

Innowacyjny system monitoringu cech mechanicznych betonu

dr inż. Piotr Łaziński, mgr inż. Jakub Krząkała, Politechnika Śląska,
mgr inż. Grzegorz Grządziela, TPA Sp. z o.o.

1. Wprowadzenie

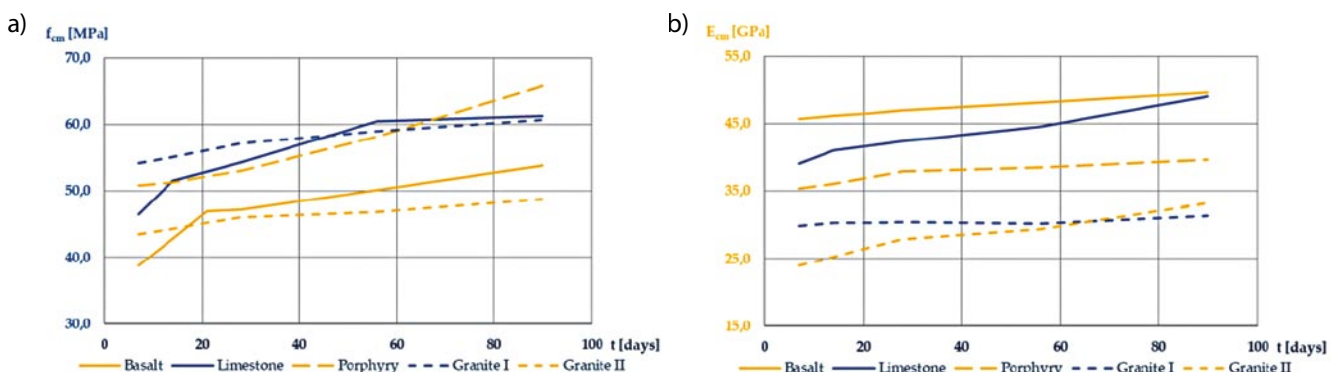
Beton stosowany w konstrukcjach mostowych charakteryzuje się szybkim przyrostem wytrzymałości na ściskanie oraz zmienną odkształcalnością. Używany cement portlandzki w masywnych dźwigarach podczas wiązania wydziela ciepło hydratacji. We wnętrzu typowej belki mostu sprężonego obserwowany jest wzrost temperatury dochodzący nawet do 60°C już po około 24 h. Zjawisko to korzystnie wpływa na wczesną wytrzymałość betonu [1]. Zmienna odkształcalność betonu spowodowana jest stosowaniem kruszyw o różnych cechach odkształcalności [2, 3, 5]. Są to kruszywa granitowe, granodiorytowe, porfirowe, wapienne, dolomitowe i bazaltowe pozyskiwane z kilkunastu kopalń na terenie Polski. Własne wyniki badań cech mechanicznych betonów z zastosowaniem różnych kruszyw zestawiono na rysunku 1. Uzyskano wartości modułów sprężystości od 25 GPa dla kruszyw granitowych do 48 GPa dla kruszyw bazaltowych. Laboratoryjne badania betonu są wykonywane na próbkach przechowywanych w wodzie o temperaturze kontrolowanej 20°C [7, 9]. Otrzymywane wyniki wytrzymałości betonu nie oddają rzeczywistych warunków dojrzewania. Badania modułów sprężystości betonu wykonuje się zgodnie z normą [11] metodą A lub B. W procesie cyklicznego obciążenia i odciążenia próbek dochodzi do eliminacji odkształceń trwałych. W takich badaniach uzyskane wartości modułów sprężystości betonu różnią się od odkształcalności konstrukcji w momencie sprężania przęsła. Wprowadzana siła sprężająca jest pierwszym oddziaływaniem na beton, w którym zachodzą odkształcenia trwałe. W procesie

podejmowania decyzji na budowie kluczowa jest minimalizacja ryzyk. Zjawisko wpływu temperatury wiązania betonu oraz rodzaju kruszywa na uzyskiwane laboratoryjnie cechy mechaniczne betonu wymaga wdrożenia indywidualnych procedur badawczych.

