

Porównanie wyników badań modułu sprężystości betonu przeprowadzonych według europejskiej normy PN-EN 12390-13:2013 i niemieckiej normy DIN 1048-5

COMPARISON OF THE RESULTS OF TESTING THE MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE CARRIED OUT ACCORDING TO THE EUROPEAN PN-EN 12390-13: 2013 STANDARD AND THE GERMAN DIN 1048-5 STANDARD

Streszczenie

Wobec wieloletniego braku europejskiej normy w zakresie badania i oceny modułu sprężystości betonu w praktyce badawczej powszechnie wykorzystywano procedurę badawczą z krajowej normy niemieckiej DIN 1048-5. Ustanowiona w 2013 roku norma europejska zawiera procedurę nieco różniącą się od procedury niemieckiej. Przedmiotem badań zaprezentowanych w artykule było porównanie wyników badań modułu sprężystości betonu przeprowadzonych według norm PN-EN 12390-13 i DIN 1048-5 w odniesieniu do betonów z kruszywem bazaltowym i amfibolitowym. Wykazano, że próbki badane według procedury z normy PN-En 12390-13 wykazywały nieznacznie wyższe wartości średnich siecznych modułów sprężystości w porównaniu do próbek badanych według procedury niemieckiej.

Abstract

Due to the lack of a European standard for testing and assessing the modulus of elasticity of concrete for many years the test procedure from the German national standard DIN 1048-5 was widely used in research practice. The European Standard established in 2013 contains a procedure slightly different from the German one. The subject of the research presented in the article was to compare the results of tests on the modulus of elasticity carried out according to PN-EN 12390-13 and DIN 1048-5 standards for concretes with basalt

dr hab. inż. Piotr Woyciechowski, prof. PW – Politechnika Warszawska

dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera, prof. PW – Politechnika Warszawska

dr inż. Joanna J. Sokołowska – Politechnika Warszawska

inż. Olga Zygnerska – Politechnika Warszawska

and amphibolite aggregate. It was shown that the concrete specimens tested according to the procedure formulated in PN-EN 1239013 standard showed slightly higher values of the secant modulus of elasticity compared to the same specimens tested according to the German procedure.

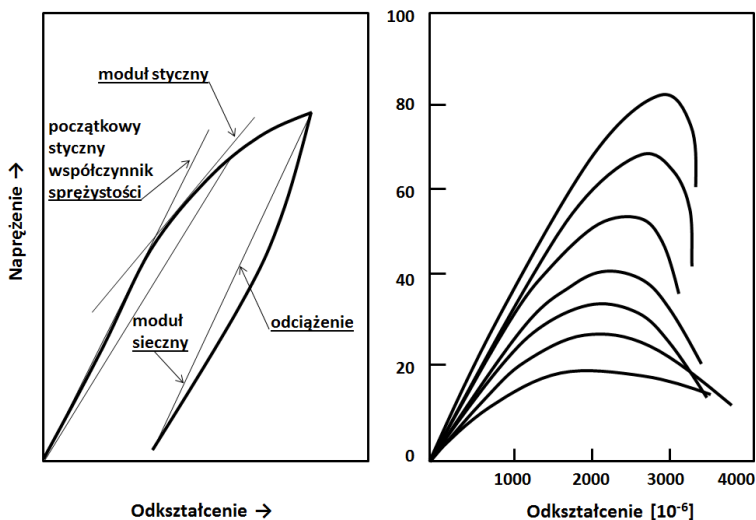
1. Wprowadzenie i sformułowanie problemu badawczego

Wpływ składników wykorzystanych do wytworzenia mieszanki betonowej, czynników technologicznych oraz zastosowanej metody badawczej, na wynik oznaczenia modułu sprężystości betonu, to zagadnienia bardzo rzadko poruszane w literaturze, czy wytycznych do badań. Znane są jedynie zależności opisujące wpływ klasy wytrzymałości betonu na ściszenie oraz rodzaju użytego w betonie kruszywa na wartość modułu sprężystości betonu, zawarte w Eurokodzie 2 [13]. Natomiast wybór metody badawczej długo nie był kwestią rozpatrywaną pod tym kątem, ponieważ, wobec wieloletniego braku europejskiej normy w zakresie badania i oceny modułu sprężystości betonu, powszechnie wykorzystywano jedną procedurę badawczą, tj. opisaną w krajowej normie niemieckiej DIN 1048-5 [2]. Ustanowiona w 2013 roku norma europejska PN-EN 12390-13 [16] zawiera jednak procedurę nieco różniącą się od procedury niemieckiej. Konieczne zatem wydaje się być ustalenie, czy moduły sprężystości oznaczane obiema metodami przyjmują zbliżone wartości i czy porównywanie wyników uzyskanych na drodze badań tymi metodami jest uprawnione. Przyjęta metoda badawcza wpływa bowiem na wynik badania modułu, jak to pokazano w badaniach betonów zwykłych i lekkich [3].

