymi, drewnianymi itp. lub z pustkami znajdującymi się na głębokości 3 cm od badanej powierzchni. Miejsca do badań należy wybierać równomiernie na całej powierzchni elementu lub konstrukcji. Ich minimalną liczbę określono w [3, 7, 10].

Za wynik badania należy uznać wartość średnią z wszystkich odczytów, przyjmując poprawkę uwzględniającą wpływ ustawienia młotka. Do poprawnego określenia wytrzymałości betonu na ściskanie metodą sklerometryczną niezbędne jest korzystanie z zależności empirycznej R-L. Zależność wytrzymałości betonu na ściskanie od liczby odbicia wyznacza się, stosując metodę statystycznej analizy korelacyjnej wyników badanych próbek betonowych, zwaną skalowaniem dokładnym lub dobierając hipotetyczną krzywą regresji odpowiednio do składu, technologii wykonania, warunków pielęgnacji oraz wieku i wilgotności betonu, zwaną skalowaniem przybliżonym. Zaleca się stosowanie zależności w postaci paraboli o równaniu (1):

$$R = aL^2 + bL + c \quad (1)$$

gdzie:

R – wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa];
L – liczba odbicia;

a, b, c – parametry określone metodą najmniejszych kwadratów odchylen wytrzymałości.

Stosując hipotetyczną krzywą regresji, każdorazowo należy sprawdzić liczbę odbicia wyznaczoną młotkiem Schmidta i wytrzymałość na ściskanie w maszynie wytrzymałościowej. Jak wynika z przepisów, należy pamiętać o przeprowadzeniu badań kontrolnych na co najmniej trzech próbkach betonowych w przypadku badania próbek wyciętych z konstrukcji lub wykonanych podczas jej betonowania bądź dziewięciu próbek wykonanych dodatkowo wg projektowanego składu betonu, jeżeli nie jest możliwe wycięcie próbek z konstrukcji.

Krzywa regresji opisana wzorem (1) musi spełniać następujące warunki: paraboliczny współczynnik regresji jest większy niż 0,75; średnie kwadratowe odchylenie względne jest mniejsze niż 12%.

Ocena jakości betonu

Wskaźniki charakteryzujące jakość betonu to: średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (f_{cm}); odchylenie standardowe wytrzymałości (s); dolna granica wytrzymałości na ściskanie ($f_{c,cub}^G$); współczynnik zmienności (v).

Jednorodność betonu to rozkład wartości parametrów wytrzymałościowych na badanej powierzchni elementu konstrukcyjnego. Określana jest na próbkach ściskanych w maszynie wytrzymałościowej. Zmianę jednorodności betonu w badanej konstrukcji oznacza się na podstawie zależności empirycznej oraz statystycznej analizy wyników pomiarów. Dodatkowo oceny jednorodności stwardniałego betonu dokonać można na podstawie współczynnika zmienności i współczynnika jednorodności przedstawionego w tabeli 1.

Tabela 1. Ocena jednorodności betonu wg współczynnika jednorodności i współczynnika zmienności [7, 8]

Table 1. Assessment of concrete homogeneity according to homogeneity coefficient and coefficient of variation [7, 8]

Współczynnik		Jednorodność betonu/stopień oceny
jednorodności k [%]	zmienności v [%]	
> 0,84	< 10	bardzo dobry
0,75 – 0,84	10 – 15	dobry
0,67 – 0,74	16-20	mierny
< 0,67	> 20	zły

Współczynnik jednorodności [%] jest obliczany jako stosunek minimalnej wytrzymałości do średniej wytrzymałości betonu na ściskanie (2)

$$k = f_{c,min} / f_{cm} \quad (2)$$

gdzie:

k – współczynnik jednorodności;

$f_{c,min}$ – minimalna wytrzymałość betonu na ściskanie;

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie.

Wytrzymałość gwarantowana $f_{c,cub}^G$ betonu, czyli dolna granica wytrzymałości na ściskanie, obliczana jest wg wzoru (3) z prawdopodobieństwem 95% i obecnie odpowiada ona wytrzymałości charakterystycznej [MPa]. Jest zatem podstawą do kwalifikowania danego betonu do odpowiedniej klasy wytrzymałości.

$$f_{c,cub}^G = f_{cm} - t_s \cdot s \quad (3)$$

gdzie:

t_s – parametr zależny od przyjętego rozkładu wytrzymałości, liczności populacji wyników oraz prawdopodobieństwa przekroczenia 0,95;
s – odchylenie standardowe.