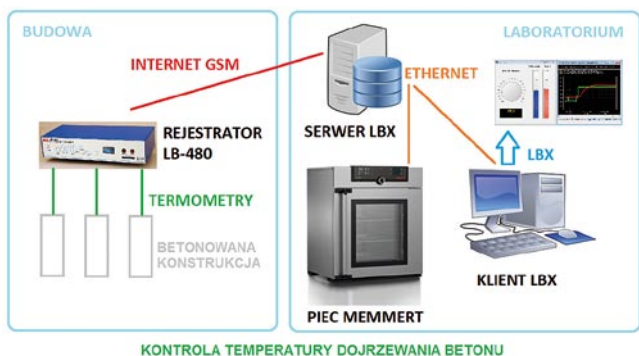
W artykule przedstawiono wyniki programu badań identyfikujących cechy mechaniczne betonu na przykładzie budowanego wiaduktu drogowego WG-4 na Obwodnicy Raciborza. Celem badań było porównanie metody znormalizowanej i odwzorowanej na uzyskiwane wyniki cech betonu w funkcji wieku. Wyniki odkształcalności betonu zostały zweryfikowane przez badania in situ na rzeczywistej konstrukcji. W pierwszym etapie kontrolowano zmiany geometryczne przęsła bezpośrednio po sprężeniu. Drugi etap weryfikacji polegał na pomiarach ugięć przęsła podczas próbnych obciążeń. Zastosowane modele numeryczne posłużyły do analizy odkształcalności przęsła [4].

2. Innowacyjny system monitoringu

Celem zastosowania systemu monitoringu była rejestracja temperatury dojrzewania betonu we wnętrzu dźwigara. Dzięki rejestracji temperatury w konstrukcji system sterował piecem, uzyskując zbliżone warunki pielęgnacji próbek w laboratorium. Uzyskane warunki odwzorowane dojrzewania betonu pozwoliły określić jego cechy mechaniczne. System monitoringu składał się z czujników temperatury umieszczonych w konstrukcji rejestratora LB-480, serwera LBX oraz pieca Memmerta. Innowacyjny system monitoringu firmy TPA jest mobilny i umożliwia kontrolę betonowania



Rys. 1. Własne wyniki badań cech mechanicznych betonu z zastosowaniem różnych kruszyw



Rys. 2. Innowacyjny system monitoringu temperatury dojrzewania betonu

na budowie. Uzupełnieniem systemu jest procedura postępowania na potrzeby określania cech mechanicznych betonu w warunkach odwzorowanych.

3. Metodyka badań

Cechy mechaniczne betonu określono na podstawie badań niszczących próbek pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych i warunkach znormalizowanych. Badania przeprowadzono na bloku testowym w etapie 1 przed zatwierdzeniem receptury. Etap 2 dotyczył badań cech betonu podczas betonowania ustroju nośnego. Na potrzeby analiz cech mechanicznych betonu pobierano zawsze minimum 24 szt. próbek walcowych o średnicy $d = 150$ mm i wysokości $h = 300$ mm [8]. W warunkach odwzorowanych i znormalizowanych pielęgnowano po 12 szt. próbek. Badania niszczące na bloku testowym określające zależność naprężenie-odkształcenie wykonano po 3, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Podczas betonowania przeszła badania wykonano po 6 i 28 dniach. Badania modułu sprężystości betonu zrealizowano w maszynie wytrzymałościowej do prób ściskania klasy 1. Zmiana naprężenia w betonie rejestrowana była z próbkowaniem co 0,2 s. Pomiar odkształceń

realizowany był wzdłuż trzech linii rozmieszczonych na pobocznicę co 120° [10].

Analizę cech mechanicznych betonu przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch metod:

- metoda bezpośrednia z uwzględnieniem normy [12],
- metoda A zgodnie z normą [11].

Metoda bezpośrednia określenia siecznego modułu sprężystości betonu uwzględnia wymagania normowe opisane w [12]. Przy obliczaniu modułu skorzystano ze wzorów:

$$E_{cm} = \frac{0,4 f_{cm}}{\Delta \epsilon} \quad (1)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta \epsilon$ – przyrost odkształcenia próbki betonowej wywołany osiągnięciem $0,4f_{cm}$,

Δl – zmiana długości próbki wywołana osiągnięciem $0,4f_{cm}$,
 l_0 – długość próbki walcowej.