Przedmiotem badań zaprezentowanych w artykule było porównanie wyników badań modułu sprężystości betonu przeprowadzonych według norm PN-EN 1239013 i DIN 1048-5 w odniesieniu do betonów z kruszywem bazaltowym i amfibolitowym. Uzyskane wyniki pozwoliły zweryfikować zależności zawarte we wspomnianej wyżej normie PN-En 1992-1-1, ale pokazały także, że wynik badania modułu sprężystości betonu zależy w sposób bezpośredni od metody przeprowadzenia oznaczenia.

2. Moduł sprężystości betonu i czynniki ją kształtujące

Moduł sprężystości to cecha mechaniczna opisująca zależność pomiędzy wielkością naprężeń i odkształceń danego materiału [6]. W przypadku betonu funkcja opisująca zależność naprężenie-odkształcenie nie jest liniowa (a przynajmniej nie w całym zakresie badania niszczącego), co stwarza trudność w wyznaczaniu wartości modułu sprężystości. Istnieją różne sposoby interpretacji tej zależności, co w konsekwencji skutkuje różnymi „rodzajami” modułów sprężystości [5], [9]. Analizuje się m.in. tzw. początkowy (dynamiczny) moduł sprężystości, E_c (wyznaczany jako tangens kąta nachylenia stycznej do wykresu zależności naprężenie-odkształcenie w chwili początkowej) oraz chwilowy moduł sprężystości, E_c (wyznaczany w konkretnym momencie - dla dowolnego argumentu). Natomiast najbardziej powszechnie wykorzystywaną pod względem zastosowania praktycznego (np. przy wykonywaniu obliczeń konstrukcyjnych) wielkością jest tzw. średni sieczny moduł sprężystości, E_{cm} . Moduł ten wyznacza się jako tangens kąta nachylenia siecznej w zakresie naprężeń od 0,0 do 0,4 W w ramach badań prezentowanych w niniejszym artykule wyznaczano i analizowano wartości właśnie tego modułu. Na poniższym schemacie (Rys.1) przedstawiono wykres obrazujący zależność naprężenie-odkształcenie betonu wraz z zaznaczeniem wspomnianych wyżej modułów sprężystości (tj. początkowy, styczny i sieczny). Na rys. 1 przedstawiono także zależność pomiędzy wartością modułu sprężystości a wytrzymałością betonu na ściszenie opisaną wzorami w/w normie PN-EN 1992-1-1, która wskazuje, że im większa wytrzymałość betonu tym wyższa wartość modułu sprężystości.

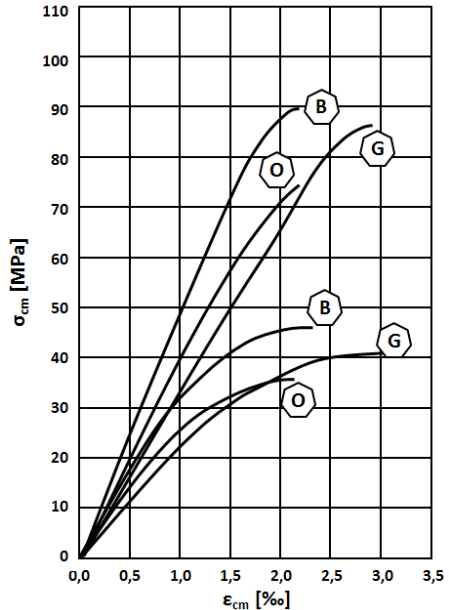


Rys.1. Zależności napężenie-odkształcenie (po lewej) i wytrzymałość na ściskanie-odkształcenie (po prawej) betonu – na podst. [8]

W literaturze można znaleźć także informacja odnośnie wpływu rodzaju zastosowanego w betonie kruszywa grubego na wartość modułu sprężystości betonu [9]. Wpływ ten jest konsekwencją wielofazowej natury betonu; duże znaczenie ma przyczepność pomiędzy fazą kruszywową i matrycą cementową, zwłaszcza w betonie wysokich wytrzymałości [18]. W przypadku betonów wysokowartościowych istotny jest również fakt, że wykonuje się je z kruszywa o wysokiej wytrzymałości i wysokim współczynniku sprężystości, co wpływa na wartość modułu stwardniałego kompozytu. Na Rys.2. przedstawiono wykresy obrazujące zależność napężenie- odkształcenie dla betonów z różnymi kruszywami (bazaltowe, granitowe i otoczkowe) - na podstawie [4].