Do obliczeń przyjęto rozkład normalny z prawdopodobieństwem 95%, w przypadku którego wartość parametru $t_s = 1,645$.

Współczynnik zmienności [%] jest ilorazem zmienności danej cechy. Zależy od odchylenia standardowego i średniej arytmetycznej wytrzymałości betonu. Opisany jest wzorem (4):

$$v = s / f_{cm} \quad (4)$$

gdzie:

v – współczynnik zmienności;

s – odchylenie standardowe;

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu.

Odchylenie standardowe wytrzymałości należy obliczać wg wzoru (5):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} - f_{cm})^2}{(n - 1)}} \quad (5)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe;

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu;

f_{ci} – wytrzymałość i-tej próbki, wyznaczona w maszynie wytrzymałościowej;

n – liczba próbek.

Charakterystyka mieszanki betonowej

Zaprojektowano samozagęszczalną mieszankę betonową klasy C50/60 składającą się z kruszywa, cementu i wody, dodatku mineralnego oraz domieszek chemicznych, a także wprowadzono do mieszanki powietrze (tabela 2). Projektując mieszankę betonową dobrano odpowiednie klasy ekspozycji, tj. X0, XC4, XD3, XS3, XF1, XA1. Ponadto uwzględniono szczególne formy agresywnych lub pośrednich oddziaływań powstałych na skutek ścierania. Mieszanka ma klasę ścieralności XM1 oznaczającą umiarkowaną abrazję. Dzięki domieszce napowietrzającej wprowadzono

Tabela 2. Skład laboratoryjny mieszanki betonowej na 1 m³

Table 2. Laboratory composition of concrete mix for 1 m³

Nazwa składnika	Ilość
Piasek 0/2 [kg]	591,00
Grys 2/8 [kg]	476,00
Grys 8/16 [kg]	610,00
CEM I 42,5 R [kg]	440,00
Woda [kg]	164,00
Zawartość powietrza w mieszance [%]	1,50
Mączka wapienna [kg]	85,00
VC 20 HE [1,20%]	5,28
Stabilizer 4R [0,16%]	0,70
Rapid 2.1 [1,00%]	4,40

dono dodatkowe pory powietrzne w klasie XF1 w ilości 1,50%. Zawartość powietrza w mieszance określono, wykorzystując metodę ciśnieniową wg procedury [11]. Współczynnik wodno-cementowy (w/c) projektowanego betonu wynosi 0,345, a konsystencja mieszanki betonowej SCC odpowiada klasie SF1.

Przebieg i wyniki badań laboratoryjnych

Podstawę analizy stanowią wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wyznaczone na normowych próbkach sześciennych o boku 150 mm z betonu (SCC) o klasie C50/60. Wszystkie pomiary liczby odbicia wykonano jednym młotkiem Schmidta typu N o energii uderzenia 2,25 Nm. Kolejno przez 19 dni pobierano 3 próbki do badania, które przechowywano do czasu badania w warunkach produkcji. Badania wykonywano na powierzchni gładkiej. Przebieg formowania i badania próbek był zgodny z wymaganiami norm [9, 12 ÷ 14]. Wytrzymałość betonu na ściskanie badano po 1, 7 i 28 dniach dojrzewania (tabele 3 ÷ 5). Pomiary liczby odbicia w przypadku losowo wytypowanych miejsc, położonych w odległości powyżej 3 cm od krawędzi próbki, wykonano młotkiem Schmidta.

Tabela 3. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie f_{ci} betonu C50/60 po jednym dniu dojrzewania

Table 3. Results of the compressive strength test for f_{ci} concrete C50/60 after one day of maturing

Data produkcji	Data badania	Odczyt średni liczby odbicia L_i [-]	Metoda niszcząca f_{ci} [MPa]
13.04	14.04	23	17,5
14.04	15.04	16	8,2
15.04	16.04	30	33,0
16.04	17.04	28	26,3
20.04	21.04	24	21,5
21.04	22.04	15	7,0
22.04	23.04	23	17,5
23.04	24.04	27	22,0
27.04	28.04	30	35,8
28.04	29.04	31	33,1
29.04	30.04	21	12,4
04.05	05.05	20	10,7
05.05	06.05	23	15,6
06.05	07.05	25	20,2
07.05	08.05	28	27,0
11.05	12.05	20	13,8
12.05	13.05	20	14,4
13.05	14.05	22	15,2
14.05	15.05	22	16,6

