



SŁAWOMIR KARAS
Politechnika Lubelska
s.karas@pollub.pl



TOMASZ NOWACKI
Stachema Polska
t.nowacki@stachema.pl

Nowa norma do badań wytrzymałości na ściskanie betonu in situ

W grudniu 2019 r. Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) uznał Normę Europejską EN 13791:2019 za Polską Normę nazywając ją PN-EN 13791:2019-12 *Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych* [1]. Nowa norma zastępuje dotychczasową normę PN-EN 13791:2008 [2].

W nowej normie można odnaleźć kontynuację i rozwinięcia niektórych tematów z normy [2], ale także fragmenty nowe lub wcześniej pominięte, a istotne i znane z dziedziny badań betonu in situ.

Norma [1] napisana jest w języku angielskim, a na język polski przetłumaczono jedynie stronę tytułową, przedmowę krajową i notę uznaniową. Chociaż publikacja norm PN-EN w języku angielskim wydaje się być uzasadniona, z uwagi na coraz bardziej powszechną znajomość

języka angielskiego wśród inżynierów budownictwa, to jednak w praktyce na budowach stanowi to spore utrudnienie.



Fot. 1. Pobieranie rdzenia betonu z oczepu filara



Fot. 2. Próbk rdzeniowe $h:d = 1:1$, $d = 10$ cm

Stylistycznie norma jest napisana niejednolicie. Niestety charakterystyczna dla techniki syntetyczna precyzja została zastąpiona rozbudowaną opisowością. Miejscami autorzy normy wydają się celowo unikać ścisłego definiowania terminów i określeń, a wprowadzone definicje są skracane lub modyfikowane. Z tego powodu, w niniejszym artykule zostały przywołane niektóre definicje nowych terminów wraz z ich autorskim tłumaczeniem na język polski.

Norma [1], w szczególności, podaje metody i procedury oceny charakterystyki wytrzymałości na ściskanie in situ w konstrukcjach i prefabrykacjach przy zastosowaniu badań bezpośrednich (rdzeniowych) i badań pośrednich (bezinwazyjnych).

Na fotografiach 1 i 2 przedstawiono pobieranie rdzenia betonu z oczepu filara mostu i wykonane z niego próbki rdzeniowe.

Ocena wybranych przepisów normy

Wyniki badań bezpośrednich (direct methods) na próbkach rdzeniowych są uznawane za najbardziej wiarygodne, jednakże do badania betonu w istniejących konstrukcjach stosuje się powszechnie metodę sklerometryczną oraz betonoskopię. W normie [1] ten zakres jest nazwany jako badania badaniami pośrednimi (indirect methods).

Uznając priorytet wyników badań na próbkach rdzeniowych, w niniejszej dyskusji treści normy [1] skupiono się właśnie na tym rodzaju badań, ograniczając do minimum komentarze do badań pośrednich.

W tabeli 2 normy [1] zamieszczono skróty dotyczące wytrzymałości na ściskanie występujące wcześniej w normie [2] oraz nowe, oto niektóre z nich:

$f_c = f_{ck} = f_{c,cyl}$ lub $f_{c,cube}$ – wytrzymałość na ściskanie wyznaczona na próbkach znormalizowanych walcowych lub sześciennych. Próbk do badań należy pobierać zgodnie z normą PN-EN 12350-1, wykonanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych powinna odpowiadać metodom zawartym w normie PN-EN 12390-2, natomiast wyznaczenie wytrzymałości na ściskanie powinno odpowiadać zasadom zawartym w normie PN-EN 12390-3.

W celu uporządkowania nazewnictwa poniżej przedstawiono jeszcze relację obejmującą zarówno wyniki z badań

na próbkach cylindrycznych, jak i sześciennych, które występują w klasie wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach znormalizowanych, a mianowicie:

$$f_c = \begin{cases} f_{ck} = f_{c,cyl} \\ f_{c,cube} \end{cases} \rightarrow C f_{ck} / f_{c,cube} \quad (1)$$

w którym:

$C f_{ck} / f_{c,cube}$ – oznaczenie klasy wytrzymałości na ściskanie betonu.

W normie [1] podstawowym pojęciem jest $f_{c,is}$ – wytrzymałość charakterystyczna in situ betonu na ściskanie (characteristic in situ compressive strength) – czyli wartość wytrzymałości, poniżej której oczekuje się, że jest 5% wyników wszystkich przeprowadzonych testów. Badania prowadzono na próbkach/walcach o proporcji $h:d$ równej 2:1, przy średnicy ≥ 75 mm.

