

Czynniki decydujące o właściwościach wytrzymałościowych betonu do nawierzchni

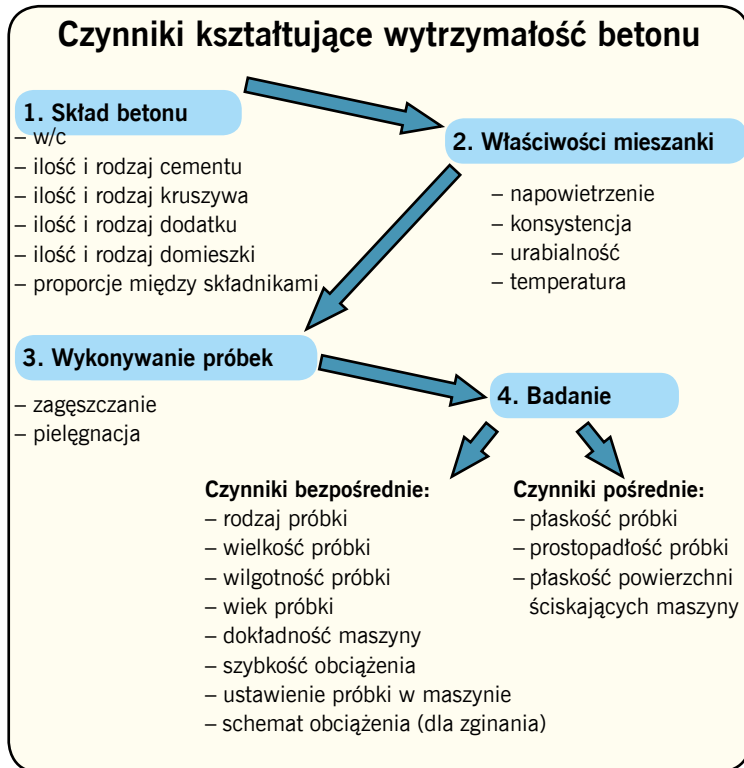
1. Wstęp

W przypadku betonów stosowanych do nawierzchni drogowych kluczowym parametrem uwzględnianym podczas projektowania betonu, w odróżnieniu od betonu do innych konstrukcji, nie jest, jak w większości zastosowań, wytrzymałość na ściskanie, ale wytrzymałość na rozciąganie. Decyduje ona o trwałości zmęczeniowej nawierzchni i ma znaczenie przy określaniu obciążenia, przy którym wystąpi zarysowanie. Niedopuszczenie do powstania rys odgrywa zasadniczą rolę przy zachowaniu ciągłości i równości nawierzchni. Konieczność oceny właściwości betonu na podstawie wytrzymałości na rozciąganie wynika bezpośrednio z modelu przyjętego do projektowania i jest podstawą projektowania nawierzchni w Polsce [1,2]. Można wyróżnić trzy rodzaje badań wytrzymałości na rozciąganie: próba bezpośredniego rozciągania (rozciąganie osiowe) – metoda w praktyce niestosowana, próba zginania – metoda dwupunktowa

i metoda jednopunktowa oraz próba rozłupywania – oznaczana na próbkach cylindrycznych i na próbkach sześciennych.

Wytrzymałość betonu na rozciąganie jest parametrem bardziej wrażliwym na warunki wykonywania badań niż wytrzymałość na ściskanie. Zdarza się podczas kontroli jakości betonów nawierzchniowych, że laboratoria przy podobnych poziomach uzyskiwanych wyników wytrzymałości na ściskanie otrzymują różne wyniki wytrzymałości na rozciąganie. Może to skutkować zaklasyfikowaniem betonu zgodnego z zamówieniem jako betonu niespełniającego wymagań kontraktowych. Wówczas następuje lawina działań wyjaśniających, np. wymiana pism, spotkania, badania weryfikujące i porównawcze, a w skrajnym przypadku nawet wstrzymanie budowy. Aby temu zapobiec, a na pewno ograniczyć takie sytuacje, czynniki wpływające na wytrzymałość betonu powinny być odpowiednio określone i uwzględniane na każdym etapie, począwszy od projektowania składu betonu do nawierzchni, przez wykonywanie próbek, aż do przyjmowanej metodyki badania podczas kontroli i oceny jakości betonu. Celem artykułu było przedstawienie warunków decydujących o uzyskiwanych wynikach badań wytrzymałościowych betonu nawierzchniowego. Na podstawie przeprowadzonych badań tego typu betonu autorki zebrały czynniki, które mogą mieć wpływ na ocenę betonu na różnym etapie powstawania konstrukcji nawierzchni.