Średni moduł sprężystości betonu obliczono według wzoru:

$$E_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{cmi}}{n} \quad (3)$$

Zgodnie z normą [11] do wyznaczenia siecznego modułu sprężystości betonu przyjęto metodę A. Określenie modułu początkowego E_{c0} i ustabilizowanego $E_{c,s}$ zrealizowano zgodnie z procesem obciążania przedstawionym na rysunku 2. Przy obliczaniu modułu skorzystano ze wzorów:

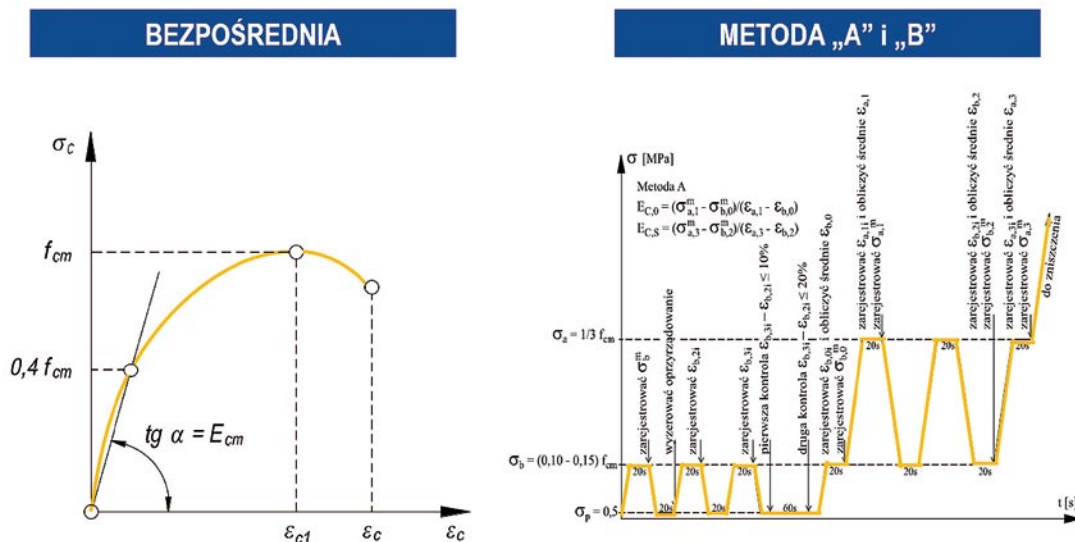
$$E_{c,s} = \frac{\sigma_{a,3}^m - \sigma_{b,2}^m}{\epsilon_{a,3} - \epsilon_{b,2}} \quad (4)$$

gdzie:

$\sigma_{a,3}^m, \sigma_{b,2}^m$ – zarejestrowane naprężenia z przedziału $1/3f_{cm}$ i $(0,10-0,15)f_{cm}$,

$\epsilon_{a,3}; \epsilon_{b,2}$ – zarejestrowane odkształcenia z przedziału $1/3f_{cm}$ i $(0,10-0,15)f_{cm}$.

Rys. 3. Proces obciążania próbki podczas badania metodą bezpośrednią i metodą A



4. Wyniki badań

4.1. Badania laboratoryjne

Ustrój nośny obiektu WG-4 zaprojektowano z betonu klasy C35/45. Właściwości mechaniczne określone dla tej klasy betonu w normie PN-EN 1992 to wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie $f_{ck} = 35,0$ MPa oraz moduł sprężystości $E_{cm} = 34,0$ GPa. Receptura mieszanki betonowej zawiera cement 42,5R-NA oraz kruszywo grube z gysu granitowego wydobywanego w kopalni Strzelin. Zakładana zawartość powietrza to 4,0–6,0%. Badania betonu zostały przeprowadzone w dwóch seriach: na bloku testowym oraz w czasie betonowania ustroju nośnego obiektu.