Jednocześnie w normie [1] przyjęto analogiczne oznaczenie $f_{c,core}$ obejmujące dwa terminy:

$$f_{c,is} = f_{c,core} = \begin{cases} f_{c,2:1core} \\ f_{c,1:1core} \end{cases} \quad (2)$$

które oznaczają wytrzymałości na ściskanie określone na próbkach rdzeniowych (compressive strength of a core) o proporcji wysokości rdzenia do jego średnicy równej 2:1 lub 1:1, zgodnie z PN-EN 12504-1. Wprowadzone oznaczenia $f_{c,core}$ dublują się z $f_{c,is}$, co może wprowadzać niepotrzebne zamieszanie. W normie [1] $f_{c,core}$ nie jest odniesione do klasy wytrzymałości betonu na ściskanie.

Nowym terminem wprowadzonym w normie jest $f_{c,is,est}$, który dotyczy oszacowania wytrzymałości betonu na ściskanie w specyficznym/konkretnym miejscu badania (estimated in situ compressive strength at a specific test location).

Wartość najwyższa/najniższa $f_{c,is,highest}$, $f_{c,is,lowest}$ spośród wytrzymałości na ściskanie zbioru skończonego o n elementach to:

$$f_{c,is,highest} = \max_{i=1,\dots,n} (f_{c,is}^{(i)}), \quad f_{c,is,lowest} = \min_{i=1,\dots,n} (f_{c,is}^{(i)}) \quad (3.1-2)$$

Natomiast wytrzymałość jako średnia arytmetyczna wyników badań próbek rdzeniowych to:

$$f_{c,m(n),is} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{c,is}^{(i)} \quad (3.3)$$

Zdaniem autorów termin $f_{c,spec}$ jest wielkością zdefiniowaną w normie niefortunnie. Z tego powodu, w celu uproszczenia zawitości definiowania normowego, proponuje się zastępczo następujący schemat, że klasa wytrzymałości betonu na ściskanie opisana jest dualnie przez symbol $C f_{ck} / f_{c,cube}$. W takim przypadku:

$$f_{c,spec} = \{f_{ck} \text{ lub } CLF \cdot f_{c,cube}\} \quad (4)$$

gdzie przez CLF oznaczono współczynnik długości rdzenia.

Powyższa definicja $f_{ck,spec}$ dotyczy terminów związanych z klasą wytrzymałości betonu na ściskanie.

W rozdziale 3 normy [1], dotyczącym terminów, definicji, symboli i skrótów, ujednolicono nazewnictwo charakterystyk i terminów odpowiednich do zagadnienia. Poniżej podano wybrane terminy z autorskim tłumaczeniem na język polski. Tym niemniej do czasu przetłumaczenia normy na język polski przez Polski Komitet Normalizacyjny obowiązującymi są terminy angielskie.

- 3.1.2. **Test pośredni (indirect test)** – badanie sklerometryczne obejmujące wyznaczanie liczb odbicia lub betonoskopia, UPV.
- 3.1.3. **Ładunek (load)** – ilość betonu transportowanego w pojeździe zawierającym jedną lub więcej partii.
- 3.1.5. **Liczba odbicia (rebound number)** – mediana z min. 9 odczytów wykonanych z młotka Schmidta.
- 3.1.6. **Badanie przesiewowe (Screening test¹⁾)** – procedura badawcza pośrednia z ogólną lub właściwą relacją do wytrzymałości na ściskanie.
- 3.1.7. **Mały obszar badań (small test region)** – do oceny strukturalnej to taki obszar, który jest wystarczająco mały, aby zmiany w uzyskanej wytrzymałości na ściskanie in situ wynikały przede wszystkim z wybranych miejsc badań i ich zmienności, a nie z powodu zmian w jakości dostarczanego betonu.
- 3.1.8. **Miejsce badania (test location)** – ograniczony obszar wybrany do pomiarów, zwykle wykorzystywany do oszacowania jednego wyniku testu do oceny wytrzymałości na ściskanie in situ.
- 3.1.9. **Obszar badań (test region)** – składa się z miejsc badań, jest to jeden lub kilka podobnych elementów konstrukcyjnych lub prefabrykowanych, co do których jest pewność lub przyjmuje się, że są wykonane z betonu o tych samych składnikach i tej samej klasie wytrzymałości na ściskanie lub równoważnej określonej objętości związanej z badaniem jej tożsamości dla wytrzymałości na ściskanie. Minimalna liczba ważnych wyników badań do oszacowania charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie in situ obszaru badań wynosi 8. Zaleca się pobrać rdzenie z co najmniej dziesięciu miejsc badań, aby pominąć ewentualne wartości skrajne.
- 3.1.10. **Wynik badań (test result)** – to średnia arytmetyczna z pomiarów, lub w przypadku liczb odbicia – mediana z pomiarów z miejsca badania.

