

O efekcie skali w jednorodnych i zespolonych elementach betonowych. Część II: badanie efektu skali w pomiarze przyczepności betonu „starego” i „nowego” metodą rozłupywania

The size effect in monolithic and composite concrete members. Part II: the examination of size effect by adhesion measurement of „old” and „new” concrete using splitting tensile test

1. Wprowadzenie

W pierwszej części artykułu omówiono podstawy teoretyczne efektu skali oraz przykłady występowania tego zjawiska w przypadku próbek i elementów z betonu (1). We wnioskach stwierdzono, że o ile problem efektu skali w betonowych elementach monolitycznych jest znany, o tyle dane dotyczące występowania efektu skali w przypadku przyczepności dwóch betonów są fragmentaryczne. Z tego względu przeprowadzono badania takich próbek, których wyniki są przedmiotem tego artykułu.

2. Program badań

Badano próbki złożone z dwóch betonów, połączonych po 14 dniach twardnienia jednego z nich, stosując metodę normową oceny wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu [PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu. Część 6]. Powierzchnia styku tych betonów usytuowana była pionowo, w osi przykładowych sił ścisających. Zatem styk betonów poddany był rozciąganiu. Schemat badań i wielkości próbek pokazano na rysunku 1.

Badania przeprowadzono w dwóch seriach, które różniły się klasami łączonych betonów [zwanymi „zespolonymi”]. Wytrzymałość betonu „starego” i „nowego” w serii I była taka sama i odpowiadała klasie C30/37, natomiast w serii II wytrzymałość betonu „starego” odpowiadała klasie C40/50, a betonu „nowego” – klasie C30/37. Każda seria pomiarów obejmowała pięć zespolonych próbek sześciennych, o trzech różnych wymiarach: 100 mm, 150 mm oraz 200 mm.

3. Skład betonu i wykonanie próbek

Mieszanke betonową wykonano z cementu portlandzkiego i kruszywa piaskowo-żwirowego, o ziarnach do 16 mm. Skład betonu

1. Introduction

In the first part of this paper the theoretical basis of the size effect were presented (1). In the conclusions it was stated that the problem of size effect in monolithic concrete elements is well known, but there is a lack of data of size effect regarding the bond strength between two concretes, in composite elements. It is why the authors programmed and realized the studies, which results are presented in the second part of the paper.

2. Program of experiments

The study was conducted on two series of specimens which was composed of two connected concretes, of different strength and classes. The strength of “old” and “new” concrete of specimens in series I, both belonged to the class C30/37, while in series II, the “old” concrete strength was rated to the class C40/50 while the “new” concrete – to class C30/37. In each series, three kinds of cubic samples of side length of 100 mm, 150 mm and 200 mm were tested. Each test in each series embraced five specimens and the result was the mean value.

3. Concrete composition and specimens production

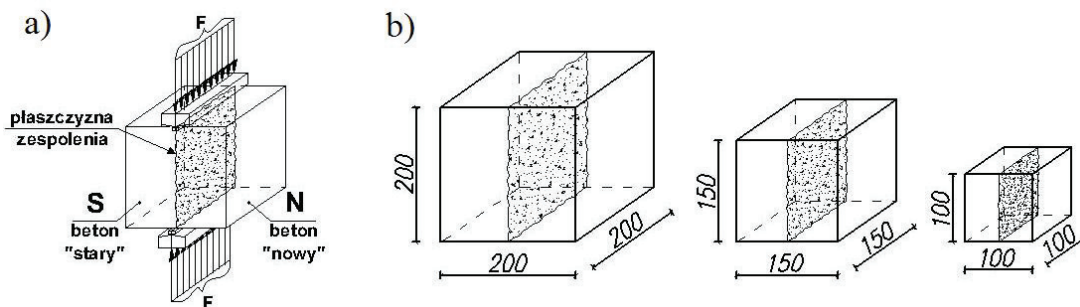
Portland cement and sand-gravel aggregate, with grains of up to 16 mm, were used for the preparation of the concrete mix. The composition of concrete mixes were the same in the case of all specimens i.e. contained 450 kg/m³ of cement, 1312 kg/m³ of sand-gravel aggregate and 177 kg of water, thus the water to cement ratio was constant, equal about 0,39. However, in the series I both concretes “old” and “new” were produced from cement CEM I 32.5 R, but in series II “old” concrete was composed of CEM I 42.5 R and the “new one from CEM I 32.5 R.