Blok testowy

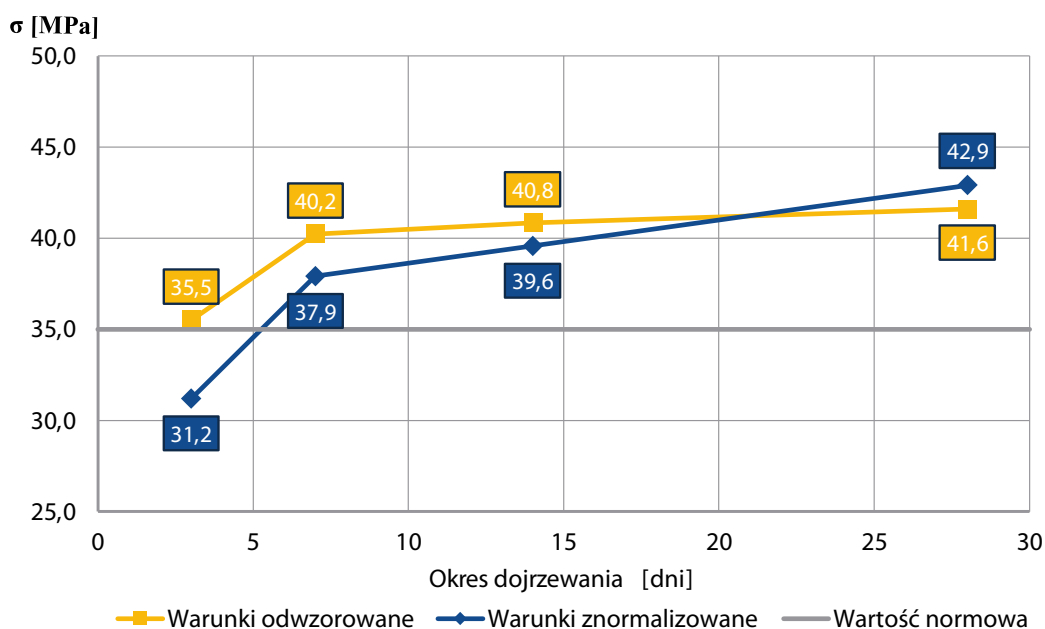
Blok testowy o wymiarach 1,2x1,2x1,2 m został zabetonowany 16.10.2020 roku. Wbudowano mieszankę o konsystencji S3 (opad stożka 110 mm), zawartości powietrza 5,0% i temperaturze 14,5°C. Maksymalna temperatura o wartości 47,6°C została osiągnięta po 32 godzinach od zabetonowania bloku. Badania te zostały wykonane na potrzeby określenia podniesienia wykonawczego podczas procesu sprężania oraz aktualizacji programu sprężania. Wytrzymałość betonu oraz moduł sprężystości z wykorzystaniem metody bezpośredniej przeprowadzono w wieku 3, 7, 14 i 28 dni.

Zestawione w tabeli 1 oraz na rysunku 4 wyniki badań z bloku testowego potwierdziły wpływ temperatury wiązania na początkowy przyrost wytrzymałości betonu na ściskanie. Dla próbek pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych już po trzech dniach uzyskano wymagane 35 MPa. Po 7 dniach nastąpił przyrost do 40,2 MPa, a w kolejnych dniach nie zaobserwowano wpływu wieku na dalszy wzrost wytrzymałości. Nieco inne wyniki uzyskano dla próbek pielęgnowanych w wodzie. Po 3 dniach uzyskano jedynie 31,2 MPa, nie spełniając wymaganych 35 MPa. Dopiero po 7 dniach uzyskana wartość wynosiła 37,9 MPa. W funkcji wieku uzyskano dalszy wzrost wytrzymałości do 42,9 MPa po 28 dniach dojrzewania. W przypadku modułu sprężystości betonu dostrzec można wpływ wieku na wzrost wartości tylko dla próbek pielęgnowanych w warunkach znormalizowanych (rys. 5). Po 3 dniach uzyskano wartość 22,5 GPa, a po 28 dniach wartość modułu wyniosła 28,4 GPa. Dla próbek pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych już po 3 dniach uzyskano wartość 25,1 GPa. Minimalny wzrost nastąpił w funkcji wieku uzyskując 26,6 GPa po 28 dniach dojrzewania. Na potrzeby podejmowania decyzji na budowie o terminie sprężenia za miarodajne uznano wyniki badań dla próbek pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych. Określony moduł sprężystości betonu posłużył do aktualizacji programu sprężenia oraz podniesienia wykonawczego.