W ustanowionej normie [1] zdecydowano o wyróżnieniu jednej z dwóch możliwych form wyników z badań na walcach o proporcji wymiarów h:d równej 2:1 jako podstawowej – $f_{c,2:1,core}$. Jednocześnie stosuje się proste przeliczenie mnożnikowe wyników z badań walców o równych wartościach wysokości i średnicy $f_{c,1:1,core}$. Wprowadzono *mnożnik długości rdzenia* ($CLF=0,82$ – core length factor). Mamy

¹⁾ Screening test – jest zaczerpnięte z terminologii medycznej i jest wstępnym rozpoznaniem wskaźników ryzyka. Screening test poprzedza diagnostic test.

Tabela 1. Tolerancje wymiarów próbek

Nominalne proporcje próbki	Tolerancja	$f_{c,is}$	Miara tolerancji [%]
$h = 2d \rightarrow 2:1$	1,95:1 do 2,05:1	$f_{c,2:1,core}$	$\Delta_{2:1} = \frac{2,05 - 1,95}{4} = 0,025 \rightarrow 2,5\%$
$h = d \rightarrow 1:1$	0,90:1 do 1,10:1	$CLF f_{c,1:1,core}$	$\Delta_{1:1} = \frac{1,10 - 0,90}{2} = 0,10 \rightarrow 10\%$

zatem możliwość przeliczenia wyników badań wg zależności (5) otrzymując:

$$f_{c,is} = f_{c,2:1,core} = CLF \cdot f_{c,1:1,core} \quad (5)$$

gdzie $f_{c,is}$ – wytrzymałość na ściskanie na rdzeniu uzyskana w miejscu badania elementu konstrukcyjnego.

W tabeli 4 normy [1] podano wymagania odnoszące się do wymiarów próbek rdzeniowych. Z kolei w tabeli 1 podano tolerancje w liczbach bezwzględnych i w procentach próbek walcowych o średnicy $d \geq 75$ mm.

Przez miarę tolerancji rozumie się średnią matematyczną z miar względnych objętości próbek, a mianowicie:

$$\Delta_{(.)} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{max}}{V_0} - \frac{V_{min}}{V_0} \right) \quad (6)$$

przy czym w zależności od potrzeb można stosować również średnią geometryczną lub harmoniczną.

W przypadku próbek walcowych o wysokości równej podwójnej średnicy (2:1) wymagania są ostrzejsze i wynoszą odpowiednio 2,5%, podczas gdy dla próbki o proporcji (1:1) miara tolerancja wynosi 10%. Autorom artykułu nie są znane przesłanki przyjęte w normie, jednakże ostrzejszych kryteriów należałoby się spodziewać w przypadku walców o niższych wysokościach lub przynajmniej równych przypadkowi 2:1.

Z punktu widzenia użytkownika normy zajmującego się jej wykorzystaniem praktycznym lub teoretycznym rozdziały 4 do 6 mogłyby zostać znacznie zredukowane z tej przyczyny, że zdaniem autorów są one swobodnym melanzem treści omawianej normy w innych jej rozdziałach. Wyjątkiem jest tu tabela 4 w rozdziale 6.

Rozdział 7 zawiera opis stosowania metody Grubbsa²⁾ do badania zwartości zbiorów wartości pomierzonych o rozkładzie statystycznym. Ten rozdział jest wartościowym uszczegółowieniem znanego pojęcia o *pominięciu pomierzonych wartości skrajnych*. Z metodą Grubbsa wiąże się termin *outlier*, który oznacza *wartość nietypową* lub *odstającą*. Zdaniem autorów drugi z terminów jest bardziej właściwy do analizy wyników pomiarów.