Mniej znaną zależnością dotyczącą modułu sprężystości jest relacja pomiędzy jego wartością a stosunkami objętościowymi kruszywa i zhydratyzowanego zaczynu cementowego w betonie o danej wytrzymałości. Z racji faktu, że kruszywo w takim betonie charakteryzuje się wyższym modułem sprężystości od fazy uwodnionego cementu, zwiększenie zawartości kruszywa w betonie spowoduje podwyższenie wartości jego modułu sprężystości [8].

Czynnikiem wpływającym na wartość modułu sprężystości betonu jest także temperatura [1], [7]. Wartość modułu sprężystości jest stała w zakresie temperatury (21 - 96) °C; wyraźnie maleje natomiast w temperaturze powyżej 121°C. Powodem takiej reakcji może być osłabienie wiązań w mikrostrukturze betonu. Zakres obniżenia wartości modułu sprężystości betonu w przypadku zmiany temperatury zależy głównie od rodzaju zastosowanego kruszywa. Najczęściej jednak zależność zarówno wytrzymałości jak i modułu sprężystości betonu od temperatury jest taka sama [1], [6].



Rys. 2. Zależność naprężenie-odkształcenie dla betonów z różnymi kruszywami (B - bazaltowe, G - granitowe i O - otoczkowe) - na podst. [4].

3. Materiały i program badań

2.1. Program i zakres badań

Program badawczy obejmował projekt 4 składów betonów tzw. mostowych, różniących się między sobą rodzajem użytego kruszywa grubego - zastosowano bazalt oraz amfibolit, a także ilością zastosowanej domieszki znacznie redukującej wodę (zastosowanej w celu upłynnienia mieszanki) i napowietrzającej. Betony zaprojektowano na klasę wytrzymałości na ściskanie C45/55 (spełniając tym samym wymaganie PN-206 odnośnie minimalnej klasy betonu mostowego C30/37 oraz wymaganie stawiane betonom do wykonywania przeseł i podpór wiaduktów nad ruchliwymi drogami, na których stosuje się środki odladzające, tj. pracujących w klasie ekspozycji XD3, dla których zalecana minimalna klasa betonu to C35/45).

2.2. Skład jakościowy badanych betonów - materiały

Poniżej omówiono komponenty zastosowane w betonach będących przedmiotem badań. **Cement.** Jako spoiwo zastosowano cement **CEM I 52,5 R** (portlandzki klasy wytrzymałości 52,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej), który według normy PN-EN 206 [11] może być stosowany we wszystkich klasach ekspozycji.

Kruszywo. Do wykonania mieszanek betonowych użyto dwóch rodzajów kruszywa grubego - amfibolitu i bazaltu o frakcjach 2/8 mm oraz 8/16 mm oraz piasku rzeczego (frakcja 0/2 mm). W Tab.1 zestawiono wybrane właściwości użytkowe obu kruszyw użytych do wykonania mieszanek betonowych deklarowane przez dostawców.

Tabela 1. Wybrane właściwości użytkowe kruszyw amfibolitowego i bazaltowego użytych do wykonania mieszanek betonowych deklarowane przez dostawców

Charakterystyka	Amfibolit	Bazalt
Uziarnienie	G _c 85/20	G _c 85/20
Zawartość pyłów	f 1,5	f 1,5
Wskaźnik płaskości	FI 15	Brak danych
Wskaźnik kształtu	SI 15	SI 20
Gęstość objętościowa ziarn, g/cm ³	2,920	3,050
Nasiąkliwość	WA ₂₄ 0,3	WA ₂₄ 1,0
Mrozoodporność	F1	F1
Odporność na rozdrabnianie	LA 15	LA 20
Odporność na ścieranie	M _{DE} 10	M _{DE} 15
Skład chemiczny - udział, %		Brak danych
SiO ₂	50,4	
Al ₂ O ₃	13,9	
Fe ₂ O ₃	13,7	
CaO	6,7	
MgO	5,3	
SO ₂	< 0,10	

Woda. Do wykonania mieszanek betonowych użyto wody wodociągowej zgodnej z wymaganiami zawartymi w normie PN-EN 1008 [12].

Domieszki. Do wykonania mieszanek betonowych użyto dwóch różnych typów domieszek w różnych ilościach w zależności od konkretnego składu: domieszka I - na bazie modyfikowanych polikarboksylanów i fosfonianów została zastosowana w celu upłynnienia mieszanki betonowej, domieszka II - domieszka napowietrzająca, umożliwiła uformowanie się w mieszance betonowej stabilnych mikropęcherzyków powietrza i przerwanie ciągłości porów kapilarnych, a jednocześnie miała za zadanie zwiększyć wiązliwość wody i ograniczyć segregację mieszanki betonowej [6].

2.3. Składy ilościowy badanych betonów

Głównym założeniem podczas projektowania składów było uzyskanie odpowiedniej klasy wytrzymałości betonu, która pozwalałaby na zastosowanie go do budowy obiektów mostowych. Podczas projektowania składów istotne było wykorzystanie konkretnych rodzajów kruszywa (amfibolit i bazalt). Składy ilościowe betonów będących przedmiotem badań zestawiono w Tab.2.