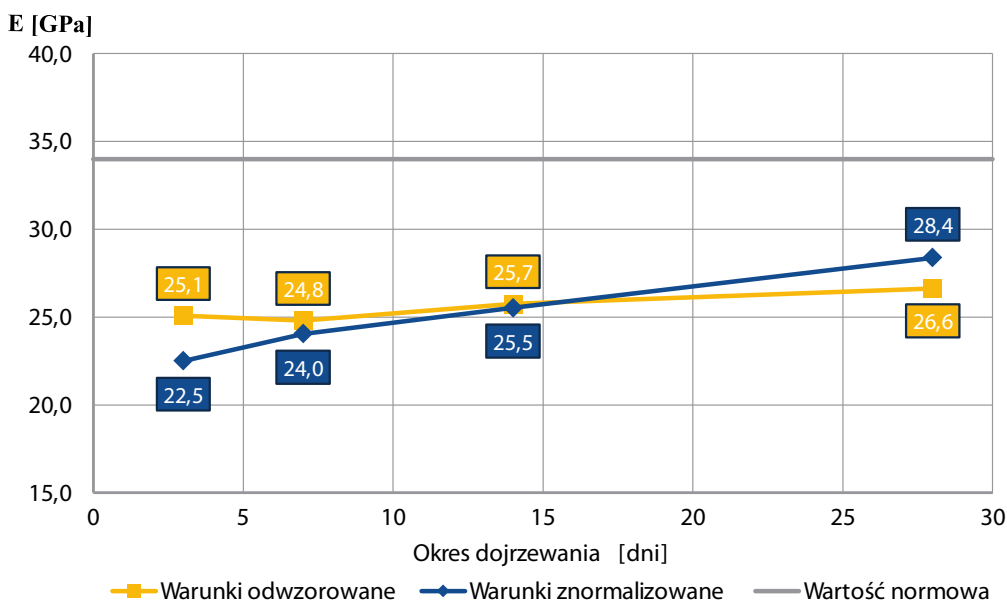
Tabela 1. Zestawienie wyników badań – blok testowy

Wiek betonu t [dni]		3	7	14	28
Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	Warunki odwzorowane	35,5	40,2	40,8	41,6
	Warunki znormalizowane	31,2	37,9	39,6	42,9
Moduł sprężystości Metoda bezpośrednia E_{cm} [GPa]	Warunki odwzorowane	25,1	24,8	25,7	26,6
	Warunki znormalizowane	22,5	24,0	25,5	28,2

Rys. 4. Wytrzymałość betonu na ściskanie w czasie z uwzględnieniem warunków pielęgnacji



Rys. 5. Moduł sprężystości betonu w czasie z uwzględnieniem warunków pielęgnacji



Ustrój nośny obiektu WG-4

Betonowanie ustroju nośnego obiektu WG-4 odbyło się 26.11.2020 roku. Została wbudowana mieszanka o konsystencji S3 (opad stożka 150 mm), zawartości powietrza 3,8% i temperaturze 12,3°C. Maksymalna temperatura o wartości 45,8°C została osiągnięta po 32 godzinach od zabetonowania bloku. Badania wykonano po 6 dniach dojrzewania podczas sprężania ustroju nośnego oraz dodatkowo po 28 dniach. W obu terminach zostały przeprowadzone badania modułów metodą bezpośrednią oraz metodą A. Wyniki badań cech betonu uzyskane dla próbek pielęgnowanych w warunkach znormalizowanych i odwzorowanych zestawiono w tabeli 2. Wytrzymałość na ściskanie po 6 dniach wyniosła 43,7 MPa dla próbek pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych oraz 40,5 MPa dla próbek pielęgnowanych w warunkach znormalizowanych. Odwrotna sytuacja

była podczas badań po 28 dniach dojrzewania. Tu wyższe wartości uzyskano dla próbek pielęgnowanych w warunkach znormalizowanych (53,3 MPa). Niezależnie od metody już po 6 dniach uzyskano wymaganą wytrzymałość wynoszącą 35 MPa.

