

MICHAŁ A. GLINICKI¹⁾

ANALIZA WYMAGAŃ WYTRZYMAŁOŚCI BETONU NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU W NAWIERZCHNI DROGOWEJ

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia krytyczny przegląd wymagań wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu w nawierzchniach drogowych pod kątem technicznych możliwości ich spełnienia i sprawdzenia w nawierzchni, a także spójności z kryterium właściwej struktury porów powietrznych, niezbędnej w celu zapewnienia mrozoodporności. Liczne wyniki badań wskazują na istnienie liniowej relacji między wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałością na ściskanie do potęgi $2/3$ lub $1/2$. Rozrzut wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jest na ogół ok. dwa razy większy niż rozrzut wyników badania wytrzymałości na ściskanie; współczynnik zmienności sięga często 10-15%. Wymaganie charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu 5,8 MPa odpowiada w przybliżeniu wymaganiom klasy betonu B60. Zarówno całkowita porowatość, ale także rozkład wielkości porów powietrznych mają istotny wpływ na wytrzymałość betonu. Procedury kontroli właściwości betonu powinny uwzględniać fakt, że wytrzymałość betonu i zawartość powietrza niezbędnego w celu zapewnienia mrozoodporności, są wymaganiami konfliktowymi. Jak stwierdzono, aktualne normy nie dość ściśle określają procedury pobierania elementów próbnych i przeprowadzenia badania. Jednoznaczna ocena wyników badania wytrzymałości wymaga nawiązania do współczesnych norm budowlanych i uściślenia kryteriów zgodności.

1. WSTĘP

Zgodnie z obowiązującymi przepisami nawierzchnia jezdni drogowej powinna spełniać wymagania w zakresie równości podłużnej i poprzecznej oraz właściwości

¹⁾ doc. dr hab. inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

przeciwpoślizgowych. Aby spełnić powyższe wymagania oraz zapewnić oczekiwaną nośność i trwałość w środowisku agresji mrozowej, beton cementowy nawierzchniowy definiuje się jako beton napowietrzony o określonej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i mrozoodporności, wbudowany w nawierzchnię [1]. Zasadnicze wymagania funkcjonalne dotyczą więc tych właściwości betonu, aczkolwiek specyfikacje ogólne i szczegółowe podają też wymagania określonej wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości betonu, a oprócz tego liczne wymagania o charakterze recepturowym, narzuconym na składniki mieszanki betonowej [2]. Kontrola wytrzymałości betonu na ściskanie nie nasuwa zasadniczych wątpliwości - uzgodnione są kryteria zgodności wytrzymałości według starych norm PN-S-96015: 1975, PN-B-06250: 1988 i nowej normy PN-EN 206-1: 2003. Ocena zgodności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na podstawie normy PN-S-96015: 1975 nie jest natomiast jednoznaczna i jej stosowanie bez dodatkowych ustaleń może prowadzić do sytuacji spornych. Co więcej, wymagania wytrzymałościowe na beton powinny być spójne, bowiem proporcja między wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością na ściskanie jest dosyć charakterystyczna dla materiału; na ogół zawiera się w granicach od 0,08 przy B 20 do 0,06 przy B 60 i jest tradycyjnie stosowaną miarą „kruchości” betonu. Nierealnie wysokie wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zawarte w [2] zauważył Z. Jamroży²⁾ już w 2002 roku. Jeżeli wziąć pod uwagę, że beton o odpowiedniej mrozoodporności powinien być betonem napowietrzonym [1], tj. mieć zwiększoną porowatość, a porowatość negatywnie wpływa na wytrzymałość materiałów konstrukcyjnych, to zasadnicze wymagania funkcjonalne na beton nawierzchniowy okazują się konfliktowe.

Artykuł przedstawia krytyczny przegląd wymagań wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu w nawierzchniach drogowych pod kątem technicznych możliwości ich spełnienia i sprawdzenia w nawierzchni, a także spójności z kryterium właściwej struktury porów powietrznych, niezbędnej w celu zapewnienia mrozoodporności. Zakres przeprowadzonej analizy obejmuje relacje między wytrzymałością betonu na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałością na ściskanie, a także metodyczne aspekty określania wytrzymałości. Celowość analizy wynika z niewielkich jak dotychczas doświadczeń krajowych w zakresie projektowania i budowy nawierzchni dróg betonowych silnie obciążonych.

2. GENEZA I SPOSÓB OKREŚLENIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU

Drogowe nawierzchnie betonowe wymiaruje się na zmęczenie na podstawie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu - znajomość tej wytrzymałości ma znaczenie przy określaniu obciążenia, przy którym wystąpi zarysowanie, a niedopuszczenie do powstania rys ma zasadnicze znaczenie dla zachowania ciągłości

²⁾ Z. Jamroży, niepublikowany list do Redakcji Kwartalnika „Drogi i Mosty”, 2002

i równości nawierzchni. Zatem konieczność oceny właściwości betonu na podstawie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wynika bezpośrednio z modelu przyjętego do projektowania.

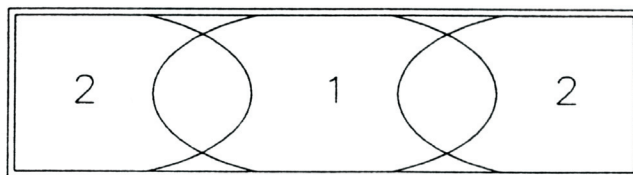
Według [3] polskie typowe konstrukcje nawierzchni sztywnych są wymiarowane w zakresie odkształceń sprężystych przy zastosowaniu nierówności (5.36 ze str. 113), w której występuje parametr w postaci charakterystycznej wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu, przyjętej na poziomie prawdopodobieństwa 95%. Wartość wytrzymałości charakterystycznej betonu na rozciąganie przy zginaniu wynosi 5,5 MPa dla kategorii ruchu KR3-KR6. Metoda wymiarowania stosowana w USA na podstawie AASHTO Guide bazuje natomiast na średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, przy czym zakłada się określony poziom niezawodności projektowania. W przykładach podanych w [4] nie występuje wytrzymałość betonu powyżej 4,8 MPa. W dyskusjach o nawierzchniowych zastosowaniach betonów wysokiej wytrzymałości zwraca się uwagę m.in. negatywny efekt zwiększania modułu sprężystości, polegający na zwiększeniu naprężeń wywołanych różnicami temperatur.

Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu wyznacza się na próbkach pryzmatycznych w sposób umowny, przyjęty w normach: dotąd stosowanej PN-S-96015: 1975 oraz nowej PN-EN 12390-5: 2001. Tak określona wytrzymałość betonu nie jest właściwością stricte materiałową, jej wielkość zależy znacząco od sposobu podparcia próbek podczas badania (zginanie 3. punktowe czy 4. punktowe³⁾), od wymiarów próbek i odległości między podporami, a ponadto obliczana jest przy założeniach teorii belek sprężystych (liniowy rozkład naprężeń w przekroju). Oprócz tego - jak zawsze w betonie - występują efekty związane z niejednorodnością materiału, z jego kruchością, wrażliwością na prędkość obciążenia. Dlatego ustalenie właściwych wymagań na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu wymaga merytorycznego uzasadnienia oraz precyzyjnego określenia procedur badania i interpretacji wyników.

Różnice sposobu podparcia i obciążenia, a w konsekwencji różnice rozkładów naprężeń rozciągających w przekrojach próbek, powodują znane różnice uzyskiwanych wartości „wytrzymałości na rozciąganie”. Szczegółowe omówienie różnic podane jest w monografii Neville [5] (s.625-638). Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określona według schematu 4-punktowego zginania (tj. przy zginaniu stałym momentem w strefie o długości 1/3 rozpiętości między podporami) może być aż o 15% niższa niż określona według schematu 3-punktowego, a podstawie badań cytowanych w normie PN-EN 12390-5 różnica ta wynosi 13%. Wynika to przede wszystkim z różnicy objętości materiału poddanego wyteżeniu, tj. z efektu skali w przypadku materiału kruchoego - w większej objętości jest większe prawdopodobieństwo wystąpienia defektów krytycznych, decydujących o zniszczeniu. Jakościowo podobny efekt można zaobserwować ze wzrostem objętości strefy stałego momentu zginającego.