Tabela 4. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie f_{ci} betonu C50/60 po siedmiu dniach dojrzewania

Table 4. Results of the compressive strength test for f_{ci} concrete C50/60 after seven days of maturing

Data produkcji	Data badania	Odczyt średni liczby odbicia L_i [-]	Metoda niszcząca f_{ci} [MPa]
13.04	20.04	38	55,5
14.04	21.04	38	58,4
15.04	22.04	35	58,9
16.04	23.04	42	63,8
20.04	27.04	39	60,8
21.04	28.04	39	54,8
22.04	29.04	39	61,4
23.04	30.04	38	58,8
27.04	04.05	39	63,4
28.04	05.05	40	54,8
29.04	06.05	38	53,4
04.05	11.05	36	56,1
05.05	12.05	35	57,7
06.05	13.05	37	58,4
07.05	14.05	34	57,4
11.05	18.05	33	55,6
12.05	19.05	38	57,3
13.05	20.05	36	55,5
14.05	21.05	38	48,5

Tabela 5. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie f_{ci} betonu C50/60 po dwudziestu ośmiu dniach dojrzewania

Table 5. Results of the compressive strength test for f_{ci} concrete C50/60 after twenty eight days of maturing

Data produkcji	Data badania	Odczyt średni liczby odbicia L_i [-]	Metoda niszcząca f_{ci} [MPa]
13.04	11.05	45	73,2
14.04	12.05	47	71,5
15.04	13.05	47	71,4
16.04	14.05	49	67,9
20.04	18.05	48	69,1
21.04	19.05	49	69,9
22.04	20.05	48	75,4
23.04	21.05	47	74,3
27.04	25.05	50	77,8
28.04	26.05	47	74,1
29.04	27.05	42	66,5
04.05	01.06	46	63,9
05.05	02.06	43	64,5
06.05	03.06	43	62,5
07.05	03.06	44	67,8
11.05	08.06	46	64,7
12.05	09.06	48	73,1
13.05	10.06	46	69,3
14.05	11.06	47	66,5

Analiza wyników

W wyniku badań nieniszczących uzyskano dwa zbiory o liczebności 19. Pierwszy składa się z elementów L_i (liczba odbicia młotka Schmidta), drugi f_{ci} (wytrzyma-

łość i-tej próbki wyznaczonej w maszynie wytrzymałościowej). W przypadku każdego zbioru obliczono charakterystyki rozproszenia wyników, które zamieszczono w tabeli 6. Wszystkie pomiary wykonano na powierzchni pionowej próbek.

Tabela 6. Średnia liczba odbicia i charakterystyki rozproszenia wyników – metoda nieniszcząca

Table 6. Average reflection number and dispersion characteristics of results – non-destructive method

Czas dojrzewania próbek [dni]	Średnia liczba odbicia L_{sr} [MPa]	Odchylenie standardowe liczb odbicia S_L [MPa]	Współczynnik zmienności liczb odbicia v_L [%]
1	24,5	3,5	14,5
7	37,5	2,2	5,9
28	46,4	2,2	4,7

Tabela 7 zawiera wskaźniki charakteryzujące jakość betonu na podstawie badań nieniszczących. Znając wiarygodną zależność liczby odbicia od wytrzymałości na ściskanie, można oszacować wytrzymałość betonu w każdym zbadanym miejscu. Następnie należy obliczyć średnią wartość wytrzymałości na ściskanie oraz odchylenie standardowe. Badania ograniczyły się do przypadku, gdy krzywe regresji opisane są za pomocą paraboli drugiego stopnia. Na podstawie uzyskanych wyników ściskania z maszyny wytrzymałościowej dobrano i sprawdzono hipotetyczne krzywe regresji (rysunek 1), utworzone zgodnie z Instrukcją ITB [7]. Dobrane zostały odpowiednio do składu, technologii wykonania, warunków pielęgnacji, wieku i wilgotności betonu. Przyjęte współczynniki poprawkowe w zależności od wieku oraz wilgotności betonu w stanie powietrzno-suchym przedstawiono w tabeli 8.