W przypadku modułu sprężystości dla każdej metody pielęgnacji uzyskano nieznaczne przyrosty modułów pomiędzy 6 a 28 dniem dojrzewania. Badania wykazały wpływ metody pielęgnacji na uzyskiwane moduły. W badaniach metodą bezpośrednią po 6 dniach otrzymano wyższą wartość (27,6 GPa) dla próbek pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych (tab. 2). W przypadku badań po 28 dniach metodą A moduł ustabilizowany był większy (42,9 GPa) dla próbek pielęgnowanych w warunkach znormalizowanych.

Tabela 2. Zestawienie wyników badań – ustrój nośny WG-4

Wiek betonu t [dni]		6	28
Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} [MPa]	Warunki odwzorowane	43,7	50,7
	Warunki znormalizowane	40,5	53,3
Moduł sprężystości Metoda bezpośrednia E_{cm} [GPa]	Warunki odwzorowane	27,6	30,1
	Warunki znormalizowane	25,0	30,7
Moduł sprężystości Metoda A – moduł początkowy E_{com} [GPa]	Warunki odwzorowane	27,4	30,3
	Warunki znormalizowane	27,0	30,6
Moduł sprężystości Metoda A – moduł ustabilizowany E_{csm} [GPa]	Warunki odwzorowane	34,6	38,6
	Warunki znormalizowane	33,9	42,9

4.2. Badania przemieszczeń pionowych pod próbnym obciążeniem statycznym

29.04.2021 roku 154 dni od zabetonowania ustroju nośnego wykonano badanie przemieszczeń pionowych pod próbnym obciążeniem statycznym. Badanie przeprowadzono przed wykonaniem wyposażenia obiektu, co pozwoliło wyeliminować jego wpływ na sztywność obiektu.

Ugięcia sprężyste dźwigarów A, B i C zestawiono w tabeli 3. Dodatkowo określono przemieszczenia teoretyczne w modelu numerycznym, w którym parametry geometryczne odwzorowano z uwzględnieniem stopnia zbrojenia. W przypadku normowego modułu (34,0 GPa) uzyskano większe ugięcia od wartości otrzymanych podczas badań in situ. Dla modułu sprężystości określonego laboratoryjnie metodą A w warunkach znormalizowanych (42,9 GPa) uzyskane ugięcia teoretyczne były mniejsze od wartości z badań in situ. Dużą zgodność uzyskano w przypadku określania modułu ustabilizowanego metodą A w warunkach odwzorowanych (38,6 GPa). Relacja ugięć wyniosła od 97,6 do 100,5%. Badania porównawcze potwierdziły pracę sprężystą konstrukcji



Rys. 6. Próbné obciążenie ustroju nośnego WG-4

po eliminacji odkształceń trwałych, które zachodzą w momencie sprężenia. Uwzględniając etap sprężania oraz fazę użytkową mostów sprężonych, konieczne jest określenie dwóch wartości modułów:

- metodą bezpośrednią przed eliminacją odkształceń trwałych (moment sprężenia),
- metodą A po eliminacji odkształceń trwałych (faza użytkowa).

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania porównawcze cech mechanicznych betonu potwierdziły korzystny wpływ ciepła hydratacji na wczesną wytrzymałość betonu. Zjawisko to można odwzorować z wykorzystaniem systemu monitoringu temperatury dojrzewania betonu w konstrukcji. Na potrzeby podejmowania decyzji o sprężaniu przęsła we wczesnym wieku do 7 dni za miarodajne należy uznać badania na próbkach pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych. Dzięki temu minimalizowane są ryzyka związane z podejmowanymi decyzjami na budowie. Skracany jest czas realizacji, co zmniejsza koszty budowy. Wdrożony system monitoringu pozwala na kontrolę zachodzących zjawisk, które różnią się w zależności od masywności dźwigarów oraz okresów betonowań. Bardzo ważną kwestią jest odkształcalność betonu związana z rodzajem zastosowanego kruszywa. Zmiana modułu