³⁾ według normy PN-EN 12390-5: 2001 stosuje się inną nomenklaturę: centryczne obciążenie punktowe oraz obciążenie dwupunktowe; spotykane tłumaczenie angielskiego zwrotu „*third point loading*” jako obciążenie trójpunktowe jest nieporozumieniem, chodzi tu o obciążenie stałym momentem zginającym działającym na 1/3 rozpiętości, czyli jest to zginanie 4. punktowe

Nie tylko sposób przeprowadzenia badania wytrzymałości, ale także sposób wykonania próbek do badań może być źródłem niereprezentatywności wyników. Ważne szczegóły dotyczące sposobu i kolejności napełniania formy na próbki, chociaż pomijane w normach na badania betonu, są podane w zaleceniach dotyczących fibrobetonu [6]. Aby uniknąć niejednorodności materiału w strefie środkowej beleczki, zaleca się kolejność wypełniania formy według schematu pokazanego na rys.1 (porcja oznaczona 1 powinna być dwukrotnie większa niż porcja oznaczona 2). Ponadto sposób zagęszczania mieszanki w formach powinien odpowiadać zagęszczaniu betonu w nawierzchni, przy czym częstotliwość i czas wibracji powinna być tak dobrana, aby uniknąć usuwania z mieszanki pęcherzyków powietrza wprowadzonych celowo przy użyciu domieszek napowietrzających.



Rys.1. Schemat wypełniania formy na beleczki do badania na zginanie według RILEM [6] (cyfry wskazują kolejność nakładania porcji mieszanki)

Fig.1. The sequence of filling the form for flexural test specimens according to RILEM [6]

3. RELACJE MIĘDZY WYTRZYMAŁOŚCIĄ NA ROZCIĄGANIE I WYTRZYMAŁOŚCIĄ NA ŚCISKANIE

Według norm europejskich i amerykańskich

Według Eurokodu 2, jak też norm polskich, klasyfikację betonu przeprowadza się na podstawie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie f_c (próbki walcowe) lub f_{ck} (próbki sześciennie). Na tej podstawie określa się odpowiadające średnie i charakterystyczne wartości wytrzymałości na rozciąganie (f_{cm} oraz f_{ctk}) oraz średnie wartości współczynnika sprężystości betonu E_{cm} (tabl. 1). Wytrzymałość na rozciąganie definiuje się jako wytrzymałość określoną w badaniach na rozciąganie osiowe (zwane też bezpośrednim). Ponieważ metoda badania wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie jest bardzo kłopotliwa, powszechne jest przybliżone określenie wytrzymałości na rozciąganie w sposób pośredni, w postaci wspomnianej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu lub wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (metoda badania według normy PN-EN 12390-6: 2001).

Tablica 1. Klasy i wytrzymałość betonu według norm (klasa C32/40 została wprowadzona dodatkowo - nie jest ujęta w normach)
Table 1. Standard strength classes of concrete (C 32/40 introduced additionally)

Klasa wytrzymałości wg PN-EN 206-1: 2003		C25/30	C30/37	C32/40	C35/45	C40/50
Klasa betonu wg PN-B-03264:2002		B30	B37	B40	B45	B50
Wytrz. charakterystyczna na ściskanie (walce) [MPa]	f_c	25	30	32	35	40
Wytrz. charakterystyczna na ściskanie (kostki) [MPa]	f_{ck}	30	37	40	45	50
Wytrz. średnia na ściskanie (walce) [MPa]	f_{cm}	33	38	40	43	48
Wytrz. na rozciąganie [MPa]: - charakterystyczna - średnia	f_{ctk} f_{ctm}	1,8 2,6	2,0 2,9	2,1 3,0	2,2 3,2	2,5 3,5
Moduł sprężystości [GPa]	E_{cm}	31	32	33	34	35

Według normy PN-B-03264:2002 przyjmuje się następujące zależności między wartościami wytrzymałości betonu:

$$f_c = 0,8 f_{ck} \quad , \quad (1)$$

$$f_{cm} = f_c + 8 \quad [\text{MPa}] \quad , \quad (2)$$

$$f_{ctm} = 0,30 f_c^{2/3} \quad [\text{MPa}] \quad , \quad (3)$$

$$f_{ctk} = 0,70 f_{ctm} \quad . \quad (4)$$

Według Eurokodu 2 charakterystyczną wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu $f_{ctk,fl}$ wyznacza się z zależności:

$$f_{ctk,fl} = [1 + (200/h)^{0,5}] f_{ctk} \leq 2 f_{ctk} \quad , \quad (5)$$

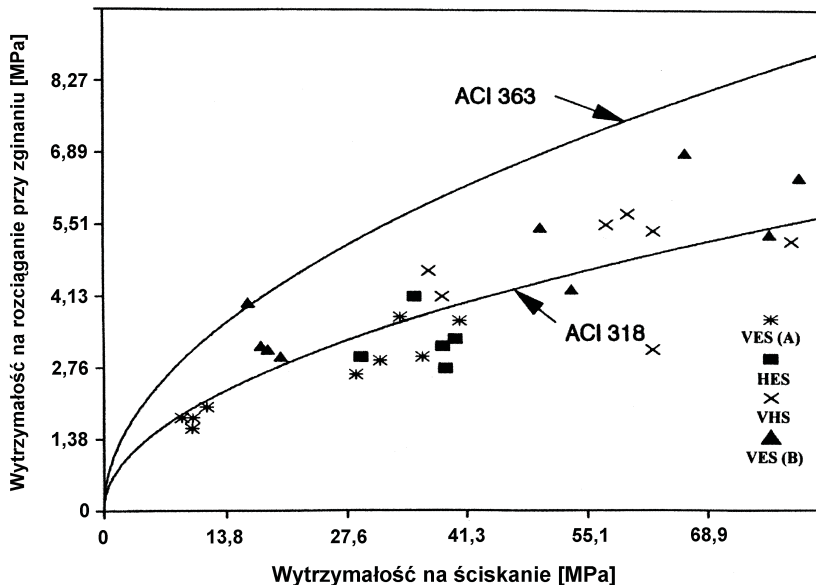
przy czym:

h – grubość płyty betonowej w mm ($h > 100$ mm).

Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wymiarów belki można wyjaśnić np. na podstawie kryterium gradientu naprężenia (lokalna wytrzymałość materiału niejednorodnego jest większa w miejscu, gdzie rozkład naprężeń jest bardziej niejednorodny), wprowadzonego przez Kharlaba w 1989 roku (referencje w języku rosyjskim podano w [7]).

Przedstawione poniżej przykładowe obliczenia przeprowadzono na podstawie danych zamieszczonych w [8] tj. grubość płyty nawierzchni 270 mm, klasa betonu B40, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu 5,8 MPa. W przypadku grubości płyty równej 270 mm we wzorze (5) suma w nawiasie kwadratowym wynosi 1,86. Na podstawie powyższych wzorów w przypadku betonu B40 otrzymuje się: $f_{ck} = 40$ MPa, $f_{ctk} = 2,1$ MPa oraz $f_{ctk,fl} = 3,9$ MPa. Ponadto przyjmując, że zależność (5) zachodzi też między wartościami średnimi wytrzymałości w przypadku betonu B40 otrzymuje się: $f_{ctm} = 3,0$ MPa oraz $f_{ctm,fl} = 5,6$ MPa. Zatem według podanych zależności klasie betonu B40 odpowiadają następujące wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu: średnia 5,6 MPa i charakterystyczna 3,9 MPa. Ponadto charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $f_{ctk,fl} = 5,8$ MPa odpowiada charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie $f_{ck} = 57$ MPa czyli klasie betonu między B55 a B60.