Rys. 1. Czynniki kształtujące wytrzymałość betonu (opracowanie własne)



2. Czynniki kształtujące wytrzymałość betonu

Czynniki kształtujące wytrzymałość betonu można podzielić na materiałowe, projektowe i technologiczne (rys. 1). Na uzyskiwane wyniki oznaczeń wytrzymałości betonu wpływa też szereg czynników związanych z warunkami badania, do których możemy zaliczyć między innymi: rodzaj próbki, jej wielkość i wilgotność próbki, wiek próbki w chwili badania, dokładność maszyny wytrzymałościowej, szybkość obciążenia, ustawienie próbki w maszynie czy też płaskość i prostopadłość próbki i płaskość powierzchni ściskających maszyny.

2.1. Rodzaj zastosowanych próbek do badań

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu będzie miała różne wartości w zależności od zastosowanego rodzaju próbek do badań. W normie PN-EN

Rys. 2. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu a) na próbkach cylindrycznych, b) na próbkach sześciennych [fot. własna]



12390-6 [3] dopuszcza się dwa rodzaje próbek do badań: wzorcowe – walcowe (rys. 2a) o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm oraz sześciennie (rys. 2b). W normie [3] podano, iż wytrzymałość na rozciąganie oznaczona na próbkach sześciennych jest o około 10% wyższa niż oznaczona na próbkach walcowych. Z uzyskanych wyników badań własnych betonów do górnej i dolnej warstwy nawierzchni, różnica ta wynosi średnio 8,6% (od 5,4% do 13,3%) w przypadku betonu o D_{max} 8 mm. W przypadku betonu o D_{max} 22 mm różnica wynosiła średnio 10% (od 2,2% do 15%). W związku z tym powinno się zwracać szczególną uwagę na specyfikowanie nie tylko wymagań dotyczących wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, ale również należy dokładnie określić rodzaj i wielkość próbek, na jakich będzie wykonywane badanie.

Na rys. 3 zestawiono przykładowe wyniki badań i klasy wytrzymałości na zginanie betonu o D_{max} 8 mm, zastosowanego do górnej warstwy nawierzchni (GWN) drogi szybkiego ruchu S8 w technologii dwuwarstwowej z eksponowanym kruszywem. W projekcie mieszanki betonowej znajdowało się 430 kg/m³ cementu CEM I 42,5 N-NA, a wskaźnik w/c wynosił 0,35. Jako kruszywo grube zastosowano granit i amfibolit do 8 mm. Konsystencja mieszanki betonowej określana metodą stopnia zagęszczalności (wg PN-EN 12350-4[4]) odpowiadała klasie C1/C2, a zawartość powietrza (wg PN-EN 12350-7[5]) wynosiła 3,5% ÷ 6,0%.

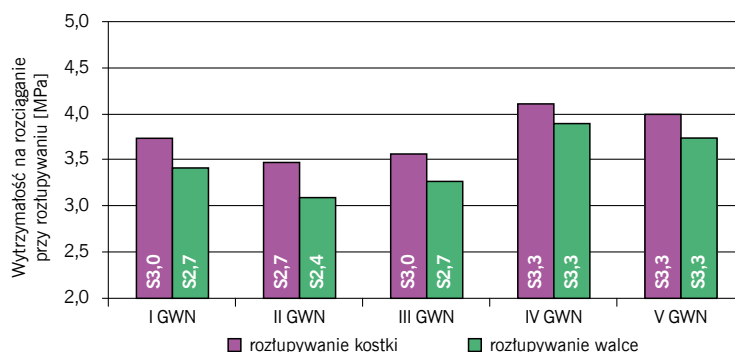
W normie PN-EN 13877-1 [6] podano podział betonu nawierzchniowego na 11 klas ze względu na wytrzymałość charakterystyczną (f_{sk}) na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach, badaną na próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm; klasyfikację tę stosuje się również do określenia klasy wytrzymałości na próbkach sześciennych. Kryterium oceny zgodności produkcji początkowej wytrzymałości na rozciąganie betonu podane jest w PN-EN 206 [7] i zostało przedstawione dla każdej z klas w tabelicy 1.