Tabela 3. Zestawienie wyników badań – próbne obciążenie

Dźwigar		A	B	C
Pomierzone przemieszczenia sprężyste	u_s [mm]	7,96	7,87	7,11
Przemieszczenia teoretyczne Moduł wg PN-EN 1992 $E_{cm} = 34,0$ GPa	u_{t1} [mm]	8,99	9,15	8,24
	u_s/u_{t1}	88,5%	86,0%	86,3%
Przemieszczenia teoretyczne Metoda A – moduł ustabilizowany, warunki odwzorowane $E_{csm} = 38,6$ GPa	u_{t2} [mm]	7,92	8,06	7,26
	u_s/u_{t2}	100,5%	97,6%	97,9%
Przemieszczenia teoretyczne Metoda A – moduł ustabilizowany, warunki znormalizowane $E_{csm} = 42,9$ GPa	u_{t3} [mm]	7,13	7,25	6,53
	u_s/u_{t3}	111,6%	108,6%	108,9%

sprężystości betonu wpływa na prawidłowy program sprężania oraz właściwe przyjęcie podniesień wykonawczych. W tym celu konieczne jest określenie modułu sprężystości na zarobie próbnym. Przedstawiony sposób wyznaczania cech mechanicznych na wykonanym bloku testowym uwzględnia zjawiska termiczne zachodzące podczas wiązania. Takie podejście pozwala jeszcze przed docelowym betonowaniem przyjąć zgodne parametry materiałowe. Badania potwierdziły pracę betonowego przęsła w dwóch fazach. Pierwsza faza dotyczy sprężania przęsła, w którym zachodzą odkształcenia trwałe. Na tym etapie potwierdzono skuteczność określania modułu sprężystości betonu metodą bezpośrednią na próbkach pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych ($E_{cm,1} = 27,6$ GPa). Dzięki takiemu podejściu uzyskano geometrię przęsła zgodną do 1 cm z projektowaną niweletą. Druga faza pracy betonowego przęsła dotyczy użytkowania obiektu. Dzięki wykonaniu próbnego obciążenia konstrukcji bez wykonanego wyposażenia ustalono odkształcalność betonu w fazie użytkowej. Na tej podstawie potwierdzono zmniejszenie się odkształcalności betonu, co jest związane z eliminacją odkształceń trwałych. Za miarodajne uznano określenie modułu sprężystości metodą A na próbkach pielęgnowanych w warunkach odwzorowanych ($E_{cm,2} = 38,6$ GPa). Takie podejście pozwala na aktualizację modelu obliczeniowego i jego stosowanie w fazie użytkowej. Uwzględniając specyfikę badań laboratoryjnych betonu oraz niepewności związane z procesem produkcji mieszanki betonowej, jej wbudowaniem oraz samą pielęgnacją stwardniałego betonu, należy przyjąć poziom ufności dla określanych cech mechanicznych betonu równy 95%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Neville A. M., Właściwości Betonu – wydanie czwarte, Polski Cement, Kraków 2000
- [2] Łaziński P., Krząkała J., Wpływ wybranych kruszyw na odkształcalność mostów betonowych, X Konferencja Dni Betonu, Wisła, 8–10 października 2018
- [3] Łaziński P., Krząkała J., Estimation of modulus of elasticity of concrete on granite aggregate with the consideration of mechanical parameters of aggregate, The 12th Central European Congress on Concrete Engineering CCC 2017, Tokaj, Hungary, 31 August to 1 September 2017, Proceedings of the fib Congress
- [4] Kuras P., Ortyl Ł., Owerko T., Salamak M., Łaziński P., GB-SAR in the diagnosis of critical city infrastructure – a case study of a load test on the long tram extradosed bridge, Remote Sens. – Switz., DOI: 10.3390/rs12203361
- [5] Piasta W., Burzyński W., Góra J., Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność betonów zwykłych, Przegląd Budowlany 7–8/2012
- [6] Receptura mieszanki betonowej C35/45 nr MOS/X-045-5-G-28-12-3-B-M01, CEMEX Polska Sp. z o.o., Mysłowice, 2020
- [7] PN-EN 206+A1:2016-12: Beton: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [8] PN-EN 12350-1:2019: Badania mieszanki betonowej. Część 1: Pobieranie próbek i uniwersalna aparatura
- [9] PN-EN 12390-2:2019: Badanie betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [10] PN-EN 12390-3:2019: Badanie betonu. Część 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- [11] PN-EN 12390-13:2021-12: Badania betonu. Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu
- [12] PN-EN 1992-2:2010: Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczanie i reguły konstrukcyjne