Przyjęta według normy ACI 318, stosowanej na kontynencie amerykańskim, zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na ściskanie zilustrowana jest na rys. 2. Uzyskane w programie badawczym SHRP [9] wyniki wytrzymałości betonów wysokiej wytrzymałości układają się wokół krzywej normowej, ale rozrzuty rosną ze wzrostem wytrzymałości. Liczne dane wskazują na istnienie liniowej zależności między wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu 4-punktowym i pierwiastkiem kwadratowym wytrzymałości na ściskanie określonej na walcach 150×300mm. Dotyczy to betonów w wieku od 1 dnia do 5 lat.



Rys.2. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości walcowej betonu na ściskanie na podstawie norm amerykańskich i wyników badań SHRP [9]

Fig 2. The relationship between the flexural strength and the cylinder compressive strength of concrete based on American standards and SHRP test results [9]

Podane przez Jamrożego [10] ogólne relacje między wytrzymałością na rozciąganie bezpośrednie f_{ct} , przy rozłupywaniu f_{sp} i przy zginaniu f_{fl} są następujące:

$$f_{ct} = (\text{od } 0,06 \text{ do } 0,15) f_{fl} ,$$

$$f_{ct} = (\text{od } 0,40 \text{ do } 0,80) f_{fl} ,$$

$$f_{ct} = (\text{od } 0,65 \text{ do } 0,85) f_{sp} \approx 0,75 f_{sp} ,$$

przy czym nie podano czy chodzi o 3 czy 4-punktowe badanie wytrzymałości na zginanie.

Z powodu braku objaśnienia można domniemać, że powyższe relacje zachodzą zarówno między wartościami średnimi wytrzymałości jak też między wartościami charakterystycznymi. Ponadto wiadomo, że rozrzut wyników badania wytrzymałości na rozciąganie jest na ogół wyższy niż rozrzut wyników badania na ściskanie, co utrudnia ustalenie jednoznacznej relacji. Brak pielęgnacji wilgotnej w początkowym okresie znacznie bardziej obniża wytrzymałość na rozciąganie niż na ściskanie. Ponadto według Jamrożego betony w stanie wilgotnym wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż suche, ponieważ woda w postaci błonek na koloidalnych cząstkach powoduje ich silne zespolenie. Ten sam Autor stwierdza, że w miarę wzrostu wilgotności betonu maleje jego wytrzymałość na ściskanie na skutek "mięknienia" żelu cementowego. A zatem wilgotność betonu odmiennie wpływa na wytrzymałość betonu, co potwierdzone jest w monografii Neville [5] (str.632). Wytrzymałość próbek badanych na rozciąganie przy rozłupywaniu nie zależy tak bardzo od warunków wilgotnościowych, ponieważ zniszczenie następuje w płaszczyźnie odległej od powierzchni poddawanej nawilżaniu lub suszeniu.

Podane zależności między wytrzymałością na rozciąganie i wytrzymałością na ściskanie w zasadzie odpowiadają wynikom uzyskiwanym na kontynencie amerykańskim - wzór zaproponowany przez Raphaela w 1984 roku [11] ma po prawej stronie identyczną postać co wzór (3), ale po lewej stronie jest wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Przytoczony w monografii Neville [5] na str. 628 wykres sugeruje następującą korelację między wartościami wytrzymałości:

$$f_{sp} \approx 0,75 f_{fl} .$$

Uwzględniając powyższe wzory podane przez Jamrożego uzyskuje się zależność:

$$f_{ct} \approx 0,75 \cdot 0,75 f_{fl} \text{ czyli } f_{fl} \approx 1,78 f_{ct} ,$$

co odpowiada w przybliżeniu relacji według wzoru (3).

Na podstawie doświadczeń

Chociaż podane w normach zależności uzyskano na podstawie licznych serii badań, można przypuszczać, że większość wyników dotyczy powszechnie stosowanych betonów konstrukcyjnych, czyli na ogół nienapowietrzonych, często o kruszywach otoczkowych, a nie łamanych, często o uziarnieniu kruszywa do 16mm, często wykonanych z mieszanek o konsystencji ciekłej, pompowalnej, etc. Dlatego przeprowadzono dodatkową analizę wyników badań, aby uzasadnić stosowanie tych zależności do betonów nawierzchniowych.

Znane zależności empiryczne uzależniające wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{fl} od charakterystycznej wytrzymałości betonu na ściskanie f_{ck} mają na ogół postać (CEB MC 90, Legeron i Paultre [12]):

$$f_{fl} = \lambda \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad [\text{MPa}] \quad , \quad (6)$$

przy czym współczynnik liczbowy λ mieści się na ogół w granicach 0,35-0,65, średnio wynosi 0,50. Obniżenie średniej wartości współczynników λ poniżej 0,50 stwierdza się w przypadku próbek dojrzewających w warunkach polowych. W krajowych badaniach [13], dotyczących betonów stosowanych na nawierzchnie przemysłowe (nienapowietrzonych, o konsystencji ciekłej) współczynnik λ wynosił średnio od 0,39 do 0,44, co było raczej wynikiem przyjętego wskaźnika w/c i rodzaju kruszywa.

Analiza wyników badań przedstawionych przez Legeron i Paultre [12] doprowadziła do sformułowania następujących korelacji między średnią wartością wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałością na ściskanie:

$$f_{ctm, fl} = 0,94 f_c^{1/2} = 0,84 f_{ck}^{1/2} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

lub

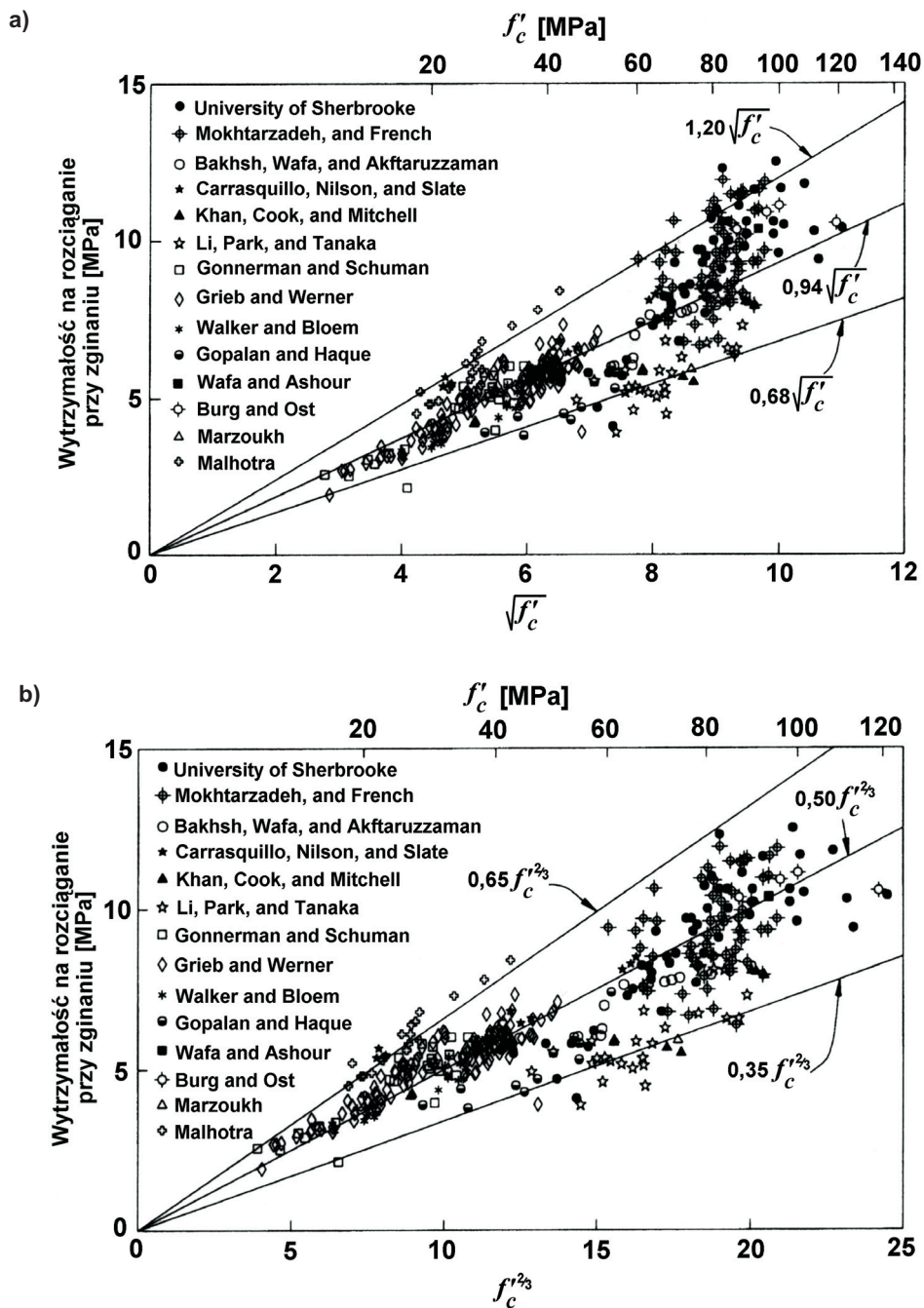
$$f_{ctm, fl} = 0,50 f_c^{2/3} = 0,43 f_{ck}^{2/3} \quad [\text{MPa}] \quad . \quad (8)$$