2.2. Rodzaj metody badawczej

Wytrzymałość betonu na zginanie będzie różnie się kształtowała w zależności od zastosowanej metody badawczej – czy będzie to zginanie dwupunktowe (jak na rys. 4a), czy też zginanie jednopunktowe (rys. 4b). W normie PN-EN 12390-5 [8] podano, że wyniki wytrzymałości na zginanie uzyskiwane metodą jednopunktową są ok 13% wyższe niż wyniki uzyskiwane metodą dwupunktową. Wynika to głównie z efektu skali i różnicy objętości materiału poddanego badaniu (prawdopodobieństwo wystąpienia defektów

Tablica 1. Klasyfikacja i kryteria oceny zgodności wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu [6,7]

Klasyfikacja wg PN-EN 13877-1		Kryteria oceny zgodności wg PN-EN 206	
Klasa wytrzymałości	f_{sk} [N/mm ²]	Kryterium 1	Kryterium 2
		Średnia z wyników, [N/mm ²], nie mniej niż	Dowolny pojedynczy wynik, [N/mm ²], nie mniej niż
S1,3	1,3	1,8	0,8
S1,7	1,7	2,2	1,2
S2,0	2,0	2,5	1,5
S2,4	2,4	2,9	1,9
S2,7	2,7	3,2	2,2
S3,0	3,0	3,5	2,5
S3,3	3,3	3,8	2,8
S4,0	4,0	4,5	3,5
S5,0	5,0	5,5	4,5
S5,5	5,5	6,0	5,0
S6,0	6,0	6,5	5,5



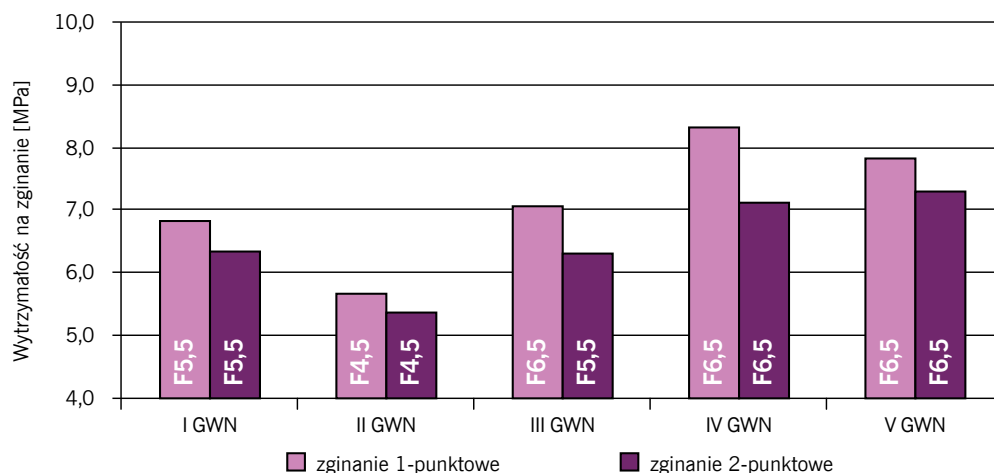
Rys. 3. Zestawienie średnich wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu stosowanego do górnej warstwy nawierzchni w zależności od rodzaju próbek do badań