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI BADAŃ PRÓBEK ZESPOLONYCH

TEST RESULTS OF COMPOSITE SPECIMENS

Seria badań Test series	Wymiary kostek Cubes dimensions	Wytrzymałość betonów na rozciąganie Tensile strength of connected concrete parts tested on the day of composite specimen investigation		Wytrzymałość wiązania na rozciąganie przy rozłupywaniu Tensile bond strength of the interface in composite specimens				$\sigma_{ctm,z} / \sigma_{ctm,z150}$
		Stary "old" concrete	Nowy "new" concrete	$\sigma_{ctm,z}$ MPa	$\sigma_{fctm,z}$ MPa	$v_{fctm,z}$ [%]	ilość próbek number of specimens	
		$f_{ctm,S}$ MPa	$f_{ctm,N}$ MPa					
I	100	3,51	3,40	1,25	0,21	16,7	5	1,05
	150	2,81	2,90	1,19	0,17	14,3	5	1,00
	200	2,71	2,68	1,10	0,14	12,8	5	0,92
II	100	3,75	3,55	1,62	0,12	7,3	6	1,45
	150	3,21	2,75	1,12	0,07	6,3	5	1,00
	200	3,19	2,47	1,09	0,05	4,4	5	0,97



Rys. 1. Schemat prowadzenia pomiarów a) i wymiary próbek zespolonych b)

Fig. 1. Scheme of the experiment a) and dimensions of composite specimens b)

był jednakowy we wszystkich próbkach i zawierał 450 kg/m³ cementu, 1312 kg/m³ kruszywa piaskowo-żwirowego oraz 177 kg wody, a więc stosunek wodno-cementowy wynosił około 0,39. Jednak w serii I oba betony „stary” i „nowy” wykonano z cementu CEM I 32,5 R, natomiast w serii drugiej „stary” beton wykonano z cementu CEM I 42,5 R, natomiast „nowy” z cementu CEM I 32,5 R.

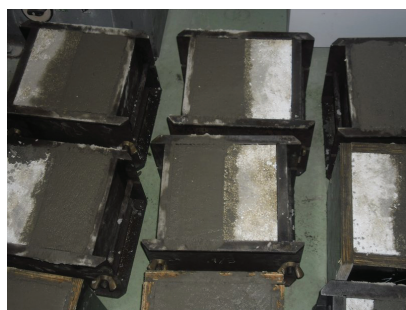
Próbki przygotowywano w dwóch etapach, w formach stalowych. W pierwszym etapie w formach, w których połowa objętości wypełniona była styropianem, układano beton „stary”. Po jednym dniu dojrzewania w warunkach wilgotnych (nawilżanie wodą) próbki rozformowano. Następnie przez 14 dni próbki dojrzewały w temperaturze 20° C, przy stałym nawilżaniu wodą. Po 14 dniach przygotowano powierzchnię stwardniałego betonu i wypełniono drugą połowę formy betonem „nowym”. Przygotowanie powierzchni betonu „starego” polegało na usunięciu mleczka cementowego stalowymi szczotkami. na cztery godziny przed betonowaniem. Następnie zwilżano powierzchnię „starej” próbki i po ponownym jej umieszczeniu w formie, drugą połowę formy wypełniono „nowym” betonem. Po jednym dniu dojrzewania betonu „nowego” w warunkach wilgotnych (nawilżanie wodą) próbki rozformowywano. Przez następne 14 dni próbki dojrzewały w wannach w temperaturze 20°C, w wilgotnych warunkach. Po tym okresie przeprowadzano pomiary.

The specimens were produced in two stages, in steel moulds. In the first stage half of the mould was filled with foamed polystyrene and “old” concrete was placed into the remaining half. After one day of curing in wet conditions (moistening with water) the specimens were demoulded. Next fourteen days the specimens were moistened with water and kept in tanks at temperature of 20°C. After fourteen days of the “old” concrete curing its one surface was prepared by cleaning from bleeding residue with steel brushes and moistened with water and the specimens were placed again into moulds. Then in the moulds the “new” concrete was placed. After one day of curing in wet conditions (moistening with water) the composite specimens were demoulded. Next fourteen days the specimens were moistened with water and kept in tanks at a temperature of 20°C. The composed specimens were tested after 14 days of curing of the “new” concrete.

The destruction of all composite specimens took place by the delamination in the interface (adhesive destruction) or by delamination in the interface, with the minor damage in the “new” concrete layer (Figs. 3, 4).