Działanie metody Grubbsa prowadzi do wyznaczenia wartości granicznych zbioru w sensie stosowanej statystyki, np. wg wzoru:

²⁾ Frank Ephraim Grubbs (1913–2000). Test Grubbsa znany również jako maksymalny znormalizowany test rezydualny do wykrywania wartości odstających, które są także nazywane wartościami nietypowymi.

$$G_{\text{higher}}^{\text{lower}} = \frac{|X_{i(\text{extreme})} - X_{m(n)}|}{s} \quad (7)$$

w którym:

- $X_{i(\text{extreme})}$ – wartość ekstremalna w zbiorze o $X_{i=1,2,\dots,n}$ składowych,
- $X_{m(n)}$ – wartość średnia,
- s – odchylenie standardowe.

Wartości skrajne w zbiorze mogą być większe lub mniejsze od wartości granicznych. Jeśli są większe to są uznawane jako *wartości odstające*, które należy pominąć w dalszych analizach, a powstały zredukowany zbiór należy ponownie scharakteryzować przez aktualną wartość średnią, odchylenie standardowe, etc. W normie [1] zamieszczone dwie nierówności o numerach (1–2)

$$\frac{f_{c, is, highest} - f_{c, m(n)is}}{s} > G_p \quad \frac{f_{c, m(n)is} - f_{c, is, lowest}}{s} > G_p \quad (8.1-2)$$

gdzie G_p jest wartością krytyczną do badania wartości odstających i jest wyznaczane z zależności funkcyjnej $G_p = G_p(n)$ na podstawie tabeli 5 ustanowionej normy [1]. Należy podkreślić, że występujące wartości największe ($f_{c, is, highest}$) i najmniejsze ($f_{c, is, lowest}$), w sensie testu Grubbsa, nie muszą być wartościami odstającymi i w konsekwencji nie muszą zawsze być ze zbioru usunięte. Mogą być stosowane również inne procedury poszukiwania *wartości odstających*. Wskazano w tym zakresie normy ISO 5725 oraz ASTM E178. Wariantem poszukiwania wartości odstających może być powszechnie stosowana metoda najmniejszych kwadratów.

Wielozródliwość norm może prowadzić do pomyłek i tzw. różnych *filozofii* formułowania przepisów technicznych, co bez wątpienia wpływa na podwojenie liczby stron dokumentu technicznego. Z tego powodu użytkownicy norm muszą w sposób krytyczny odczytywać treści przepisów, zawsze konfrontując je z wiedzą podstawową np. wykładaną w czasie studiów.

Oszacowanie wytrzymałości na ściskanie do oceny istniejącej konstrukcji (treść rozdziału 8 podpunkt 8.1.) obejmuje tylko badania na próbkach rdzeniowych. Pozyskany podczas badań zbiór wyników pomiarowych musi być wstępnie poddany procedurze odrzucenia wartości odstających.

Wyznaczanie wytrzymałości na ściskanie betonu w istniejącej konstrukcji za pomocą metody A i B opisanej w normie [2] nie jest już właściwe. Jednakże obie wcześniejsze metody są obecnie zunifikowane. Unifikacja składa się z dwóch elementów. Pierwszy z elementów jest radykalny i polega na odrzuceniu niewielkich liczb pomiarów, wcześniej występujących w normie [2]. Była to opcja 3 do 6 pomiarów. Obecnie minimalna liczba wartości wytrzymałości na ściskanie wynosi 8, przy średnicy rdzenia $d \geq 75$ mm. Druga zmiana polega na zastosowaniu jednolitych wzorów (3–4) odpowiadających zapisowi w pierwotnej metodzie A, jednakże zmodyfikowano wartość czynnika k_n , którego wartość zmienia się w przedziale od 2 do 1,64. Jest to o tyle ważne, że nie stosuje się zaniżonej wartości 1,48 do wyznaczania percentyla 5%.

Należy nadmienić, że wartość 1,64 jest w dalszym ciągu większa niż wartość współczynnika z rozkładu normalnego przy dużej liczbie wyników równej 1,54. Reasumując, obecnie wyznaczenie $f_{ck, is}$ polega na znalezieniu minimum z dwóch warunków, stosując wzory (3–4) oraz tabele 6 i 7 normy [1]:

$$f_{ck, is} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{c, m(n)is} - k_n s \\ f_{c, is, lowest} + M \end{array} \right\} \quad (9)$$

gdzie s – jest odchyleniem standardowym, k_n , M są odpowiednio wielkościami przyjmowanymi z tabeli 6 i 7, przy czym, jeśli $f_{c, is, lowest} \geq 20$ MPa $\rightarrow M = 4$.