Autorzy określili też doświadczalne relacje między wartością charakterystyczną wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na poziomie ufności 0,05 i wytrzymałością na ściskanie. Analiza wyników przedstawionych w cytowanej pracy na dwóch rysunkach (rys. 3 a, b) w zakresie ograniczonym do wytrzymałości na ściskanie f_{ck} od 20 do 60 MPa pozwoliła na uzyskanie następujących empirycznych zależności wytrzymałości charakterystycznej na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na ściskanie:

$$f_{ctk, fl} = 0,72 f_{ck}^{1/2} \quad [\text{MPa}] - \text{rys. 3a} \quad (9)$$

oraz

$$f_{ctk, fl} = 0,38 f_{ck}^{2/3} \quad [\text{MPa}] - \text{rys. 3b} \quad . \quad (10)$$



Rys.3. a, b. Empiryczna zależność między wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałością walcową na ściskanie na podstawie Legeron i Paultre [12]

Fig.3. a, b. Empirical relationship between the flexural strength and the cylinder compressive strength of concrete [12]

W tabelicy 2 przedstawiono wyniki obliczeń wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu według powyższych wzorów w zakresie od B30 do B55. W przypadku betonu B40 na podstawie zależności typu $\sim f_{ck}^{1/2}$ uzyskuje się wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu o 0,2-0,3 MPa niż przy wykorzystaniu zależności typu $\sim f_{ck}^{2/3}$. Odwołując się do wcześniej podanego wzoru (5) można postawić pytanie, jaki powinien być współczynnik łączący średnią i charakterystyczną wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, aby uzyskać opis zależności zbliżony do wyników badań doświadczalnych przedstawionych przez Legeron i Paultre [12]. Metodą prób we wzorze (5) zamiast współczynnika 0,7 zastosowano współczynnik 0,79 uzyskując następujący wzór:

$$f_{ctk,fl} = [1 + (200 / h)^{0,5}] \cdot 0,79 f_{ctm} \quad , \quad (11)$$

przy czym f_{ctm} określa wzór (3). Przyjmując jak poprzednio $h=270$ mm, wykonano obliczenia według wzorów (5) i (11), które zostały przedstawione w tabelicy 2. Jak widać, uzyskano w ten sposób dobrą zgodność określenia charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu osiągnięta różnymi sposobami. Zastosowanie współczynnika w granicach 0,78-0,80 miało wcześniej miejsce w procedurach określania wytrzymałości fibrobetonu, np. według wytycznych austriackich OVBB Richtlinie Faserbeton. A zatem wyniki badań są spójne – widać, że klasie betonu B40 odpowiada charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu w zakresie 4,4-4,6 MPa. Uzyskanie charakterystycznej wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu 5,8 MPa, a nawet 5,5 MPa, przy tej klasie wytrzymałości na ściskanie trzeba uznać za nierealne w praktyce.

Tablica 2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa] w zależności od klasy betonu na podstawie wzorów (7)-(10) oraz (5) i (11)
Table 2. The flexural strength [MPa] of concrete as a function of concrete strength class according to formulas (7)-(10), (5) and (11)

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]		Klasa betonu				
		B30	B37	B40	B50	B55
Zależność do potęgi 1/2	średnia wg wzoru (7)	4,6	5,1	5,3	5,9	6,2
	charakt. wg wzoru (9)	3,9	4,4	4,6	5,1	5,3
Zależność do potęgi 2/3	średnia wg wzoru (8)	4,2	4,8	5,0	5,8	6,2
	charakt. wg wzoru (10)	3,7	4,2	4,4	5,2	5,5
charakterystyczna wg wzoru (5)		3,2	3,7	3,9	4,6	4,9
charakterystyczna wg wzoru (11)		3,7	4,2	4,4	5,2	5,5

Przedstawione w pracach [8] i [14] wyniki badań kontrolnych betonów wbudowanych w nawierzchnie drogi krajowej nr 8 oraz odcinka autostrady A4 zamieszczone są w tablicy 3. Stosowano mieszanki betonowe opracowane do wbudowywania w deskowaniu ślizgowym, o uziarnieniu kruszyw do 32 mm, z domieszkami uplastyczniającymi i napowietrzającymi. Nie mając danych o rozrzucie wyników, można w przybliżeniu przyjąć, że uzyskano klasę betonu odpowiednio B 40 i B 55. Warto tu zauważyć, że:

- stosunek średnich wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu do wytrzymałości na ściskanie jest identyczny, wynosi 0,11 i jest identyczny z przewidywanym na podstawie zależności normowych, przyjmując, że zależność (5) zachodzi też między wartościami średnimi tj. $f_{cm,fl}$ wg wzoru (5) i f_{cm} wg wzoru (2),
- relacje między wartościami wytrzymałości dobrze opisuje zależność potęgowa o wykładniku potęgi równym 1/2 (tabl. 2).

Tablica 3. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości betonu na podstawie badań kontrolnych nawierzchni drogi krajowej nr 8 [14] oraz odcinka autostrady A4 [8]
Table 3. Average values of concrete strength reported on No.8 national road pavement [14] and A-4 highway pavement section [8]

Nawierzchnia betonowa na odcinku		Wytrzymałość [MPa] (wartość średnia po 28 dniach)	
		na ściskanie	na rozciąganie przy zginaniu
Droga krajowa nr 8	jezdnia lewa	47,88	5,31
	jezdnia prawa	46,1	5,3
Autostrada A4	średnio	60,2	6,45

Zgodność z przewidywaniami jest dobra, ale opublikowane dane nie pozwalają jednak na określenie charakterystycznej wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu.

Chociaż przedstawione wzory do wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na podstawie wytrzymałości na ściskanie są jedynie przybliżone, na ich podstawie i na podstawie wyników obliczeń zamieszczonych w tablicy 1 i 2 można w dobrym przybliżeniu określić możliwe proporcje wytrzymałości betonu nawierzchniowego.

4. ROZRZUT WYNIKÓW BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU

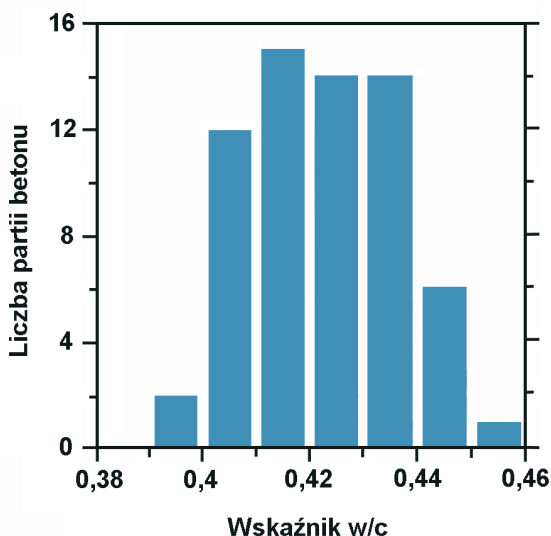
Analiza statystyczna wyników badań wytrzymałości betonu przeprowadzonych podczas realizacji nawierzchni betonowej autostrady A12 (odcinek Golnice-Krzywa, kontrakt 8C) została przedstawiona w opinii technologicznej [15]. Wyniki wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania przedstawione w tablicy 4 uzyskano na podstawie

badan 196 kostek i 116 belek. Współczynniki zmienności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (od 12,3 do 16,8%) były blisko dwukrotnie wyższe niż współczynniki zmienności wytrzymałości na ściskanie (od 5,7% do 8,6%). Jak stwierdzono, odchylenie standardowe wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu mieściło się w granicach 0,83-1,06 MPa na całym odcinku nawierzchni. Rozkład wyników badań wytrzymałości na ściskanie był zbliżony do rozkładu normalnego, natomiast w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu stwierdzono dużą skośność rozkładu wyników i brak zgodności z rozkładem normalnym. Można by więc przypuszczać, że wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu były obarczone wpływem dodatkowych czynników, co częściowo wyjaśniałoby uzyskany wysoki stosunek wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie $f_{cm,fl} / f_{cm}$, wynoszący 0,14.