krytycznych, decydujących o zniszczeniu przy rozciąganiu, jest większe w próbce o większej objętości)[1]. Z uzyskanych wyników badań własnych betonów nawierzchniowych stosowanych do wykonywania nawierzchni z eksponowanym kruszywem w technologii dwuwarstwowej (założenia projektowe jak w pkt. 2.1) różnica ta wynosiła średnio 10% w przypadku betonu o D_{max} 8 mm i wahała się w granicach od 5,6% do 17,8%, a w przypadku betonu o D_{max} 22 mm wyniki wytrzymałości na zginanie uzyskiwane metodą jednopunktową były od 6,2% do 15,1% wyższe niż wyniki uzyskiwane metodą dwupunktową. Dlatego również w przypadku badania wytrzymałości na zginanie powinno się zwracać szczególną uwagę na specyfikowanie nie tylko wymagań dotyczących samych wartości wytrzymałości, ale również dokładnie wskazywać metodę jej oznaczania. Na rys. 5 zestawiono przykładowe wyniki badań i klasy wytrzymałości na zginanie betonu (o tym samym składzie, co w pkt. 2.1) o D_{max} 8 mm stosowanego do górnej warstwy nawierzchni.

Rys. 4. Badanie wytrzymałości na zginanie a) obciążenie dwupunktowe, b) obciążenie jednopunktowe [fot. własna]



Rys. 5. Zestawienie średnich wytrzymałości na zginanie betonu stosowanego do górnej warstwy nawierzchni w zależności od metody badawczej



W normie PN-EN 13877-1 [6] podano podział betonu nawierzchniowego na 10 klas ze względu na wytrzymałość charakterystyczną (f_{tk}) na zginanie po 28 dniach, badaną na próbkach prostokątnych o przekroju 150 x 150 mm. Kryterium oceny zgodności wytrzymałości na zginanie dla produkcji początkowej podobnie jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zestawiono dla każdej z klas w tablicy 2. Normy [6,7] nie określają jednak, w jakim układzie obciążenia (jednopunktowego czy dwupunktowego) mają być oznaczone wytrzymałości betonu pozwalające na przypisanie do określonej klasy.

2.3. Warunki pielęgnacji

Próbki do badań wytrzymałościowych powinny być wykonywane i pielęgnowane zgodnie z PN-EN 12390-

2 [9], tzn. w wodzie o temperaturze $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ lub w komorze klimatycznej o temp. $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej $\geq 95\%$. W zależności od przyjętej normowej metody pielęgnacji wyniki wytrzymałościowe betonu nawierzchniowego różniły się.

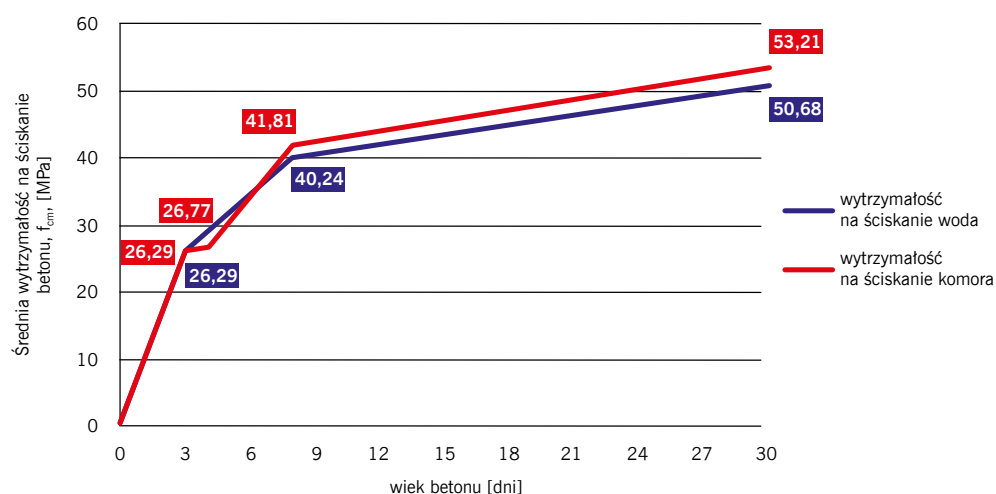
Wytrzymałość na ściskanie betonu oznaczana w okresie do 30 dni na próbkach przechowywanych w komorze klimatycznej była wyższa średnio o około 5% od wytrzymałości oznaczonej na próbkach pielęgnowanych w wodzie. Na podstawie podwójnego kryterium zgodności wytrzymałości na ściskanie według PN-EN 206 [7], badany beton został przypisany do klasy wytrzymałości C35/45 niezależnie od warunków pielęgnacji – w wodzie czy w komorze klimatycznej. Uzyskane przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 6.