Tabela 2. Składy badanych betonów wyrażone w kg na 1 m³ betonu

Komponent	Beton amfibolit. A1	Beton amfibolit. A2	Beton bazaltowy B1	Beton bazaltowy B2
	Masa, kg			
Cement (CEM I 52,5 R)	480	480	480	480
Piasek rzeczny 0/2 mm	600	600	600	600
Amfibolit 2/8 mm	520	520	-	-
Amfibolit 8/16 mm	665	665	-	-
Bazalt 2/8 mm	-	-	550	550
Bazalt 8/16 mm	-	-	706	706
Woda	160	160	160	160
Domieszka I (plastyf.)	3,36 (0,70% m.c.)	3,84 (0,80% m.c.)	3,36 (0,70% m.c.)	3,84 (0,80% m.c.)
Domieszka II (napow.)	0,82 (0,17% m.c.)	0,48 (0,10% m.c.)	0,73 (0,15% m.c.)	0,48 (0,10% m.c.)

2.4. Wykonanie i pielęgnacja betonów

W przypadku każdego rozpatrywanego składu wykonano 9 próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, na których następnie wykonano oznaczenia modułu sprężystości oraz wytrzymałości na ściskanie betonów. Próbki były pielęgnowane w wodzie (zgodnie z zaleceniami PN-EN 12390-2 [12]) aż do momentu na 7 dni przed badaniem modułu sprężystości. Krótszy niż zwykle okres pielęgnacji próbek walcowych wynikał z konieczności wyszlifowania ich powierzchni przed wykonaniem badania. Po upływie 28 dni od zaformowania zostało na nich przeprowadzone oznaczenie średniego siecznego modułu sprężystości.

3. Metodyka badawcza

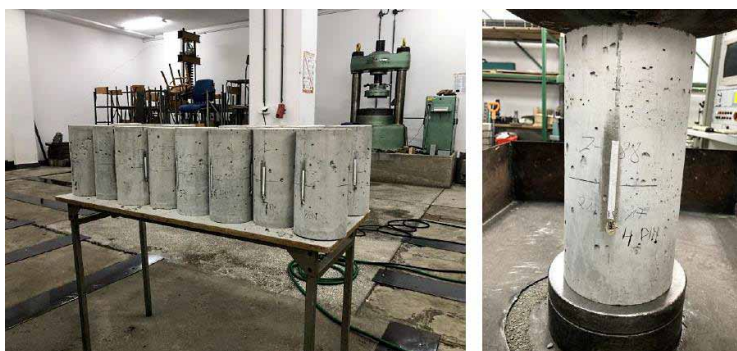
Moduł sprężystości betonów oznaczano dwoma metodami, tj. według procedur opisanych w Europejskiej Normie PN-EN 12390-13:2013 *Badania betonu - Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu* [16] oraz niemieckiej normie DIN (niem. *Deutsches Institut für Normung*) - DIN 1048-5 *Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper* (Metody badań betonu; badania stwardniałego betonu; próbki przygotowane w formach)

[2]. Badano próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Badania prowadzone były w temperaturze $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, która nie miała wpływu na wynik oznaczenia (por. pkt 2). Dodatkowo oznaczono wytrzymałość na ściskanie betonów według procedury opisanej w normie PN-EN 12390-3 [15]. Procedury badania modułu sprężystości pokrótce omówiono poniżej.

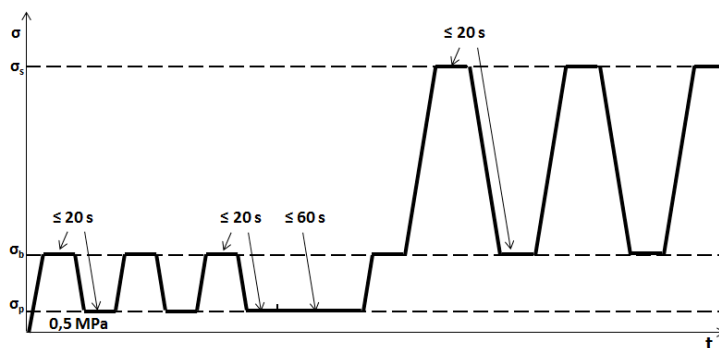
3.1. Badanie modułu sprężystości betonu metodą wg PN-EN 12390-13

Metoda dotyczy wyznaczania siecznego modułu sprężystości przy ścisnieniu stwardniałego betonu na próbkach zaformowane lub pobranych z konstrukcji. Metoda obejmuje dwa warianty badawcze Metoda A (zastosowana w prezentowanych badaniach) służy do określania zarówno modułu początkowego jak i średniego. Metoda B służy wyłącznie do określania średniego modułu sprężystości.