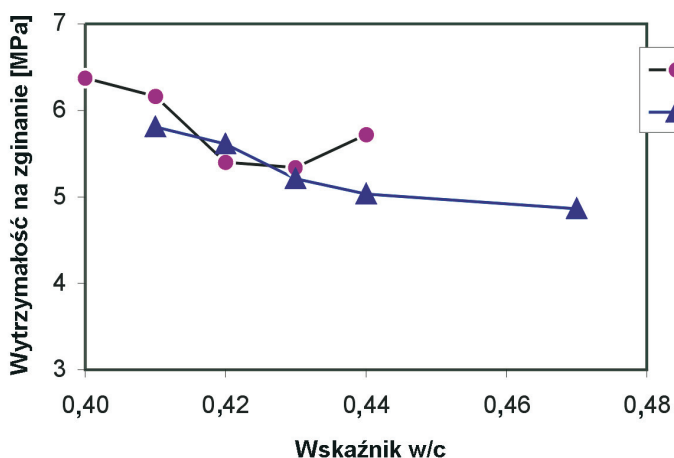
Tablica 4. Statystyczna ocena wyników badania wytrzymałości betonu po 28 dniach dojrzewania wykonanych podczas budowy odcinka autostrady [15]
Table 4. Statistical evaluation of concrete strength test results at the age of 28 days performed during construction of a section of highway [15]

Wytrzymałość [MPa]	Jezdnia północna			Jezdnia południowa		
	wartość średnia	odchyl. standard.	liczba próbek	wartość średnia	odchyl. standard.	liczba próbek
Górna warstwa betonu 0/16mm						
Na ściskanie	45,40	3,89	42	47,69	3,63	58
Na rozciąganie przy zginaniu	6,58	0,94	29	6,71	0,82	25
Dolna warstwa betonu 0/32mm						
Na ściskanie	45,53	3,32	39	48,27	2,74	56
Na rozciąganie przy zginaniu	6,30	1,06	28	6,79	0,86	34

Duża skala i długotrwałość robót nawierzchniowych powodują naturalną zmienność surowców do produkcji betonu. Jak podano w pracy [16] przy dużej skali robót betonowych obserwuje się wyraźną zmienność proporcji mieszanki betonowej, wynikającą tylko z naturalnej zmienności kruszyw i ich wilgotności. Stwierdzono to na podstawie analizy 64 partii betonu wbudowanego w odcinki nawierzchni o powierzchni 2000 m² i grubości 350 mm każdy. Projektowane w/c wynosiło 0,42, natomiast na podstawie zapisu objętości faktycznie użytej wody do betonu stwierdzono zmienność w/c w granicach od 0,40 do 0,45 (rys. 4). Oczywiście ta zmienność w/c zależy od umiejętności producenta betonu i procedur kontroli jakości, ale pewnej zmienności trzeba się zawsze spodziewać. Przeprowadzone badania wykazały znaczący wpływ niewielkich zmian w/c na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu (rys. 5) - spadek wytrzymałości nawet o 1 MPa przy wzroście w/c o 0,02.



Rys.4. Rozkład wskaźnika wodno-cementowego w/c w badanych 64 partiach betonu na podstawie [16]
Fig.4 Distribution of water-to-cement ratio in 64 investigated concrete batches [16]



Rys.5. Wpływ wskaźnika w/c na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu na podstawie badań doświadczalnych [16]
Fig.5. The influence of w/c ratio on the flexural strength of concrete [16]

Według [17] w specyfikacjach należy uwzględnić większy rozrzut wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu : przy wytrzymałości średniej sięgającej 5,5 MPa (800 psi w jednostkach stosowanych w USA) odchylenie standardowe w granicach 0,3-0,6 MPa charakteryzuje dobrą jakość badań betonu, odchylenie standardowe powyżej 0,7 MPa wskazuje na niedostatki procedury badawczej. Dotyczy to badań jednej partii betonu.

5. KRYTERIA ZGODNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU

Sprawdzenie zgodności wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu z wymaganiami według normy PN-75/S-96015 przeprowadza się na podstawie uzyskanych wyników badań ocenianych przez wyznaczenie R_{\min} , czyli dolnej wartości przedziału ufności przy poziomie ufności 0,95 lub 0,99. Wzory (6) i (7) w punkcie 3.5.18 wspomnianej normy nie są dobrze objaśnione i stąd wynikają wątpliwości przy wykorzystaniu tych wzorów – wzór (6) jest podany w formie, którą łatwo można uprościć do następującej postaci:

$$R_{\min} = R_m - t_{\alpha} s \sqrt{[1 / (n - 1)]} , \quad (12)$$

przy czym:

R_m – średnia wartość wytrzymałości,

s – odchylenie standardowe (dawniej nazywane też odchyleniem średnim),

n – liczba wyników badania wytrzymałości,

t_{α} – współczynnik z tablic Studenta przy $(n-1)$ stopniach swobody.

W punkcie 3.5.18 normy we wzorze (7) określającym kwadrat odchylenia standardowego zabrakło znaku sumowania. Według normy PN-75/S-96015 wyznaczona z rachunku statystycznego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu R_{\min} nie powinna być niższa od wytrzymałości wymaganej o 10% przy poziomie ufności 95%, czyli kryterium zgodności jest następujące:

$$R_{\min} \geq 0,9 \cdot \text{wytrzymałość wymagana} . \quad (13)$$

Współczesne normy budowlane traktują wytrzymałość materiału jako zmienną losową o rozkładzie normalnym i definiują charakterystyczną wytrzymałość materiału jako kwantyl tego rozkładu rzędu 5%:

$$f_k = f_m - 1,64 \cdot s , \quad (14)$$

gdzie f_k i f_m oznaczają odpowiednio wytrzymałość charakterystyczną i wytrzymałość średnią, natomiast s oznacza odchylenie standardowe. Na podstawie wyników badań niewielkiej liczby próbek, ozn. n , ocenę wytrzymałości przeprowadza się według kryteriów zgodności przedstawianych następująco (Brunarski [18]):

$$f_m \geq f_k + k_n \cdot s , \quad (15)$$

współczynnik k_n określa się przy wykorzystaniu różnych metod statystyki matematycznej (zależy od modelu wnioskowania statystycznego i liczby próbek).

Kryteria zgodności w formie zależności (15) przyjęto w następujących normach:

- PN-EN 206-1: 2003 – $k_n=1,48$ w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu,
- PN-88/B-06250 – $k_n=1,64$ w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie,
- PN-V-83002: 1999 – $k_n=1,64$ w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, ale wprowadzono dodatkowo współczynnik 0,9 analogicznie jak w normie PN-75/S-96015.

Kryteria takie obowiązują przy liczbie próbek wynoszącej co najmniej 15. Przy mniejszej liczbie próbek stosuje się kryteria podwójne, dotyczące najmniejszej wytrzymałości w badanej serii próbek oraz wytrzymałości średniej. Jak wykazał *Brunarski* właśnie przy małej liczbie próbek różnice przyjmowanych modeli wnioskowania statystycznego prowadzą do znacznych różnic oceny wyników badań wytrzymałości.