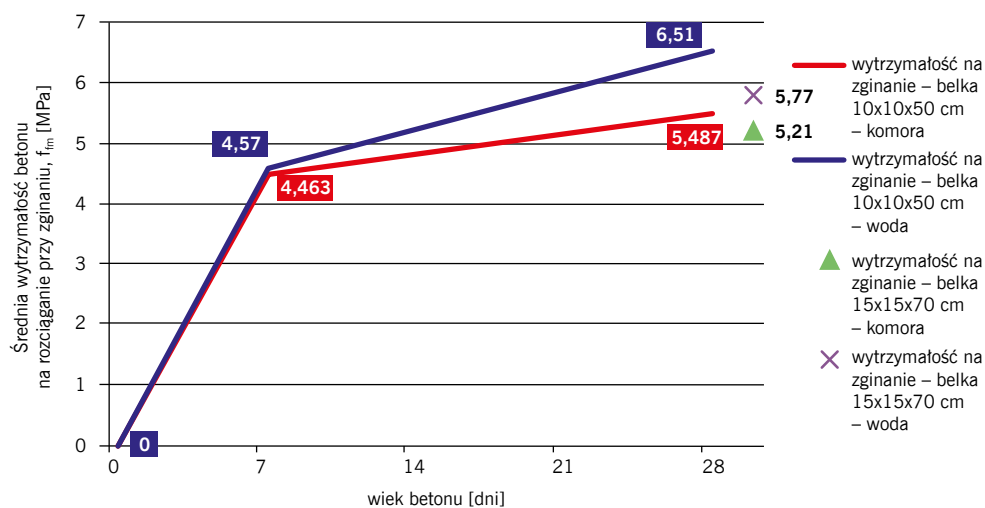
Wytrzymałość na zginanie betonu dojrzewającego w dwóch różnych warunkach pielęgnacji (woda, komora klimatyczna) dodatkowo oznaczono na dwóch rodzajach próbek – belkach o wymiarach 100 x 100 x 500 mm i 150 x 150 x 700 mm. Wytrzymałość oznaczona na belkach przechowywanych w wodzie była wyższa niż oznaczona na belkach przechowywanych w komorze klimatycznej (rys. 7). Po 7 dniach o około 2%, a po 28 dniach o około 15% od tej oznaczonej na belkach przechowywanych w komorze klimatycznej. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oznaczona na belce 150 x 150 x 700 mm przechowywanej w wodzie była wyższa o około 10% od wytrzymałości oznaczonej na belce dojrzewającej w komorze klimatycznej.

Tablica 2. Klasyfikacja i kryteria oceny zgodności wytrzymałości na zginanie [6,7]

Klasyfikacja wg PN-EN 13877-1		Kryteria oceny zgodności wg PN-EN 206	
Klasa wytrzymałości	f_{tk} , [N/mm ²]	Kryterium 1	Kryterium 2
		Średnia z wyników, [N/mm ²], nie mniej niż	Dowolny pojedynczy wynik, [N/mm ²], nie mniej niż
F2	2,0	2,5	1,5
F3	3,0	3,5	2,5
F3,5	3,5	4,0	3,0
F4	4,0	4,5	3,5
F4,5	4,5	5,0	4,0
F5,5	5,5	6,0	5,0
F6,5	6,5	7,0	6,0
F8,5	8,5	9,0	8,0
F9	9,0	9,5	8,5
F10	10,0	10,5	9,5

Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie betonu oznaczona na próbkach pielęgnowanych w wodzie i komorze klimatycznej





Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oznaczona na belkach 100 x 100 x 500 mm oraz 150 x 150 x 700 mm, pielęgnowanych w wodzie i komorze klimatycznej

Wytrzymałość na zginanie przy rozciąganiu belek o wymiarach 100 x 100 x 500 mm oraz 150 x 150 x 700 mm była wyższa dla próbek przechowywanych w wodzie przez cały okres badania/pielęgnacji. Różnica wytrzymałości dla belek mniejszych wyniosła około 15 %, a dla większych – około 10%. Powyższe różnice oznaczają możliwość zaliczenia badanego betonu do dwóch różnych klas wytrzymałości.