Wyznaczenie wartości $f_{ck, is}$ jest zamknięciem procedur w rozdziale 8 normy [1]. Ta sytuacja jest zupełnie odmienna w normie [2]. Tam, dysponując wartościami $f_{ck, is}$ można było wyznaczyć korespondującą klasę wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach znormalizowanych. W normie [1] wyznaczenia tej kluczowej zależności brakuje, co może być zaskakującym brakiem.

Formalnie istnieje możliwość znalezienia relacji między klasą wytrzymałości betonu a wytrzymałością $f_{ck, is}$, jednakże jest to opcją poboczną, która została opisana w rozdziale 9.

Na miano ciekawostki zasługuje podrozdział 8.2 dotyczący łączenia rezultatów badań na rdzeniach ze sklerometrią i UPV (*ultrasonic pulse velocity*). Zdaniem autorów artykułu zamieszczony w tym podrozdziale zestaw wzorów (5–8), z wyłączeniem wzoru Pitagorasa, został zapisany niepoprawnie. W dokumencie technicznym jakim jest Polska Norma należy stosować właściwe oznaczenia, w tym w szczególności np. dotyczące opisu zakresów sumowania. Użytkownik normy ma prawo spodziewać się zawartych tam treści jednoznacznych i niebudzących wątpliwości.

Rozdział 9 jest poświęcony oszacowaniu klasy wytrzymałości betonu na ściskanie w *przypadku wątpliwym* (*case of doubt*), tj. w sytuacji gdy wątpliwa jest jakość mieszanki betonowej dostarczonej na budowę lub są wątpliwości co do jakości prac podczas betonowania. Przy takim założeniu, możliwe jest oszacowanie klasy wytrzymałości betonu na ściskanie odpowiednią do $f_{ck, is}$. Chyba można to uznać za najważniejszą część normy, gdyż dotyczy częstych przypadków występowania po 28 dniach wiązania i twardnienia betonu, niższych wytrzymałości na próbkach znormalizowanych niż odpowiadających klasie betonu na ściskanie założonej w projekcie.

Przy ograniczeniu obliczeń tylko do wyników na próbkach rdzeniowych, takiemu zakresowi odpowiada treść podrozdziału 9.2.

Konstrukcję można rozpatrywać jako blok/bloki betonu o znanych wymiarach, a tym samym o znanych objętościach tworzących *obszary/objętości badawcze*. W każdym *obszarze badawczym* należy wydzielić objętości rzędu ok. 30 m³. W każdej takiej objętości ustala się *miejsca badawcze* w liczbie wynikającej z tabeli 8 normy. Jeśli np. liczba objętości wynosi 2 do 4, to w każdym z nich należy wyznaczyć po min. 2 *miejsca badawcze*.

Założmy, że pomiary wykonano na próbkach o proporcji

h:d równej 1:1. Analiza w przypadku wątpliwym jest prowadzona na wartościach charakterystycznych odpowiadających próbkom o stosunku h:d równym 2:1, czyli $f_{c,spec} = f_{ck}$.

W każdym obszarze badawczym należy wyznaczyć dwie charakterystyki betonu:

- średnią z wyników badań rdzeni

$$f_{c,is} = CLF \cdot f_{c,1:1core} = \frac{CLF}{k} \sum_{i=1}^k f_{c,1:1core}^{(i)} \quad (10.1)$$

- najniższą wartość z badanych wytrzymałości

$$f_{c,is,lowest} = CLF \cdot \min_{i=1,\dots,n} (f_{c,1:1core}^{(i)}) \quad (10.2)$$

Wątpliwości co do jakości wbudowanej mieszanki betonowej nie są zasadne jeśli spełnione są nierówności podane w tabeli 10 normy, a mianowicie:

$$f_{c,is} \geq 0,85 (f_{ck,spec} + 1) \quad (11.1)$$

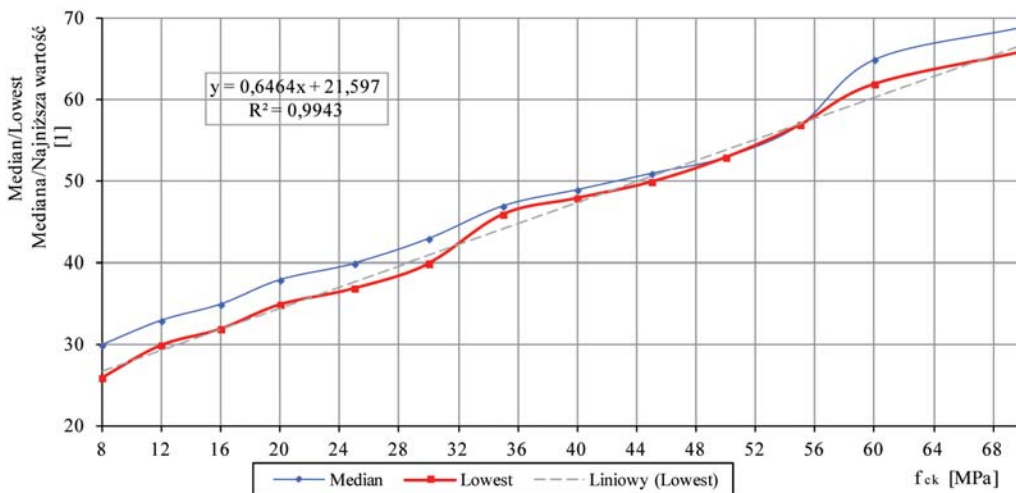
$$f_{c,is,lowest} \geq 0,85 (f_{ck,spec} - M) \quad (11.2)$$

Argument nierówności $f_{ck,spec} = \{f_{ck} \text{ lub } CLF \cdot f_{ck,cube}\}$ (4), uzyskujemy po dokonaniu przekształceniu według wzoru:

$$f_{ck} = f_{ck,spec} \leq \min \left\{ \frac{f_{c,is}}{0,85} - 1 ; \frac{f_{c,is,lowest}}{0,85} + M \right\} \quad (12)$$

Formalnie uzyskuje się szacunkową relację między klasą betonu $f_{ck,spec}$ a wielkościami uzyskanymi in situ $f_{c,is}$ lub $f_{c,is,lowest}$.

Tak czy inaczej, użytkownik normy pozostaje w niepewności dlaczego wartość $f_{ck,spec}$ służy do oceny wyników wątpliwych, natomiast nie może być podstawą do przypisania klasy wytrzymałości betonu na ściskanie. Stosowane



Rys. 1. Zależność między medianą liczb odbicia oraz minimalną wartością liczb odbicia w funkcji od charakterystycznej wartości betonu na ściskanie

powiedzenie, że norma coś „przewidziała” tu nie funkcjonuje.

Znaczenie rozbudowanego załącznika A do normy nie jest do końca zrozumiałe. Treść załącznika stanowi powtórkę treści wprowadzonych wcześniej, jednak w zmienionej formie. Zdaniem autorów edycyjnie treści uzupełniające mają więcej walorów beletrystycznych niż technicznych i w rzeczywistości zwiększają nieczytelność normy.

Z kolei załącznik B, będący załącznikiem narodowym stosowanym w Niemczech, ma znaczenie do rozwoju przewodniej koncepcji normy. Przy podniesieniu minimalnej liczby wyników próbek z badań in situ do 8 (ośmiu), stosowanie ocen metodami pośrednimi łączącymi badania in situ, sklerometrii oraz betonoskopii nabiera dużego znaczenia. W załączniku B zamieszczono tabele B.1 i B.2, w których podano korelacje między sklerometrycznymi liczbami odbicia, a klasami wytrzymałości betonu na ściskanie, co jest formą krzywej regresji przedstawioną na wykresie (rys. 1). Dziedzinę tworzą klasy wytrzymałości na ściskanie w MPa, podczas gdy krzywe to wartość mediany ze średnich wartości liczb odbicia (kolor niebieski) oraz najniższa wartość ze zbioru pomiarów (kolor czerwony).

Przebieg krzywych wskazuje na istotne znaczenie linii najniższych wartości liczb odbicia. Dla tej linii wyznaczono krzywą regresji, która już w najprostszej liniowej formie ma bardzo dobrą zbieżność.

Powyższy wniosek jest zaskakujący z tej racji, że w literaturze przedmiotu funkcje korelacji są krzywymi, w przybliżeniu o kształcie parabol.

Przykład

Rozpatrzmy przykład, który może się zdarzyć w przypadku badania dużych (np. 1 m³) elementów betonowych. Wyróżniamy jeden obszar badań, w którym ustalono 4 miejsca badań. W każdym z miejsc badań, wierząc pionowo od góry elementu, pobrano rdzenie betonu o długości 50 cm, umożliwiające przygotowane 4 próbki rdzeniowych o wymiarach h=d=10 cm. Rdzenie przycięto, a ich podstawy zostały przeszlifowane. W dokumentacji badanego elementu zapisano, że beton ma osiągnąć klasę betonu C40/50.