Badanie polega na osiowym obciążeniu próbki i rejestrowaniu naprężeń i odkształceń powstałych pod wpływem tego obciążenia. Nachylenie siecznej w stosunku do krzywej naprężenie-odkształcenie znane jest jako sieczny moduł sprężystości przy ścisnieniu. Zastosowano oprzyrządowanie mierzące odkształcenie próbki pod wpływem ścisnienia osiowego wzdłuż linii pomiarowej klasy 2 (Rys.3) określonej zgodnie z PN-EN ISO 9513 [17]. Na Rys.4 przedstawiony został schemat obciążania i odciążania próbki przy wyznaczaniu początkowego oraz średniego siecznego modułu sprężystości metodą A.



Rys. 3. Próbkki przygotowane do badań.



Rys. 4. Schemat przedstawiający cykle obciążania i odciążania próbki przy wyznaczaniu początkowego oraz średniego siecznego modułu sprężystości - metoda A (----- to cykl obciążania próbki, - - - - - to cykl obciążania próbki przy wyznaczaniu początkowego siecznego modułu sprężystości, - - - - - to cykl obciążania próbki przy wyznaczaniu średniego siecznego modułu sprężystości; σ - przyłożone naprężenie w MPa, σ_a - górna granica naprężenia równa $1/3 \cdot f_c$, σ_b - dolna granica naprężenia równa $0,1 \cdot f_c < \sigma_b < 0,15 \cdot f_c$, σ_p - naprężenie początkowe równe $0,5 \text{ MPa} < \sigma_p < \sigma_b$, t - czas w sekundach) - na podst. [16].

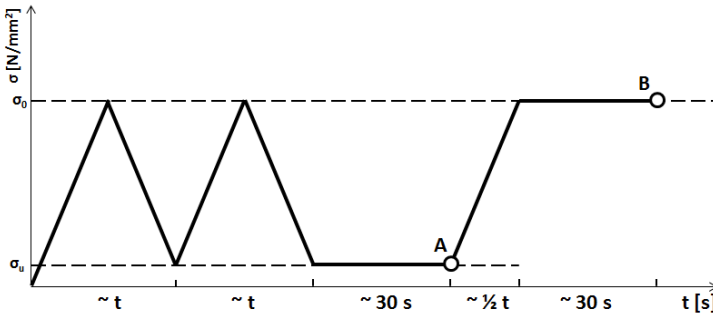
Początkowy sieczny moduł sprężystości, $E_{c,0}$ jest zdefiniowany jako $E_{c,0} = \Delta\sigma / \Delta \epsilon_0 = (\sigma_{am} - \sigma_{bm}) / (\epsilon_{a,1} - \epsilon_{b,0})$. Średni sieczny moduł sprężystości wyznaczany (wg metody A) obliczany jest na podstawie poniższego wzoru: $E_{c,s} = \Delta\sigma / \Delta \epsilon_s = (\sigma_{am} - \sigma_{bm}) / (\epsilon_{a,3} - \epsilon_{b,2})$.

3.2 Badanie modułu sprężystości betonu metodą wg DIN 1048-5

Norma określa metody badania wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na rozciąganie, statycznego modułu sprężystości, przepuszczalności wody i zawartości wilgoci w utwardzonym betonie.

Przyrządy do pomiaru były przymocowane po przeciwnych stronach próbki i równoległe do jej osi w taki sposób, aby punkty pomiarowe były symetryczne względem środka próbki i nie były bliżej żadnego z końców próbki niż odległość równa połowie średnicy próbki walcowej i równą większej długości bocznej powierzchni czołowej dla próbek w kształcie graniastosłupa.

Próbkę umieszczono centralnie w maszynie wytrzymałościowej, a górną płytę wyrównano tak, aby była w pełnym kontakcie z próbką. Następnie próbkę poddano naprężeniu podstawowemu σ_u w przybliżeniu równemu $0,5 \text{ N/mm}^2$ i rzeczywistemu naprężeniu obliczonemu na podstawie pola przekroju poprzecznego w połowie wysokości próbki. Obciążanie i odciążanie próbki wykonywano z prędkością $(0,5 \pm 0,2) \text{ N/mm}^2$ na sekundę, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 5. Po zakończeniu wszystkich pomiarów sprężystości próbkę poddano obciążaniu z określoną prędkością aż do jej zniszczenia.



Rys. 5. Schemat przedstawiający cykl obciążania i odciążania próbki przy wyznaczaniu średniego siecznego modułu sprężystości wg DIN 1048-5 (A jest punktem odczytu podstawowego naprężenia ($\sigma_u = 0,5 \text{ MPa}$), odpowiedniego odkształcenia ϵ_u i długości przed trzecim cyklem obciążania; B jest punktem odczytu górnego naprężenia ($\sigma_0 = 1,3 \cdot f_{ck}$), odpowiedniego odkształcenia ϵ_0 i długości podczas trzeciego cyklu obciążania; t – czas obciążania i odciążania próbki wynikający z prędkości obciążania i odciążania) – na podst. [2].