2.4. Stan wilgotności próbek do badań

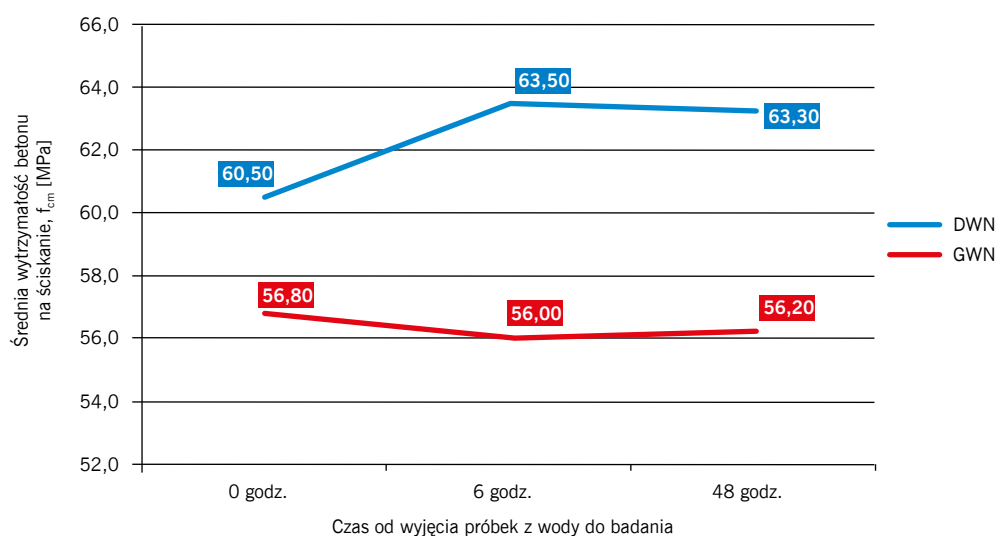
W normie dotyczącej wykonywania i pielęgnacji próbek do badań wytrzymałościowych [9] jest wymagane pielęgnowanie próbek „aż do chwili badania” w wodzie lub w komorze klimatycznej. Różnie interpretowany jest czas zakończenia pielęgnacji, który niesie za sobą konsekwencje w postaci różnych stanów wilgotnościowych próbek i różnej ich wytrzymałości. W praktyce można wyodrębnić dwa skrajne podejścia do tego tematu. W laboratoriach próbki przygotowywane są do badań wynikających z harmonogramu odpowiednio wcześniej, nawet dwie doby wcześniej – w przypadku gdy wliczony jest transport np. do innego laboratorium (nie wszystkie laboratoria wyposażone są w odpowiednie maszyny wytrzymałościowe), gdzie prowadzone są badania. W konsekwencji skracany jest okres wodnej pielęgnacji – przykładowo, gdy badana jest wytrzymałość normowa, to zamiast 28 dni w wodzie, próbki przebywają w niej tylko 26 dni. Jeśli próbki nie są odpowiednio zabezpieczone przed utratą wilgoci, to

następuje proces wysychania, niosący za sobą powstawanie sił wewnętrznych generowanych przez pola wilgotnościowe. Ma to wpływ na wytrzymałość próbek betonowych. Spotyka się też inny rodzaj postępowania – próbki wyjmowane są z wody w dniu przypadającego badania, jednak w oczekiwaniu na oznaczenie mogą przebywać w suchym środowisku nawet kilkanaście godzin [10, 11].