3. Test results

The test results are depicted in Table 1. The average splitting tensile strength of concrete in both specimen parts f_{ctm} (tested on



a)



b)

Rys. 2. Przygotowanie próbek: a) połówki próbek z betonu „starego” w formach obok styropianu, b) próbka zespolona

Fig. 2. Preparation of specimens: a) halves of „old” concrete” in moulds partially filled with foamed polystyrene, b) composite specimen

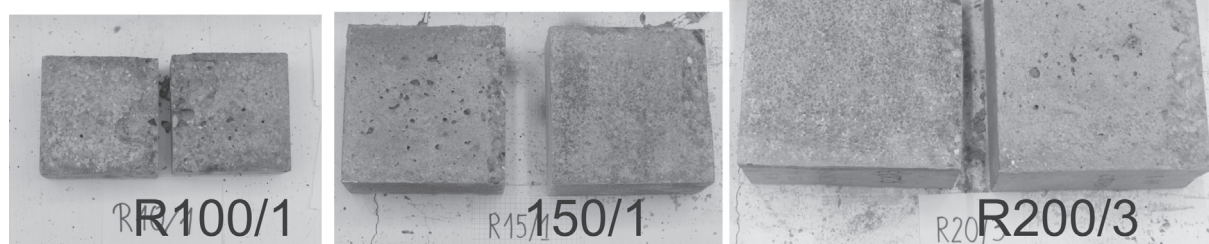
specimens with a side of 100 mm, 150 mm, 200 mm) and stresses corresponding to the bond strength in each series – their average values $s_{f_{cr,m,z}}$, standard deviation $s_{f_{cr,m,z}}$ and coefficient of variation $n_{f_{cr,m,z}}$, are given in this Table 1.

Concrete tensile strength f_{ctm} was calculated on the basis of splitting tensile strength of monolithic specimens $f_{ctm,sp}$, which was determined considering the ultimate force; the formula given in EN 1992-1-1 standard was used:

$$f_{ctm} = 0,9 \cdot f_{ctm,sp} \quad (1)$$

Due to concentration of pressure in the area of force application, cracks in the interface of composite specimens appeared much earlier than their failure. Thus, the achieved bond strength and cracking of the interface, was recognized as the tensile bond strength by the tensile stress in the interface. Its measure was the value of stress causing the crack in the interface. The crack was identified by the discontinuities in the “force-time” (or the “force-displacement”) graph, obtained automatically from the testing machine, well visible at the moment of cracking.

In Fig. 5 the results of tests of different specimens, i.e. with different interface areas, are shown. The size effect is visible in the graphs – specimens with a larger interface area have a lower load capacity (in series I: specimens of 200 mm – 1.10 MPa, of 150 mm – 1.19 MPa, of 100 mm – 1.25 MPa, in series II: 200 mm



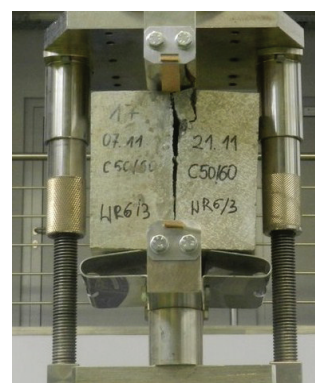
Rys. 3. Zniszczone próbki: a) kostka o boku 100 mm, b) kostka o boku 150 mm, c) kostka o boku 200 mm

Fig. 3. The specimens after destruction: a) specimen with a side of 100 mm, b) with a side of 150 mm, c) with a side of 200 mm

Zniszczenie próbek zespolonych następowało poprzez rozwarstwienie w płaszczyźnie styku (zniszczenie adhezyjne) lub poprzez rozwarstwienie w płaszczyźnie styku, z niewielkim zniszczeniem w warstwie „nowego” betonu (rysunki 3 i 4).