Statyczny moduł sprężystości przy ściskaniu E_b oblicza się z następującego równania:

$$E_b = \Delta\sigma / \Delta\epsilon = (\sigma_0 - \sigma_u) / (\epsilon_0 - \epsilon_u)$$

gdzie:

σ_0 – górne naprężenie podczas trzeciego cyklu obciążania w N/mm^2 ,

σ_u – odstawowe naprężenie przed trzecim cyklem obciążania w N/mm^2 ,

ϵ_0 – średnie odkształcenie przy górnym obciążeniu w punkcie B,

ϵ_u – średnie odkształcenie w warunkach podstawowego obciążenia w punkcie A.

4. Wyniki badań i dyskusja

Chociaż różnic pomiędzy poszczególnymi metodami badania modułu sprężystości betonu jest wiele, to najistotniejszą i mającą największy wpływ na otrzymywane podczas wykonywania oznaczenia wyniki jest zakres naprężeń jakim poddawana jest próbka podczas cykli obciążania i odciążania. W przypadku Metody A opisanej w normie PN-EN 12390-13 próbka najpierw jest poddawana trzem cyklom obciążania wstępnego w zakresie:

- pierwszy cykl: od 0 MPa do σ_b spełniającego zależność $0,1 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \cdot f_c$,
- drugi i trzeci cykl: od $\sigma_p = 0,5$ MPa do σ_b spełniającego zależność $0,1 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0,15 \cdot f_c$.

Po trzech cyklach obciążania wstępnego następują trzy cykle obciążania głównego w zakresie od σ_p spełniającego zależność $0,1 \cdot f_c \leq \sigma_p \leq 0,15 \cdot f_c$ do $\sigma_a = 1/3 \cdot f_c$.

W przypadku metody z normy DIN 1048-5 również nie występują cykle obciążania wstępnego. Próbka poddawana jest obciążeniu w zakresie od 0 MPa do $\sigma_u = 0,5$ MPa a następnie trzem cyklom obciążania głównego w zakresie od $\sigma_u = 0,5$ MPa do $\sigma_0 = 1/3 \cdot f_c$.

Tabela 3. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie na próbkach „świadkach”

Oznaczenie betonu wg Tab 2	Rodzaj kruszywa	Wytrzymałość na ściskanie, MPa
A1	amfibolit	56,7
A2		78,4
B1	bazalt	54,1
B2		78,0

Tabela 4. Wyniki oznaczeń modułu sprężystości betonu przy ściskaniu przeprowadzonych według metod zawartych w normach PN-EN 12390-13 oraz DIN 1048-5

Oznaczenie betonu wg Tab 2	Rodzaj kruszywa	Średni moduł sprężystości betonu E_{cm}					
		PN-EN 12390-13			DIN 1048-5		
		E_{cm} , MPa	SD, MPa	CV, %	E_{cm} , MPa	SD, MPa	CV, %
A1	amfibolit	36353	N.A.	N.A.	35177	N.A.	N.A.
	A2	41936	1330	3,2	40054	499	1,2
B1	bazalt	41489	N.A.	N.A.	40692	N.A.	N.A.
	B2	46746	1275	2,7	45540	1251	2,7

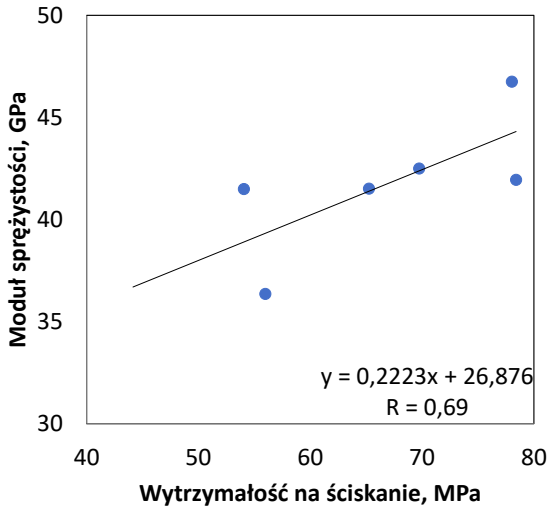
3.2. Analiza wyników badań

Wyniki badań modułu sprężystości we wszystkich przypadkach cechowały się niskimi wartościami odchylenia standardowego, SD (ang. *standard deviation*) i współczynnika zmienności, CV (ang. *coefficient of variation*). Wartości CV nie przekroczyły 3,2% (por. Tab.4) - oznacza to statystyczną reprezentatywność wartości średnich siecznych modułów sprężystości otrzymanych na drodze laboratoryjnej.