Badania próbek rdzeniowych pokazano na fotografii 3 i 4. Wyniki pomiarów i analizy wartości wytrzymałości in situ poszczególnych próbek rdzeniowych zamieszczono w tabeli 2.



Fot. 3. Próbkę walcową między płytami maszyny wytrzymałościowej



Fot. 4. Złomy próbek rdzeniowych

Tabela 2. Wyniki pomiarów i analiza wartości wytrzymałości in situ w czterech poziomach rdzeni

Miejsce badania	$f_{c,1:1, is}$ [MPa]			
	1	2	3	4
Poziom I	56,9	57,9	57,6	62,5
Poziom II	54,4	52,8	56,7	54,7
Poziom III	44,4	44,2	50,1	48,2
Poziom IV	44,6	43,8	43,3	45,1
$f_{c,1:1,(16), is}$	51,08 [MPa]			
s	6,35 [MPa]			
k_n	1,81 [1]			
$f_{c,1:1, is, lowest}$	43,30 [MPa]			
$f_{c,1:1, is, highest}$	62,50 [MPa]			
$f_{c,1:1,(16), is} - k_n s$	39,58 [MPa]			
$f_{c,1:1, is, lowest} + 4$	47,30 [MPa]			
$f_{c,1:1, is}$	39,58 [MPa]			

W pierwszej kolejności, stosownie do postanowień rozdziału 7 normy [1] sprawdzono dyspersję pomierzonych wartości wytrzymałości in situ wg wzorów normowych (1–2). Uzyskano odpowiednio:

$$\frac{f_{c, is, highest} - f_{c, m(16) is}}{s} = 2,124 < G_p = 2,852 \quad (P.1)$$

$$\frac{f_{c, m(16) is} - f_{c, is, lowest}}{s} = 1,059 < G_p = 2,852 \quad (P.2)$$

co prowadzi do wniosku, że wartości skrajne górna i dolna nie są wartościami odstającymi.

W normie nie stosuje się współczynnika zmienności pomierzonych wartości, który tu wynosi

$$\mu^{(Tab. 2)} = \frac{s}{f_{c, 1:1, (16), is}} = \frac{6,35}{51,08} = 0,124 \rightarrow 12\% \quad (P.3)$$

Uznaje się, że jednorodność jest dostateczna, a nawet niska. Z tego powodu wytrzymałość in situ jest także niska i wynosi $f_{c, 1:1, is} = 39,58$ MPa, co stanowi 77% wartości średniej $f_{c, 1:1, (16), is} = 51,08$ MPa.

Zastosujemy teraz wzory wynikające z rozdziału 9 normy przy $f_{ck} = 40$ MPa

$$f_{ck}^{(Tab. 2)} = f_{ck, spec} = \min \left\{ \frac{CLF \cdot f_{c, is} - 1}{0,85} - 1; \frac{CLF \cdot f_{c, is, lowest}}{0,85} + M \right\} =$$

$$= \min \left\{ 37,37; 45,05 \right\} = 37,37 < 40 \text{ MPa}$$

Zatem w przypadku z tabeli 2, analizując łącznie wyniki badań wytrzymałości 16 próbek rdzeniowych, wątpliwości co do jakości dostarczonej mieszanki betonowej okazały się być zasadne!

Tabela 3. Wyniki pomiarów i analiza wartości wytrzymałości in situ w dwóch pierwszych poziomach rdzenia (poziom I i II)

Miejsce badania	$f_{c,1:1, is}$ [MPa]			
	1	2	3	4
Poziom I	56,9	57,9	57,6	62,5
Poziom II	54,4	52,8	56,7	54,7
$f_{c,1:1,(8), is}$	56,69 [MPa]			
s	2,94 [MPa]			
k_n	2,00 [1]			
$f_{c,1:1, is, lowest}$	52,80 [MPa]			
$f_{c,1:1, is, highest}$	62,50 [MPa]			
$f_{c,1:1,(8), is} - k_n s$	50,81 [MPa]			
$f_{c,1:1, is, lowest} + 4$	56,80 [MPa]			
$f_{c,1:1, is}$	50,81 [MPa]			