Przedmiotem badań były betony stosowane podczas budowy autostrady A2 na odcinku Nowy Tomyśl – Świecko z nawierzchni betonowej z eksponowanym kruszywem i obejmowały badania próbek w trzech stanach wilgotnościowych, oznaczonych jako:

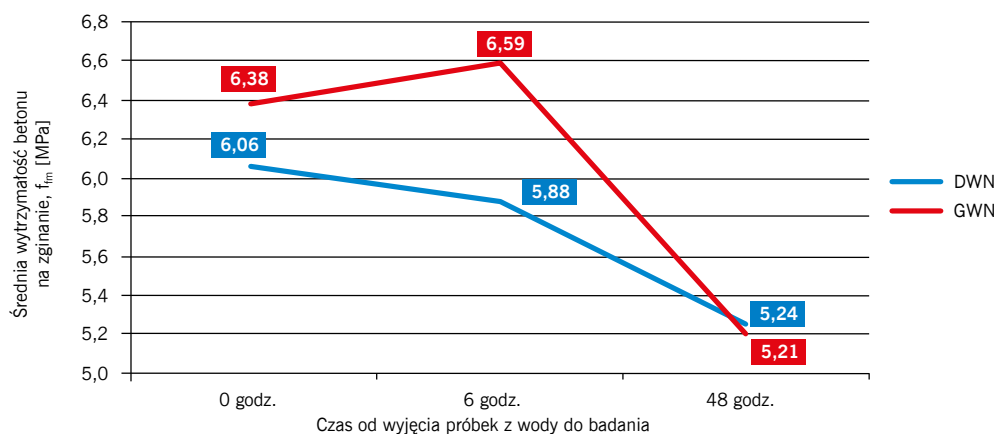
- „0 godz.” – próbki wyjęte z wody tuż przed badaniem i tylko powierzchniowo osuszone z ociekającej wody
- „6 godz.” – próbki wyjęte z wody wcześniej – 6 godzin przed rozpoczęciem badania
- „48 godz.” – próbki wyjęte z wody wcześniej – 48 godzin przed rozpoczęciem badania.

W badanej mieszance betonowej użyto 420 kg/m³ cementu CEM I 42,5 N-NA do górnej warstwy i 380 kg/m³ do betonu do dolnej warstwy nawierzchni, wskaźnik w/c w obu przypadkach wynosił 0,38. Zastosowano kruszywo amfibolitowe, domieszkę uplastyczniającą i napowietrzającą. Próbki pielęgnowane w wodzie i wyjęte z niej 48 godzin, 6 godzin i tuż przed badaniem osiągnęły zbliżone wartości **wytrzymałości na ściskanie** (rys. 8), jednak przy różnych wartościach odchylenia standardowego wyników pomiaru.



Rys. 8. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu do warstwy dolnej (DWN) i górnej (GWN) nawierzchni oznaczona na próbkach betonowych pielęgnowanych w wodzie do momentu badania (0 godz.), do 6 godzin i 48 godzin przed badaniem

Rys. 9. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonu do warstwy dolnej (DWN) i górnej (GWN) nawierzchni, oznaczona na próbkach betonowych pielęgnowanych w wodzie do momentu badania (0 godz.) oraz do 6 godzin i 48 godzin przed badaniem



Badania **wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu** próbek betonowych w różnych stanach wilgotnościowych potwierdziły większą wrażliwość tej cechy betonu na pielęgnację. Zaobserwowano znaczący wpływ warunków wilgotnościowych na uzyskane wyniki (rys. 9).

Zaobserwowano, iż próbki, które wyjęto z wody 48 godzin przed badaniem, charakteryzowały się znacznie niższą wytrzymałością niż próbki wyjęte 6 godzin przed badaniem lub tuż przed, a różnice sięgały 18%. Pozwoliło to zaliczyć badane betony DWN i GWN do różnych klas wytrzymałości [20]. Wraz z wysychaniem próbek maleje ich wytrzymałość na rozciąganie (tylko w przypadku próbek betonu GWN wyjętych z wody 6 godzin przed badaniem oznaczone wytrzymałości były nieznacznie wyższe niż próbek mokrych, 0 godz.).