Wyniki oznaczeń wytrzymałości na ściskanie betonu (Tab.3) oraz modułu sprężystości (Tab.4) wyraźnie wskazują na to, że niższa wytrzymałość na ściskanie betonów

(zawierających w składzie domieszkę znacznie redukującą wodę w ilości 0,70% mc. oraz domieszkę napowietrzającą w ilości 0,17% mc.) determinuje niższą wartość średniego siecznego modułu sprężystości w porównaniu do betonów zawierających więcej superplastyfikatora (0,80% mc.) i mniej napowietrzacza (0,10% mc.). Zależność ta jest prawdziwa zarówno przy badaniu wykonanym według procedury z normy europejskiej, jak i niemieckiej. Uzyskane wyniki potwierdziły zatem zależność opisaną we wspomnianej wcześniej normie PN-EN 1992-1-1 [13].

W celu skwantyfikowania tej zależności uzyskane wyniki uzupełniono o dane ze wcześniejszych badań [19], [20] i na podstawie takiej populacji (obejmującej 6 składów betonu o wytrzymałości z zakresu od 54 do 78 MPa) wyznaczono liniową zależność o wysokim współczynniku korelacji ($R = 0,85$). Graficzna reprezentacja tej zależności została przedstawiona na Rys. 6.



Rys. 6 Zależność modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie betonu - na podst. badań prezentowanych w niniejszym artykule oraz [19] i [20]

W Tab.8 zestawione zostały wartości modułu sprężystości betonu w zależności od metody badania i rodzaju użytego w betonie kruszywa grubego. Wyraźnie widać, że wartość modułu sprężystości w dużym stopniu zależy od rodzaju zastosowanego kruszywa, ale też od zaimplementowanej metody badawczej.

Tabela 8 Różnice w wynikach badania modułu sprężystości betonów prowadzonego według dwóch metod - na podst. badań prezentowanych w niniejszym artykule.

Rodzaj kruszywa grubego	Oznaczenie betonu wg Tab 2	Metoda badawcza	Średni moduł sprężystości Ecm, GPa	Różnica, Δ Ecm, %
Amfibolit	A1	PN-EN 12390-13	36353	3,3
		DIN 1048-5	35177	
	A2	PN-EN 12390-13	41,936	4,7
		DIN 1048-5	40,054	
Bazalt	B1	PN-EN 12390-13	41489	2,0
		DIN 1048-5	40692	
	B2	PN-EN 12390-13	46,746	2,6
		DIN 1048-5	45,540	

Betony z kruszywem bazaltowym charakteryzowały się siecznym modułem sprężystości o wartościach o 10% - 14% wyższych w porównaniu do betonów z kruszywem amfibolitowym. Tym samym potwierdzony został zapis zawarty w Eurokodzie 2 mówiący o tym, że moduł sprężystości betonu zależy w sposób bezpośredni od modułów sprężystości poszczególnych jego składników.

Z Tab.8 wynika również, że betony badane według metody z normy PN-EN 12390-13 wykazywały wyższe wartości siecznych modułów sprężystości w porównaniu do betonów badanych według metody z normy DIN 1048-5. Wartości były wyższe o ponad 3,3% w przypadku betonów z kruszywem amfibolitowym oraz o ponad 2% - w przypadku betonów z kruszywem bazaltowym.

4. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było sformułowanie następujących wniosków.

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły zasygnalizowany w Eurokodzie 2

[13] wpływ rodzaju (materiału) zastosowanego kruszywa na wartość modułu sprężystości utwardzonego betonu. Ustalono, że betony z kruszywem bazaltowym charakteryzują się wartościami średniego siecznego modułu sprężystości wyższymi o minimum 10% w porównaniu do betonów z kruszywem amfibolitowym (oraz z identycznym spoiwem i piaskiem rzecznym). Niemniej betony zawierające oba rodzaje kruszywa wykazały się siecznym modułem sprężystości o wartościach przekraczających 40 GPa (tylko jeden beton uzyskał mniej - ponad 35 GPa), co pozwala na ich wykorzystanie do wykonania betonu przeznaczonego do budowy obiektów mostowych (jak wstępnie założono).

Wyniki potwierdziły także normową [13] zależność pomiędzy wartościami wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości betonu. Podczas badań empirycznie wykazano, że niższa wytrzymałość betonu na ściskanie determinuje niższe wartości średniego siecznego modułu sprężystości tego betonu.

Na podstawie uzyskanych wyników udowodniono, że metoda wyznaczania modułu sprężystości betonu ma istotny wpływ na wartość wyniku tego badania.