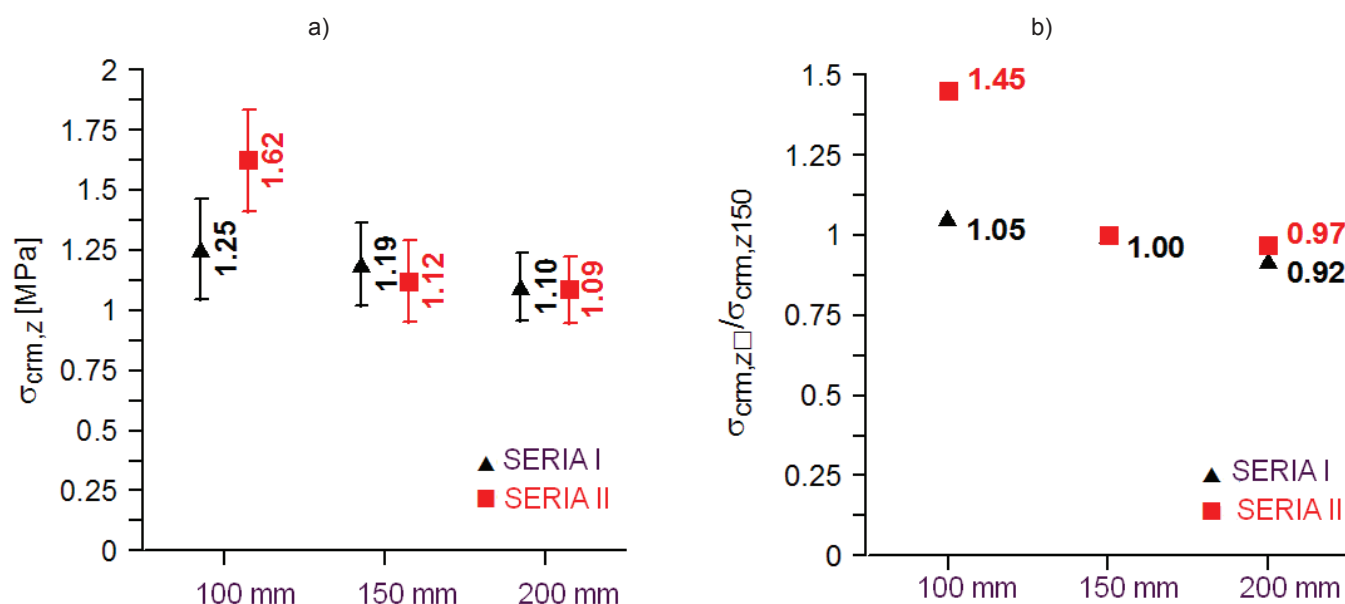
4. Wyniki pomiarów

Wyniki badań zestawiono w tabelicy 1. Podano średnią wytrzymałość na rozciąganie łączonych betonów f_{ctm} (badaną, zależnie od serii, na próbkach 100mm, 150 mm, 200mm) oraz naprężenia odpowiadające nośności styku próbek w każdej serii. Wszystkie wyniki są średnimi z badań pięciu próbek. W tabelicy 1 podano także odchylenia standardowe i współczynniki zmienności uzyskanych wyników.



Rys. 4. Próbką w maszynie po pomiarze

Fig. 4. An composite specimen after the test



Rys. 5. Wytrzymałość wiązania próbek zespolonych o różnych wymiarach a), współczynnik zmienności b)

Fig. 5. Results of bond strength tests of the specimens of different sizes: a) bond strength, b) coefficient of variation obtained in the tests: cubes of 100 mm, cubes of 150 mm, cubes of 200 mm

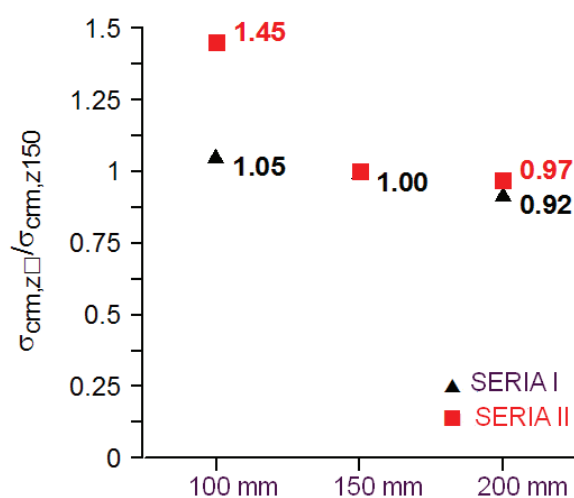
Wytrzymałości na rozciąganie betonów f_{ctm} obliczono na podstawie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek monolitycznych $f_{ctm,sp}$, ustalonej z uwzględnieniem siły niszczącej, korzystając ze wzoru zawartego w normie PN-EN-1992-1-1: Eurokod 2.

$$f_{ctm} = 0,9 \cdot f_{ctm,sp} \quad (1)$$

Naprężenia występujące w strefie przyłożenia siły ściskającej powodowały zarysowanie wiązania dwóch próbek zespolonych znacznie wcześniej, przed ich zniszczeniem. Zatem jako wytrzymałość wiązania na rozciąganie przyjmowano pokonanie przyczepności i zarysowanie styku. Miarą była wielkość naprężeń powodujących zarysowanie połączenia $\sigma_{crm,z}$. Samo zarysowanie ustalano na podstawie wystąpienia nieciągłości na uzyskanym automatycznie z prasy wykresie „siła-czas”, lub „siła-przemieszczenie”.