Aby ocenić rozbieżności oceny wytrzymałości na podstawie podanych kryteriów zgodności powtórnie poddano analizie wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu uzyskane podczas realizacji nawierzchni betonowej autostrady A 12 (odcinek Gołnice-Krzywa, [15]). Wyniki analizy przedstawiono w tablicy 5. Wyznaczono stosunek wartości charakterystycznej do wartości średniej wytrzymałości, a także obliczono iloraz $R_{\min}/0,9$, który wg kryterium (13) stanowi podstawę porównania z wymaganą wartością wytrzymałości.

Na podstawie porównania wyników obliczeń w powyższej tablicy można sformułować następujące spostrzeżenia:

- odchylenie standardowe wynosi od 0,64 do 0,81 MPa, co odpowiada współczynnikom zmienności w granicach 10-13 % i nie odbiega od obserwowanym zazwyczaj rozrzutom wyników wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu,
- wytrzymałość charakterystyczna według wzoru (15) przy $k_n=1,48$ (PN-EN 206-1: 2003) jest średnio mniejsza od wartości średnich o około 1 MPa, natomiast stosunek $f_{ctk,fl}/f_{ctm,fl}$ wynosi od 0,81 do 0,86,
- wytrzymałość charakterystyczna według wzoru (15) przy $k_n=1,64$ (PN-88/B-06250) jest nieco mniejsza, a stosunek $f_{ctk,fl}/f_{ctm,fl}$ wynosi od 0,79 do 0,83, co odpowiada relacjom wytrzymałości omówionym w poprzednich rozdziałach,
- na podstawie wytrzymałości minimalnej R_{\min} według wzoru (12) i wprowadzeniu kryterium (13) ocena wytrzymałości betonu jest wyjątkowo liberalna - można nawet wnioskować, że beton spełnia wyższe wymagania wytrzymałości niż wartość średnia wytrzymałości.

Ocena zgodności z wymaganiami wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jest praktykowana na podstawie 3 próbek pobieranych i badanych z określoną częstotliwością wg normy PN-75/S-96015 p. 3.5.10.1. Norma nie podaje jednoznacznego sposobu oceny uzyskanych wyników, więc trzeba uważać, że obowiązuje kryterium wytrzymałości minimalnej R_{\min} według wzoru (12) wraz z kryterium (13). Trzeba tu zwrócić uwagę, że przy $n=3$ iloraz $t_{\alpha}\sqrt{[1/(n-1)]}$ jest wysoki i wynosi $4,403 \cdot 0,71 = 3,04$. Wówczas

dla fikcyjnego przykładu podanego w kolumnie 6 tablicy 5 (wartość średnia jak w kolumnie 2, wyniki skrajne $\pm 0,4$ MPa) wyniki spełniają wymaganie wytrzymałości 6,2 MPa, która stanowi 91% wartości średniej. Jak widać, zastosowanie jednakowego kryterium normowego przy $n=3$ oraz przy dużej liczbie próbek prowadzi do radykalnie różnej oceny wyników, a zatem poprzez grupowanie wyników badań można znacząco wpływać na ocenę tych samych wyników badań. Niezbędne są precyzyjne więc zapisy określające kryteria zgodności. Określenie zgodności wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu według kryterium (13) jest znacznie bardziej liberalne niż wskazują na to omówione wcześniej zależności normowe i wyniki badań, według których $f_{ctk,fl}/f_{ctm,fl}$ wynosi około 0,8.

Tablica 5. Wyniki oceny wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonu w nawierzchni autostrady A 12 według różnych kryteriów zgodności
Table 5. Evaluation of results of flexural strength of concrete in A12 highway pavement according to various compliance criteria

Parametry statystyczne badań wytrzymałości	Jezdnia południowa		Jezdnia południowa		Przykład fikcyjny	Uwagi
	beton 0/32	beton 0/16	beton 0/32	beton 0/16		
1	2	3	4	5	6	7
Wartość średnia [MPa]1	6,79	6,71	6,30	6,58	6,79	
Odchylenie std. [MPa]	0,70	0,64	0,81	0,74	0,40	
Wsp.zmienności	10 %	10 %	13 %	11 %	6 %	
Liczba próbek n	34	25	28	29	3	
Kryteria zgodności na podstawie norm PN-88/B-06250 i PN-EN 206-1: 2003						
Wartość char. [MPa]	5,76	5,76	5,09	5,49		$k_n=1,48$
Stosunek w.char/śred	0,85	0,86	0,81	0,83		
Wartość char. [MPa]	5,65	5,66	4,96	5,37		$k_n=1,64$
Stosunek w.char/śred	0,83	0,84	0,79	0,82		
Kryterium zgodności na podstawie normy PN-75/S-96015						
Współczynnik t_α	2,03	2,064	2,052	2,048	4,03	
R_{min}	6,55	6,44	5,98	6,29	5,57	wg wzoru (12)
$R_{min}/0,9$	7,28	7,15	6,64	6,99	6,19	
Stosunek $[R_{min}/0,9]/\text{śred.}$	1,07	1,07	1,05	1,06	0,91	

6. WYTRZYMAŁOŚĆ W FUNKCJI ZAWARTOŚCI PORÓW POWIETRZNYCH

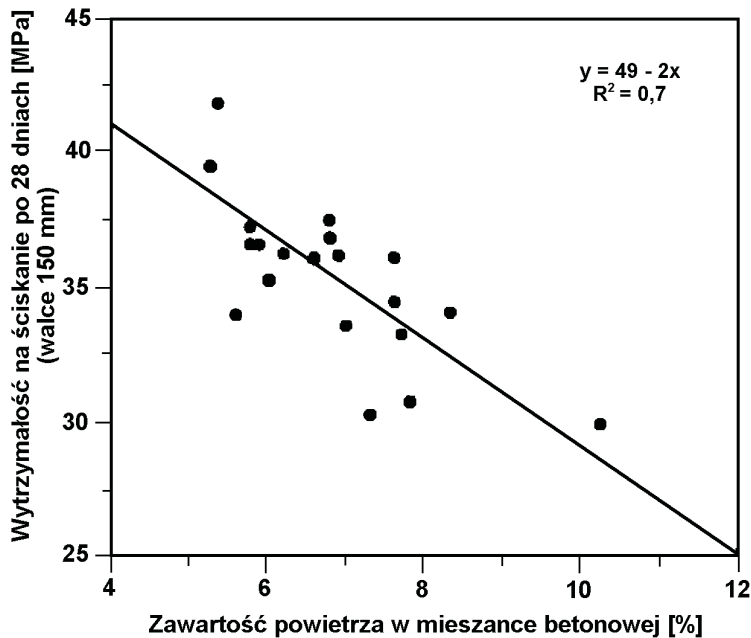
Beton napowietrzony zawiera wprowadzone - w wyniku działania domieszek chemicznych - powietrze w postaci pęcherzyków na ogół w ilości 4-7% objętości betonu, a zatem ma zwiększoną porowatość w porównaniu z betonem zwykłym, w którym zawartość porów powietrznych (przypadkowo złapanych podczas wytwarzania, transportu i wbudowywania mieszanki) nie przekracza na ogół 1-1,5% przy dobrym zagęszczeniu mieszanki. Podobnie jak w przypadku wielu innych materiałów konstrukcyjnych, zawartość pustek w betonie (porowatość, ozn.p) obniża jego wytrzymałość. Zależność wytrzymałości od porowatości jest przedstawiana na ogół w postaci liniowej proporcjonalności do $(1 - p)$, w postaci potęgowej $(1 - p)^x$ lub w postaci wykładniczej $\exp(-yp)$, przy czym x , y oznaczają stałe empiryczne, np. [19]. Zależność jest znana od początku rozwoju technologii betonu, np. w postaci wzoru Fereta sprzed ponad 100 lat; dość powszechne jest mniemanie, że przeciętny spadek wytrzymałości betonu na ściskanie wynosi 5,5% na 1% obecnego w mieszance powietrza. To stwierdzenie, zamieszczone w monografii [5] na str. 585 i powtarzane w innych publikacjach, jest oparte na wynikach badań sprzed 50 lat, dotyczących zresztą mieszanek betonowych o wskaźnikach wodno-cementowych od 0,45 do 0,72. Nowsze wyniki badań, obejmujące napowietrzone betony o mniejszych wskaźnikach w/c przy zastosowaniu współczesnych domieszek napowietrzających, wskazują na mniejszy spadek wytrzymałości. Jak ilustruje rys. 6 na podstawie [20], wzrost zawartości powietrza w napowietrzanej mieszance betonowej można w przybliżeniu związać z liniowym spadkiem wytrzymałości na ściskanie wynoszącym ok. 2 MPa na 1% objętości powietrza. Po uwzględnieniu zależności (1) spadek wytrzymałości przeliczony na kostki o boku 150mm wynosi około 2,5MPa na 1% objętości powietrza. Określony w badaniach [21] spadek wytrzymałości na ściskanie betonu związany ze wzrostem zawartości powietrza w napowietrzanej mieszance betonowej wynosił około 2,8 MPa na 1% objętości powietrza (rys. 7). Mniejszą redukcję wytrzymałości wskutek napowietrzania można wytłumaczyć dodatkowym wpływem pęcherzyków powietrza na polepszenie urabialności mieszanki, a także można skorelować ze zmniejszeniem wielkości pęcherzyków powietrza wprowadzanych przy użyciu współczesnych domieszek napowietrzających. Jak pokazano bowiem w pracy [22] bardzo dobrą ocenę wpływu porowatości na wytrzymałość uzyskuje się przy zastosowaniu parametru opisującego rozkład wielkości porów r_m (średni promień porów) na podstawie następującej proporcjonalności:

$$f_c \sim \frac{f_{c0}(1-p)}{\sqrt{r_m}}, \quad (16)$$

w której:

f_{c0} – wytrzymałość przy zerowej porowatości (wartość fikcyjna).

Powyższą zależność zweryfikowano doświadczalnie jedynie w przypadku stwardniałych zaczynów cementowych, a nie w przypadku betonów, jednak jej potencjalna przydatność nie budzi zastrzeżeń. W innej modelowej zależności wytrzymałości od porowatości i od rozkładu wielkości porów, otrzymanej w pracy [23], wyróżniony został zakres wielkości porów wpływających na wytrzymałość. Z zależności (16) wynika, że zmniejszenie wielkości porów powietrznych ma korzystny wpływ na wytrzymałość. O ile więc wzrost porowatości w ogólności redukuje wytrzymałość, to napowietrzanie przy użyciu domieszek chemicznych, wywołujących powstanie drobnych, gęsto rozmieszczonych pęcherzyków powietrza w betonie, jest mniej szkodliwe. Jednocześnie właściwy rozkład porów powietrznych jest warunkiem koniecznym odporności mrozowej betonów napowietrzonych, co znalazło odzwierciedlenie m.in. w normach i wymaganiach technicznych wprowadzonych niedawno w Danii, Austrii i Niemczech (tabl. 6).



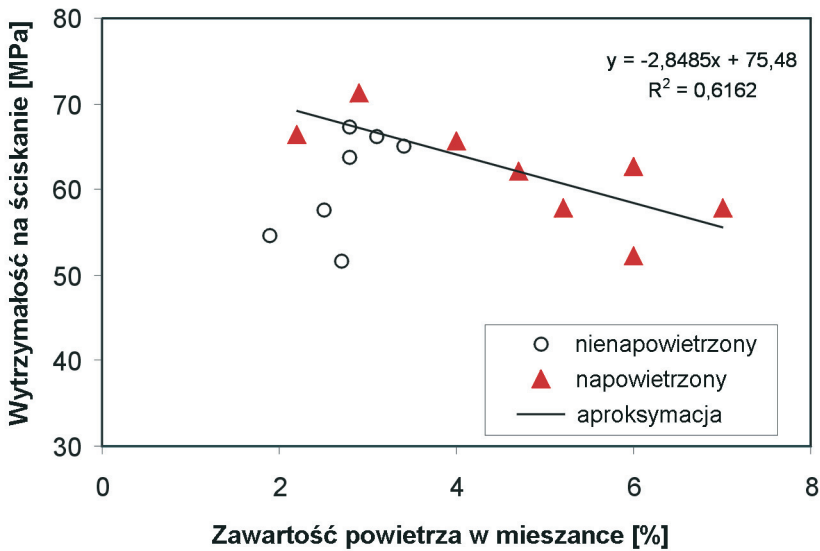
Rys.6. Wpływ zawartości powietrza w mieszance betonowej na wytrzymałość betonu na ściskanie według badań Baalabaki i Aitcina [20]

Fig.6. The influence of air void content in concrete mix on the compressive strength of concrete according to Baalabaki and Aitcin [20]

Tablica 6. Wymagania dotyczące napowietrzenia mieszanki betonowej i struktury porów w stwardniałym betonie według norm wprowadzonych w Austrii i Danii oraz wg zaleceń ZTV Beton-StB 01 Niemczech

Table 6. Specifications for air entrainment and pore structure in concrete according to Austrian and Danish standards and to German recommendations ZTV Beton-StB 01

Norma	Wymaganie	Klasa ekspozycji mrozowej		
		XF2	XF3	XF4
Norma austriacka ÖNORM B 4710-1	min. zawartość powietrza w mieszance [%]	2,5	2,5	4,0
	min. zawartość mikroporów A_{300} [%]	1,0	1,0	1,8
	max. wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} [mm]	–	–	0,18
Norma duńska DS 2426	min. zawartość powietrza w mieszance [%]	4,5	4,5	4,5
	min. zawartość powietrza A w stwardniałym betonie [%]	3,5	3,5	3,5
	max. wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} [mm]	0,20	0,20	0,20
	odporność betonu na złuszczenia powierzchniowe	dobra	dobra	dobra
Niemieckie Federalne Ministerstwo Komunikacji ZTV Beton-StB 01	beton z domieszką napowietrzającą i uplastyczniającą lub upłynniającą	beton na nawierzchnie dróg		
	min. zawartość powietrza w mieszance [%] (średnia dzienna)	5,0	4,0	
	min. zawartość mikroporów A_{300} [%]	1,5	1,8	
	max. wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} [mm]	0,20	0,20	
Oznaczenia: \bar{L} - wskaźnik rozmieszczenia porów w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11 A - zawartość powietrza w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11 A_{300} - zawartość mikroporów poniżej 0,3 mm w stwardniałym betonie wg PN-EN 480-11 klasa ekspozycji mrozowej XF według normy PN-EN 206-1				



Rys.7. Wpływ zawartości powietrza w mieszance betonowej na wytrzymałość betonu na ściskanie według [21]

Fig.7. The influence of air void content in concrete mix on the compressive strength of concrete [21]

Istotą wymagań normowych na betony napowietrzane jest określony rozkład porów powietrznych w stwardniałym betonie, opisany wymaganą zawartością tzw. mikroporów oraz wskaźnikiem rozmieszczenia według Powersa. Drobne pory powietrzne, pożądane z uwagi na mrozoodporność, powinny więc nieznacznie wpływać na obniżenie wytrzymałości betonu. Na podstawie krajowych badań struktury porów powietrznych w betonie jezdni na przejściu granicznym [24], stwierdzono, że pęcherzyki powietrza, głównie o średnicy poniżej 0,5 mm, są rozmieszczone równomiernie i blisko siebie; wskaźnik rozstawu porów w betonie wynosił 0,11-0,12 mm, natomiast powierzchnia właściwa porów wynosiła od 35 do 53 mm⁻¹. Parametry struktury porów powietrznych betonu wbudowanego w nawierzchnię drogowego przejścia granicznego spełniały wymagania norm oraz ogólnych specyfikacji technicznych, a jednocześnie - chociaż zawartość powietrza w stwardniałym betonie sięgała 7,8 % - uzyskano właściwy i stabilny poziom wytrzymałości betonu.