Przypatrzmy się ponownie uzyskanym wartościom wytrzymałości na ściskanie w miejscu badania nr 1. Na poziomie I i II uzyskane wartości to 56,9 MPa oraz 54,4 MPa (czerwona barwa czcionki). Z kolei na poziomie III i IV uzyskane wartości wytrzymałości to 44,4 MPa oraz 44,6 MPa. Podobny rozkład wartości ma miejsce w pozostałych miejscach badania, polegający na 25% różnicy między poziomami górnymi a dolnymi. To pozwala na wydzieleniu dwóch rodzajów betonów w jednej konstrukcji. Tę nową sytuację opisują tabele 3 i 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów i analiza wartości wytrzymałości in situ w dwóch pozostałych poziomach rdzenia (poziom III i IV)

Miejsce badania	$f_{c,1:1,is}$ [MPa]			
	1	2	3	4
Poziom III	44,4	44,2	50,1	48,2
Poziom IV	44,6	43,8	43,3	45,1
$f_{c,1:1,(8),is}$	45,46 [MPa]			
s	2,39 [MPa]			
k_n	2,00 [1]			
$f_{c,1:1,is,lowest}$	43,30 [MPa]			
$f_{c,1:1,is,highest}$	50,10 [MPa]			
$f_{c,1:1,(8),is} - k_n s$	40,68 [MPa]			
$f_{c,1:1,is,lowest} + 4$	47,30 [MPa]			
$f_{c,1:1,is}$	40,68 [MPa]			

W powyższych zbiorach wartości pomierzonych nie występują wartości odstające. Odpowiednie wartości współczynnika zmienności wynoszą

$$\mu^{(Tab.3)} = 0,052 \rightarrow 5\%, \quad \mu^{(Tab.4)} = 0,053 \rightarrow 5\% \quad (P.5)$$

co można uznać za jednorodność bardzo dobrą, w konsekwencji $f_{c,1:1,is}$ są niższe o ~10% od wartości średnich. W rezultacie odpowiednio do danych z tabeli 3 otrzymujemy

$$f_{ck}^{(Tab.3)} = f_{ck,spec} = \min \left\{ \frac{CLF \cdot f_{c,is} - 1}{0,85}, \frac{CLF \cdot f_{c,is,lowest} + M}{0,85} \right\} =$$

$$= \min \left\{ 48,20, 54,22 \right\} = 48,20 > 40 \text{ MPa} \quad (P.6)$$

co odpowiada założonej projektowanej klasie wytrzymałości betonu.

W trzecim z rozpatrywanych przypadków, tabela 4, mamy:

$$f_{ck}^{(Tab.4)} = f_{ck,spec} = \min \left\{ \frac{CLF \cdot f_{c,is} - 1}{0,85}, \frac{CLF \cdot f_{c,is,lowest} + M}{0,85} \right\} =$$

$$= \min \left\{ 38,42, 54,22 \right\} = 38,42 < 40 \text{ MPa} \quad (P.7)$$

Wnioskujemy, że beton z dolnych warstw (III i IV) jest o jedną klasę niższy niż C40/50.

Zakończenie

Pomimo krytykowanych w niniejszym artykule edycyjnych uciążliwości normy, można przy jej pomocy przeprowadzić skutecznie i szczegółowo analizę wyników pomiarów na próbkach rdzeniowych betonu.

W wyobrażeniu statystycznego inżyniera, zespoły przygotowujące normę, poza oczywistą profesjonalnością, dążą także do wysokiego poziomu stylistycznego, ortograficznego, co finalnie powinno owocować zwięzłością i jednoznacznością. Niestety, zdaniem autorów, norma [1] nie jest tego dobrym przykładem.

Zamieszczony przykład, sporządzono na podstawie wielu analogicznych rzeczywistych sytuacji podczas badania betonu. Zawsze konieczny jest nieco szerszy sposób patrzenia na wyniki badań, który można osiągnąć również przez stosowanie np. metody wywiadu środowiskowego.

Do końca przygotowywania tekstu do druku, dla autorów niniejszego artykułu było zagadką, dlaczego wytrzymałość na ściskanie in situ oraz klasę wytrzymałości betonu traktowane są jako niezależne charakterystyki betonu, (patrz np.: Tabela 2., załącznik A.1 pkt. (2)).

Bibliografia

- [1] PN-EN 13791:2019-12: Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych,
- [2] PN-EN 13791:2008: Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2020 roku

prenumerata roczna normalna 259 zł	}	(w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 21,60 zł		
prenumerata roczna studencka 129 zł	}	(w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 10,80 zł		