Następnie sprawdzono wiarygodność założonych hipotetycznych krzywych, określono wytrzymałość betonu dla średniej liczby odbicia $f_{cm,h}$ oraz obliczono wg wzoru średnie kwadratowe odchylenie względne:

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{0,i} - f_{ci}}{f_{0,i}} \right)^2}{n-1}} \leq 0,12 \quad (6)$$

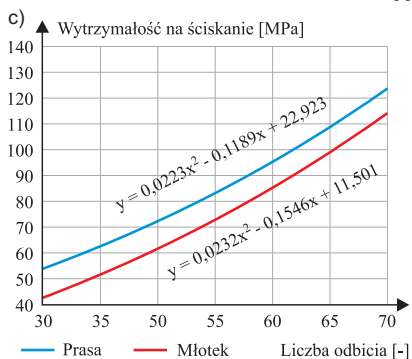
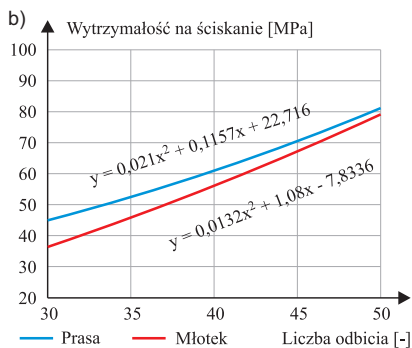
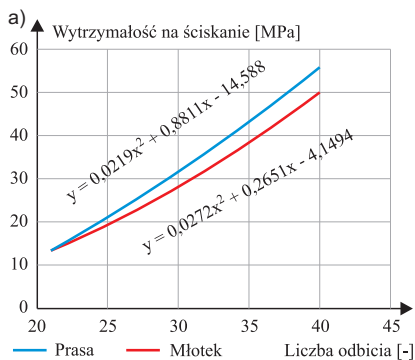
Powstałe krzywe skorygowano współczynnikiem korygującym obliczonym ze wzoru:

$$C_k = f_{cm} / f_{cm,h} \quad (7)$$

Tabela 7. Wytrzymałość na ściskanie – metoda niszcząca

Table 7. Compressive strength – destructive method

Czas dojrzewania próbek [dni]	Wytrzymałość na ściskanie			Odchylenie standardowe S_f [MPa]	Niepewność pomiarowa V_f [%]	Współczynnik jednorodności k_f [-]
	średnia f_{cm} [MPa]	gwarantowana $f_{c,gu}$ [MPa]	minimalna $f_{c,min}$ [MPa]			
1	19,3	5,6	7,0	8,39	43,36	5,59
7	57,4	51,5	48,5	3,60	6,26	0,90
28	69,7	62,6	62,5	4,31	6,19	0,59



Rys. 1. Hipotetyczna krzywa regresji – badanie wytrzymałości: a) po jednym dniu; b) po siedmiu dniach; c) po dwudziestu ośmiu dniach

Fig. 1. Hypothetical regression curve – strength test: a) after one day; b) after seven days; c) after twenty eight days

Wyniki zamieszczono w tabeli 8. Średnie względne odchylenie kwadratowe V_k spełnia warunek (7), co pozwala na dobranie optymalnych krzywych do oceny wytrzymałości badanego betonu. Hipotetyczne krzywe mogą być zatem zastosowane do oceny wytrzymałości betonu zgodnie z przedmiotowymi normami.

Tabela 8. Dane wyjściowe do stworzenia krzywych regresji

Table 8. Output for creating regression curves

Czas dojrzewania próbek [dni]	Średnia wytrzymałość betonu w próbkach, określona z założonej hipotetycznej krzywej $f_{cm,h}$ [MPa]	Współczynnik korygujący C_k [-]	Średnie kwadratowe odchylenie względne V_k [%]	Współczynnik poprawkowy zależny od	
				wiek betonu γ_1 [-]	wilgotności betonu γ_2 [-]
1	17,8	1,09	9,3	1,20	1,00
7	51,2	1,12	9,7	1,20	1,00
28	54,4	1,28	6,5	1,00	1,00

Optymalne współczynniki korygujące pozwoliły na wyznaczenie równań optymalnych krzywych regresji:

■ $f_{cm} = 0,0227 \cdot L^2 + 0,2209 \cdot L - 3,4578$ (po jednym dniu);

■ $f_{cm} = 0,0095 \cdot L^2 + 1,0213 \cdot L - 15,528$ (po siedmiu dniach);

■ $f_{cm} = 0,0232 \cdot L^2 + 0,1546 \cdot L + 9,5005$ (po dwudziestu ośmiu dniach).