Próbki betonu z kruszywem amfibolitowym badane według procedury zawartej w Normie Europejskiej PN-EN 12390-13 wykazywały o 3 do 5 % wyższe wartości średnich siecznych modułów sprężystości w porównaniu do próbek identycznych betonów badanych według procedury niemieckiej DIN 1048-5. Próbki betonu z kruszywem bazaltowym w badaniu wg PN-EN wykazywały wartości średnich siecznych modułów sprężystości wyższe o ponad 2% niż w badaniu wg. DIN.

Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić również istotny wpływ ilości dodawanych do betonu domieszek. Zmianie dozowania domieszki napowietrzającej z 0,15% na 0,10% (względem masy cementu) skutkującej zmniejszeniem napowietrzenia betonu z 6,5% do 5% towarzyszył wzrost wytrzymałości na ściskanie o około 20 MPa. Łukowski [6] wspomina o wpływie modyfikacji domieszekami na właściwości mechaniczne betonu (w tym wytrzymałość na ściskanie, a w konsekwencji także na moduł sprężystości betonu), jednak zazwyczaj analizuje się w tym kontekście pozytywny wpływ plastyfikatorów i superplastyfikatorów. Tak znaczący wpływ ilości domieszki napowietrzającej na wynik oznaczenia wytrzymałości na ściskanie betonu, jaki zarejestrowano w prezentowanych w artykule badaniach, był dla autorów pewnym zaskoczeniem, jednak aby sformułować bardziej szczegółowe wnioski w kontekście tego zagadnienia konieczne są dalsze badania, w tym badania w zakresie kompatybilności domieszki upłynniającej i napowietrzającej.

Niezależnie od badań wytrzymałości betonu na ściskanie, których wynik bardzo zależy od zastosowanej metodyki badawczej [5], [8], [21] należy pamiętać, że badanie modułu sprężystości betonu przeprowadzone według metody z normy PN-EN 12390-13 daje wyższe wartości, niż te uzyskiwane dotychczas w wyniku badanie popularną metodą z normy niemieckiej, a wartości uzyskanych obiema metodami nie można porównywać bezpośrednio.

Literatura

- [1] C. Castillo, A. J. Duranni, Effect of transient high temperature on high-strength concrete, *ACI Material Journal*, 87, Nr 1, s. 47-53, 1990
- [2] DIN 1048-5 Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper (ang. Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould))
- [3] L. Domagała, J. Galus, Wpływ naprężeń ściskających wg PN-EN 12390-13 oraz PN-EN 1992-1-1 na wynik oznaczenia modułu sprężystości betonu, *Materiały Budowlane* 8/2017, s. 55-59
- [4] J. Góra, Odształcalność doraźna betonów wysokowartościowych z kruszywami łamanymi, *Budownictwo i Architektura*, 9, s. 77-85, 2011
- [5] Z. Jamroży, *Beton i jego technologie*, PWN, Warszawa, 2003
- [6] P. Łukowski, *Modyfikacja materiałowa betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016
- [7] J. C. Marechal, Variations in the modulus of elasticity and Poisson's ratio with temperature, *Int. Seminar on Concrete for Nuclear Reactors*, ACI SP-34, 1, s. 495503, Detroit, Michigan, 1972
- [8] A. M. Neville, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków, 2000
- [9] J. Piasta, W. Piasta: *Budownictwo ogólne. Tom I Materiały i wyroby budowlane. Beton zwykły, wysokowartościowy i specjalny*, Arkady, Warszawa, 2010
- [10] W. Piasta, W. Budzyński, J. Góra, Wpływ rodzajów kruszywa grubego na odształcalność betonów zwykłych, *Przegląd Budowlany*, 7-8/2012
- [11] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [12] PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu
- [13] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 11: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [14] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [15] PN-EN 12390-3:2009 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań

- [16] PN-EN 12390-13:2013 Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu
- [17] PN-EN ISO 9513:2005 Metale. Wzorcowanie ekstensometrów stosowanych w próbie jednoosiowego rozciągania
- [18] P.P. Woyciechowski, G. Adamczewski, J. Adaszyńska, i. in., Ocena wpływu charakterystyki kruszywa grubego na moduł sprężystości betonu wysokiej wytrzymałości, Konferencja Dni Betonu. Tradycja i nowoczesność, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2014, s. 379-388
- [19] E. Szmigiera, Sprawozdanie z badania oznaczenie współczynnika sprężystości betonu przy ściskaniu według PN-EN 12390:2014-02, Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Łądowej, Politechnika Warszawska, 2017.
- [20] K. Kamiński, Badania siecznego modułu sprężystości betonu przy ściskaniu na podstawie normy PN-EN 12390-13:2014-02, Instytut Budownictwa w Płocku, Politechnika Warszawska, 2017.
- [21] J.J. Sokołowska, T. Piotrowski, I. Gajda, The Influence of Specimen Shape and Size on the PCC Compressive Strength Values, International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018), Springer, Cham, 2018, s. 267-273