Na rysunku 5 zestawiono wyniki uzyskanej wytrzymałości wiązania różnych próbek, a więc w przypadku różnej powierzchni styku. Uzyskane wyniki wykazują wystąpienie efektu skali, a mianowicie w przypadku próbek o większej powierzchni styku wytrzymałość wiązania jest mniejsza: w przypadku serii I i kostek 200 mm osiągnęła ona 1,10 MPa, w przypadku kostek 150 mm – 1,19 MPa, a próbek 100 mm 1,25 MPa, natomiast w serii II: na kostkach 200 mm - 1,09 MPa, 150 mm - 1,12 MPa, a 100 mm – 1,62 MPa. Jednak współczynniki zmienności tej cechy wykazały zależność odwrotną i były mniejsze w przypadku kostek z większą powierzchnią przyczepności: w serii I na kostkach 200 mm współczynnik zmienności wynosił 12,78%, 150 mm – 14,34%, a 100 mm – 16,74%, w serii II w przypadku próbek 200 mm 4,45%, 150 mm – 6,34%, a 100 mm – 7,34%.

Nie stwierdzono różnic wytrzymałości wiązania dwóch betonów w przypadku zastosowania wyższej klasy betonu „starego”.



Rys. 6. Nośność wiązania s_{ctmz} kostek zespolonych o różnych wymiarach w odniesieniu do próbek 150; na osi odciętych: kostki 100 mm, 150 mm i 200 mm

Fig. 6. Bond strength s_{ctmz} tested on cubes of different sizes in relation to 150 mm specimen, on X-axis: cubes of 100 mm, of 150 mm, of 200 mm

specimens – 1.09 MPa, 150 mm – 1.12 MPa, 100 – 1.62 MPa), however, with lower coefficient of variation (in series I: 200 mm specimens – 12.78%, 150 mm – 14.34%, 100 mm – 16.74%, in the series II: 200 mm specimens – 4.45%, 150 mm – 6.34% and 100 mm – 7.34%).

Table 1 presents the ratios of the interface bond strength in specimens of different sizes and the bond strength tested on specimens with a side of 150 mm. These dependencies are shown in Fig. 6. It is shown that the bond strength of composite specimens with a side of 100 mm and 200 mm, in relation to the bond strength of composite specimens with a side of 150 mm, was respectively, in series “I” - 105% and 92%, and in series “II” - 145% and 97% .

W tablicy 1 podano także stosunek wytrzymałości wiązania próbek o różnych wymiarach do wytrzymałości wiązania, zmierzonego na kostkach o wymiarach 150 mm. Zależność tę pokazano także na rysunku 7. Jak to już podano omawiając uzyskane wyniki pomiarów nośność wiązania kostek zespolonych o boku 100 mm była większa, a kostek 200 mm mniejsza i stanowiła odpowiednio w serii I - 105% i 92%, a w serii II - 145% i 97%, nośności próbek 150 mm.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wytrzymałości dwóch betonów stwierdzić można, co następuje:

1. Zjawisko efektu skali występuje nie tylko w przypadku jednorodnych elementów z betonu, ale także dotyczy przyczepności dwóch betonów, ocenianej w próbie rozłupywania.
2. Wyznaczona doświadczalnie wytrzymałość na rozciąganie przyczepności dwóch betonów maleje wraz ze wzrostem wielkości próbki, jednak równocześnie wyniki są bardziej jednorodne [zmniejsza się współczynnik zmienności].
3. Nie stwierdzono różnic wytrzymałości wiązania dwóch betonów, w przypadku zastosowania wyższej klasy betonu „starego”.

4. Conclusions

On the basis of tests results of the bond strength in the interface of two concretes of composed elements, the following conclusions can be drawn:

1. The size effect phenomenon is valid in the case of composed concrete elements, and not only in the monolithic ones.
2. The bond strength in the interface between two concrete parts is decreasing with the increase of the specimen size, however, the coefficient of variation of the measurements is decreasing for these specimens.
3. No differences of bond strength of two concretes were found in the case of higher class of „old” concrete.

Literatura / References*

1. Halicka A., Franczak-Balmas D.: The size effect in monolithic and composite concrete members. Part 1, Cement Wapno Beton, **80**, 387, 2013

* Remark: All references are given in the first part of the paper, which appeared as above.