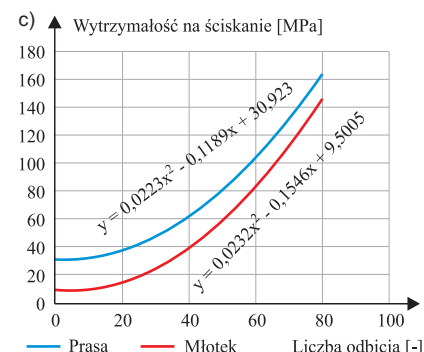
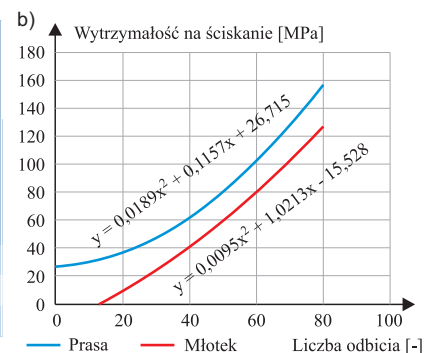
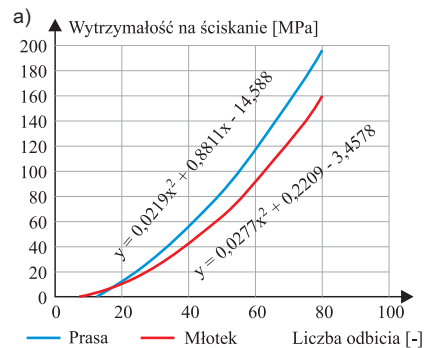
Optymalne krzywe regresji przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie wyników pomiarów sklerometrycznych młotkiem Schmitda typu N określono statystyczne wskaźniki wytrzymałości betonu. Przyjęto zależności empiryczne określone w sposób przybliżony. Wyznaczono statystyczne wskaźniki wytrzymałości betonu, które podano w tabeli 9 w przypadku średniej liczby odbicia młotka i współczynnika zmienności liczb odbicia zamieszczonych w tabeli 6. Na podstawie przeprowadzonych badań, jednorodność betonu oceniono jako: złą (w przypadku czasu dojrzewania betonu 1 dzień) oraz bardzo dobrą po okresie dojrzewania betonu 7 i 28 dni.

Tabela 9. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykonane młotkiem Schmitda

Table 9. Compression strength test results made with Schmidt's hammer

Czas dojrzewania próbek [dni]	Wytrzymałość na ściskanie		Odchylenie standardowe populacji S_R [MPa]	Niepewność pomiarowa V_R [%]	Współczynnik jednorodności k_R [%]
	średnia f_{cm} [MPa]	minimalna f_{cm}^G [MPa]			
1	19,3	6,8	7,67	39,67	0,35
7	57,4	49,1	5,07	8,84	0,86
28	69,7	60,6	5,55	7,96	0,87



Rys. 2. Optymalna krzywa regresji – badanie wytrzymałości: a) po jednym dniu; b) po siedmiu dniach; c) po dwudziestu ośmiu dniach

Fig. 2. Optimal regression curve – strength test: a) after one day; b) after seven days; c) after twenty eight days

Podsumowanie

Metoda sklerometryczna pozwala na wykonywanie dużej liczby pomiarów powierzchniowej twardości betonu badanego elementu. Znakomicie nadaje się do wykrywania odspojień i obszarów osłabionego betonu, a uzyskane wyniki świadczą o jej dużej dokładności w po-

równaniu z badaniami wykonanymi za pomocą maszyny wytrzymałościowej pod warunkiem, że badający nie będzie bezkrytycznie korzystał z dostępnych tablic i nomogramów. Metoda wymaga dodatkowo pobrania próbek z konstrukcji. Z pomiarów sklerometrycznych uzyskuje się wyłącznie informacje o jakości przypowierzchniowej warstwy betonu.

Metoda sklerometryczna doskonale nadaje się do badania wytrzymałości na ściskanie w przypadku, gdy np. producent powiadomił o niezgodności betonu lub jeśli wyniki badań zgodności nie spełniają wymagań. Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń stwierdzono, że:

- dzięki poprawnemu określeniu współczynnika korygującego można wyznaczyć optymalną krzywą regresji;
- jakość betonu została określona na podstawie dwóch współczynników: **jednorodności**, wynoszącego powyżej 0,84 oraz **zmienności** – poniżej 10%. Jakość betonu określona po 7 i 28 dniu dojrzewania uznano za bardzo dobrą ze względu na mały współczynnik zmienności. Wartości współczynników zmienności wykazują tendencję do zmniejszania się ze wzrostem wytrzymałości betonu;
- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach dojrzewania wynosi 69,7 MPa ± 5,55 MPa.