7. WNIOSKI

1. Ocena zgodności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na podstawie wartości charakterystycznej czy też wartości średniej wynika bezpośrednio z przyjętego modelu wymiarowania nawierzchni betonowej. Wyniki badań wskazują, że wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie przy zginaniu wynosi około 0,8

wartości średniej wytrzymałości, z tym, że znacząco zależy od przyjętego modelu wnioskowania statystycznego.

2. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu ma sens umowy z powodu licznych uproszczeń przyjmowanych przy jej określaniu (np. liniowy rozkład naprężeń w przekroju belki) oraz znaczącego wpływu wymiarów próbek, sposobu obciążenia, wilgotności próbek, etc. Wnioskowanie o wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na podstawie badania belek wycinanych z nawierzchni może być obarczone znacznym błędem z powodu możliwych znacznych zniszczeń przy wycinaniu, znacząco innego rozkładu porów powietrznych wskutek innego zagęszczania, czy niezgodności z normowymi wymaganiami obracania próbek o 90° przy badaniu.
3. Liczne wyniki badań wskazują na istnienie liniowej relacji między wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałością na ściskanie do potęgi $2/3$ lub $1/2$. Rozrzut wyników badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jest na ogół ok. dwa razy większy niż rozrzut wyników badania wytrzymałości na ściskanie; współczynnik zmienności sięga często 10 - 15 %.
4. Nie tylko całkowita porowatość, ale także rozkład wielkości porów powietrznych ma istotny wpływ na wytrzymałość betonu. Procedury kontroli właściwości betonu powinny uwzględniać fakt, że wytrzymałość betonu i zawartość powietrza niezbędnego w celu zapewnienia mrozoodporności, są wymaganiami konfliktowymi.
5. Właściwe określanie wytrzymałości na rozciąganie betonu wymaga ścisłego określenia procedury pobierania elementów próbnych i przeprowadzenia badania, a jednoznaczna ocena wyników badania wytrzymałości wymaga nawiązania do współczesnych norm budowlanych i uściślenia kryteriów zgodności. Ten wniosek jest już częściowo zrealizowany w nowej normie europejskiej na nawierzchnie betonowe PN- EN 13877-2 (U).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ogólne Specyfikacje Techniczne D-05.03.04 „Nawierzchnia betonowa”. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2003
- [2] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2001
- [3] *Szydło A.*: Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego. Polski Cement, Kraków 2004
- [4] Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Part II, Rigid Pavement Design and Rigid Pavement Joint Design. AASHTO, 1998
- [5] *Neville A.M.*: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000
- [6] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Recommendations - Bending test. Materials and Structures, **33**, January-February 2000, 3-5

- [7] *Kazanovich L., Ioannides A.M.*: Glasnost and concrete pavement engineering. Proc. 5th International Conference on Concrete Pavements, Purdue, USA, 1993
- [8] *Smukalski K., Gubernat S.*: Remont autostrady A4 - uwagi wykonawcy. Międzynarodowa Konf. Naukowo-Techniczna „Rozwój nawierzchni betonowych w Polsce na przykładzie modernizacji autostrady A4”, 75-86, Wrocław 2004
- [9] *Zia P., Schemmel J.J., Naaman A.E.*: Mechanical behaviour of high performance concretes. Volume 1. Summary Report, SHRP-C-361. Strategic Highway Research Program, NRC, Washington 1993
- [10] *Jamroży Z.*: Beton i jego technologie. PWN, Warszawa 2000
- [11] *Raphael J.M.*: Tensile strength of concrete. ACI Materials Journal, **81**, 2, 158-165, 1984
- [12] *Legeron F., Paultre P.*: Prediction of the modulus of rupture of concrete. ACI Materials Journal, **97**, 2, 193-200, 2000
- [13] *Glinicki M.A., Litorowicz A., Zieliński M.*: Interpretacja badań odporności fibrobetonów na pękanie przy zginaniu. XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Tom 1, 307-314, Krynica 2001
- [14] *Mikulicki I.*: Nawierzchnia betonowa na istniejącej konstrukcji nawierzchni asfaltowej. Międzynarodowa Konf. Naukowo-Techniczna „Rozwój nawierzchni betonowych w Polsce na przykładzie modernizacji autostrady A4”, 45-51, Wrocław 2004
- [15] *Smukalski K.*: Autostrada A 12 Odcinek Golnice-Krzywa, Kontrakt 8C: Opinia technologiczna - jezdnia północna, jezdnia południowa. Projektowanie betonowych nawierzchni drogowych. Warsztaty drogowe, Józefów k/Warszawy, Heilitt+Woerner Budowlana Sp. z o.o., Warszawa 1999
- [16] *Graveen C., Weiss W.J., Olek J., Nantung T.*: Implications of maturity and ultrasonic wave speed measurements in QC/QA for concrete. Brittle Matrix Composites-6, 379-388, Warszawa 2003
- [17] Concrete in practice: CPC 16. National Ready Mix Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2000
- [18] *Brunarski L.*: Kryteria zgodności wytrzymałości charakterystycznej materiałów budowlanych w normach PN-EN-ISO. Prace ITB, nr 4, 15-41, 2002
- [19] *Fagerlund G.*: Influence of pore structure on shrinkage, strength and elastic moduli. Report 44, Lund University of Technology, Lund 1973
- [20] *Baalabaki M., Aitein P.C.*: Cement/superplasticizer/air-entraining agent compatibility. 4th CANMET/ACI Intl. Conference on Superplasticizers and Chemical Admixtures, ed. V. M. Malhotra, ACI SP 148-3, 47-62, American Concrete Institute, Detroit 1994
- [21] *Gagne R., Boisvert A., Pigeon M.*: Effect of superplasticizer dosage on mechanical properties, permeability, and freeze-thaw durability of high strength concretes with and without silica fume. ACI Materials Journal, **93**, 2, 111-120, 1996

- [22] *Atzeni C., Massida L., Sanna U.*: Effect of pore distribution on strength of hardened cement pastes. Proc. Int. Congress RILEM, 195-202, Versailles 1987
- [23] *Luping T.*: A study of the quantitative relationship between strength and pore size distribution of porous materials. Cement and Concrete Research, **16**, 87-98, 1986
- [24] *Glinicki A.M., Glinicki M.A., Mikulicki I.*: Ocena napowietrzenia betonów w nawierzchniach jezdni i parkingów. DROGI i MOSTY, nr 1/2004, 5-23

NORMY I ZALECENIA

ACI 318-02 Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 2002

DS 2426:2004 Beton - Materialer - Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark

ÖNORM B 4710-1:2002 Beton - Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1)

ÖVBB 2002 - Richtlinie Faserbeton. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Marz 2002

PN-S-96015: 1975 Drogowe i lotniskowe nawierzchnie z betonu cementowego, PKN, 1975

PN-B-06250: 1988 Beton zwykły. PKN, 1988

PN-EN 12390-5: 2001 Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania. PKN, 2001

PN-EN 12390-6: 2001 Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania. PKN, 2001

PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie. PKN, 2002

PN-EN 206-1: 2003 Beton - Część 1. Wymagania, właściwości, produkcja, zgodność. PKN, 2003 (ze zmianami PN-EN 206-1:2003/A1: 2004)

PN-EN 13877-2 (U) Nawierzchnie betonowe - Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych

ZTV Beton - StB 01 Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2001. FGSV Verlag, Köln 2001

ANALYSIS OF FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE SPECIFIED FOR ROAD PAVEMENT

Abstract

A critical review of specifications for flexural strength of concrete in road pavements is presented considering technical means of compliance and control, as well as adherence to the criterion of adequate air void structure required for frost resistance. Numerous test data provide an evidence for a linear relationship between the flexural strength and the compressive strength raised to a power of $2/3$ or $1/2$. The scatter of flexural strength data is about twice greater than the scatter of compressive strength data; the coefficient of variation often reaches up to 10-15%. Both a total porosity and a distribution of air void diameters significantly influence the strength of concrete. Since the concrete strength and the air void content needed for frost resistance are conflict criteria the quality control procedures should be modified adequately. The current standards are not precise enough to describe the testing procedures neither in defining the conformity criteria.