Betony w stanie wilgotnym wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż suche, ponieważ woda w postaci błonek na koloidalnych cząsteczkach powoduje ich silne zespolenie [12]. Zaś w przypadku wytrzymałości na rozciąganie próbek badanych przy rozłupywaniu, kiedy to zniszczenie następuje w płaszczyźnie odległej od powierzchni poddawanej nawilżeniu lub suszeniu – wpływ warunków wilgotnościowych nie jest aż tak znaczny [1].

3. Wnioski końcowe

Czynniki wpływające na wytrzymałość betonu powinny być odpowiednio określane i uwzględniane na każdym etapie, począwszy od projektowania składu betonu do nawierzchni, przez wykonywanie próbek, aż do przyjmowanej metodyki badania podczas kontroli i oceny jakości betonu. W wyniku analiz i badań właściwości wytrzymałościowych betonów cementowych stosowanych do wykonywania nawierzchni z eksponowanym kruszywem w technologii dwuwarstwowej można sformułować następujące wnioski:

- Wytrzymałość na rozciąganie oznaczona na próbkach sześciennych jest o około $8 \div 10\%$ wyższa niż oznaczona na próbkach walcowych
- Wytrzymałość na zginanie oznaczona metodą centryczną jest około $10 \div 13\%$ wyższa niż oznaczona metodą dwupunktową
- Wytrzymałość na rozciąganie betonu jest bardziej wrażliwa na pielęgnację niż wytrzymałość na ściskanie
- Próbki pielęgnowane w wodzie miały wyższą wytrzymałość na zginanie (o 15%) i niższą wytrzymałość na ściskanie niż próbki pielęgnowane w komorze klimatycznej

- Stwierdzono spadek wytrzymałości na zginanie wraz ze wzrostem wielkości próbek
- Stan wilgotności próbek przed badaniem wpływa na uzyskiwane wyniki wytrzymałości.

W artykule wymieniono wiele czynników, które mogą mieć decydujący wpływ na uzyskiwane wyniki oznaczeń cech wytrzymałościowych betonu. Świadomość ich wpływu może być decydująca w kwestii oceny jakości betonu nawierzchniowego. Dlatego też czynniki te powinny być odpowiednio określane i uwzględniane na każdym etapie, począwszy od projektowania po kontrolę i ocenę jakości betonu.

*mgr inż. Małgorzata Konopska-Piechurska
TPA Sp. z o.o.*

*dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek
Politechnika Warszawska*

Literatura

- 1 Glinicki M.A., *Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych*, IBDiM, Warszawa, 2011
- 2 Glinicki M.A., *Analiza wymagań wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu w nawierzchni drogowej, Drogi i Mosty*, IBDiM, Warszawa, 1/2005
- 3 PN-EN 12390-6 *Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*
- 4 PN-EN 12350-4 *Badania mieszanki betonowej. Część 4: Badanie konsystencji metodą oznaczania stopnia zagęszczalności*
- 5 PN-EN 12350-7 *Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe*
- 6 PN-EN 13877-1 *Nawierzchnie betonowe. Część 1: Materiały*
- 7 PN-EN 206 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
- 8 PN-EN 12390-5 *Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań*
- 9 PN-EN 12390-2 *Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych*
- 10 Jackiewicz-Rek W., Konopska-Piechurska M., Garbacz A., Łukowski P., *Wpływ warunków pielęgnacji na wytrzymałość na rozciąganie próbek betonowych, I Konferencja Naukowo-Techniczna TECH-BUD 2013, Kraków, 23-25 października 2013*
- 11 Jackiewicz-Rek W., Konopska-Piechurska M., Garbacz A., Łukowski P., *Wpływ dojrzewania próbek betonowych a ich wytrzymałość na ściskanie, Beton i konstrukcje z betonu - badania, Monografia pod redakcją naukową Szmigiery E., Łukowskiego P., Jemiolo S., Seria Monografie Zakładu Konstrukcji Betonowych i Zakładu Inżynierii Materiałów Budowlanych, Warszawa, 2015*
- 12 Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, PWN, Warszawa 2008