Stwierdzono, że w przypadku wszystkich badanych kostek spełnione są wymagania dotyczące klasy betonu co najmniej C40/50.

Uzyskane wyniki i sformułowane na ich podstawie wnioski mają wymiar praktyczny dla wykonawców, konstruktorów oraz zakładów prefabrykacji. Rekomendujemy zastosowanie młotka Schmidta do badań stwardniałego betonu w konstrukcjach monolitycznych i elementach prefabrykowanych.

Literatura

[1] Al-Bavati Ahmed Faleh. 2018. „Statistical Equations to Estimate the In-situ Concrete Compressive Strength from Non-destructive Tests”. *Journal of Engineering*, vol. 24, no. 11: 53 – 67. DOI: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2018.11.05>.

[2] Alyamac Kürsat Esat, Yavuzhan Tas, Zulfu Cinar Ulucan, Merve Acikgenc Ulas. Estimation of concrete strength combining rebound hammer

and Windsor probe test methods, SMAR 2017- Fourth Conference on Smart Monitoring. *Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, 1-8.

[3] ASTM C805 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.

[4] Brencich Antonio, Giancarlo Cassini, Davide Pera, Giuseppe Riotta. 2013. „Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test”. *Civil Engineering and Architecture*, 1 (3): 66 – 78. DOI: 10.13189/cea.2013.010303.

[5] Drzewiecki Adam. 2016. „Technologie badań elementów betonowych ze szczególnym uwzględnieniem nieniszczących metod szacowania wytrzymałości na ściskanie z użyciem młotka Schmidta typu N”. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, 3: 15 – 17.

[6] http://www.structum.pl/mlolek_schmidta_pomiary_mlotkiem_schmidta_badanie_wytrzymałości_betonu-1-146-4_5.html, 30.08.2018 r.

[7] Instrukcja stosowania młotków Schmidta do nieniszczącej kontroli jakości betonu. Instrukcja 210. ITB, Warszawa 1977.

[8] Kurnik Zdzisław. 1975. *Tablice pomocnicze do projektowania betonu*. Kraków. Politechnika Krakowska, [33].

[9] PN-EN 12390-3:2009 Badanie betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.

[10] PN-EN 12504-2:2013-3 Badanie betonu w konstrukcjach – Część 2: Badania nieniszczące – Oznaczenie liczby odbicia.

[11] PN-EN 12350-7 Badanie mieszanki betonowej – Część 7: Badanie zawartości powietrza – Metody ciśnieniowe.

[12] PN-EN1008:2004 Woda zarobowa do betonu – Specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu.

[13] PN-EN 12350-8:2012 Badania mieszanki betonowej – Część 8: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą rozplywu stożka.

[14] PN-EN 2390-2:2001 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[15] Rubene Sanita, Martines Vilnitis. 2014. „Use of the Schmidt rebound hammer for non destructive concrete structure testing in field”. *Technical Transactions Civil Engineering*, 1-B: 13 – 19.

[16] Runkiewicz Leonard, Jan Sieczkowski. 2015. „Dostosowanie polskich doświadczeń w zakresie nieniszczącej oceny wytrzymałości betonu do wymagań PN-EN”. *Przegląd Budowlany* 12: 27 – 33.

[17] Runkiewicz Leonard. 2016. *Wzmacnienie konstrukcji żelbetowych*. Warszawa. Poradnik, ITB.

[18] Runkiewicz Leonard, Jan Sieczkowski. 2018. *Ocena wytrzymałości betonu w konstrukcji na podstawie badań sklerometrycznych*. Warszawa. Poradnik, Instytut Techniki Budowlanej.

[19] Shariati Mahdi, Nor Hafizah Ramli-Sulong, K. H. Mohammad Mehdi Arabnejad, Payam Shafiqh, Hamid Sinaei. 2011. „Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests”. *Scientific Research and Essays*, vol. 6 (1), 213 – 220. DOI: 10.5897/SRE10.879.

Przyjęto do druku: 22.06.2020 r.



ARBOCEL P – The Power of Innovation

- – nieograniczone możliwości regulacji konsystencji, – łatwe i szybkie mieszanie,
- – zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@jrs.pl