

Zawartość zaczynu cementowego jako czynnik wpływający na wytrzymałość betonu na sciskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu

Cement paste content as the factor influencing on compressive and splitting tensile strength of concrete

1. Wprowadzenie

Wpływ składu betonu cementowego na jego właściwości, w tym właściwości mechaniczne, a także na jego ogólne rozumianą trwałość, są jednymi z bardzo dobrze rozpoznanych problemów technologii betonu. Problemy z tym związane są obszernie prezentowane i dyskutowane w podstawowych współczesnych monografiach i podręcznikach dotyczących technologii betonu (1-4).

Podstawową właściwością cementowego betonu konstrukcyjnego jest jego wytrzymałość na ściskanie oraz związana z nią wytrzymałość na rozciąganie. Jak ogólnie wiadomo, na wytrzymałość betonu ma wpływ bardzo duża ilość czynników, zarówno materiałowych (rodzaj i właściwości składników, proporcje ich udziałów itp.) jak i technologicznych (stopień zagęszczenia, czas i warunki dojrzewania itp.). Większość z tych czynników jest uwzględniana podczas projektowania składu betonu.

Jednym z czynników, nie uwzględnianym zazwyczaj bezpośrednio podczas praktycznego projektowania betonu, są relacje objętościowych udziałów zaczynu cementowego i kruszywa w tym kompozycie. Wprawdzie ogólnie znane i przestrzegane wymaganie aby stos ziarnowy kruszywa miał możliwie najniższą jamistość można uznać za wyraz dążenia do obniżania zawartości zaczynu, ale w praktycznie stosowanych betonach uważana za poprawną zawartość zaczynu waha się w dosyć szerokich granicach, zazwyczaj od około 250 do około 350 dm^3/m^3 . Ta powszechnie akceptowana zmienność wynika między innymi z ograniczonych możliwości uzyskania maksymalnie szczelnego stosu okruszowego, a także z wymagań dotyczących konsystencji i urabialności mieszanki betonowej. W niektórych przypadkach potrzeba zwiększenia zawartości zaczynu w mieszance betonowej może wynikać z konieczności uwzględnienia tak zwanego efektu ściany, opisanego szczegółowo w pracy jednego z autorów (5). Potrzeba stosowania większych zawartości zaczynu występuje z oczywistych powodów w betonach samozagęszczających się, które nie są przedmiotem prezentowanych w tej pracy badań.

1. Introduction

The influence of the concrete composition on its behaviour, including mechanical properties, and durability, is one of the very well investigated problems of the concrete technology. Problems related with this subject are extensively presented and discussed in fundamental contemporary monographs and handbooks concerning concrete (1-4).

The compressive strength of concrete and related to it tensile strength are the basic properties of structural concrete. As it is generally known, many factors influence on the concrete strength. These are material based factors (type and properties of constituents, their proportions etc.) as well as technological based factors (compaction ratio, time and conditions of curing etc.). Most of these factors are included during the design of concrete composition. One of the factors, which is usually not directly included during the practical design, is the relation of the volume contents of cement paste and aggregate in concrete. Generally known and accepted requirement is to have the granular skeleton with the lowest voids content, which can be regarded as a way of decreasing the cement paste content. However, in practically used concretes the cement paste content considered as correct is in the quite wide range, usually from around 250 up to around 350 dm^3/m^3 . This commonly accepted variation results, among others, from limited possibilities to achieve the minimum voids content in granular skeleton, and also from the requirements concerning consistency and workability of concrete mix. In some cases the need to increase cement paste content in concrete mix may result from the necessity of including so called wall effect, which is precisely described in the paper of one of the authors (5). The need to use increased cement paste contents is obvious in the case of self-compacting concrete, which is not an object of presented investigations.

Considering hardened concrete as a two-component granular composite, its properties, also including strength, in the most simple case can be estimated by so called rule of mixtures. In such a case

Rozpatrując stwardniały beton cementowy jako dwuskładnikowy kompozyt ziarnisty, jego właściwości, w tym także wytrzymałość, mogą być w najprostszym przypadku szacowane za pomocą tak zwanego. prawa mieszanin. Właściwość jest w tym przypadku szacowana jako średnia ważona cecha obydwu składników, czyli stwardniałego zaczynu (W_z) i kruszywa (W_k). Znając właściwości obydwu składników oraz ich względne udziały objętościowe (V_z i V_k) właściwość betonu (W_b) oszacować można jako sumę dwóch iloczynów:

$$W_b = V_z W_z + V_k W_k$$

Ta bardzo uproszczona zależność ma, zwłaszcza w przypadku szacowania wytrzymałości, jeden poważny mankament, którym jest brak uwzględnienia więzów łączących zaczyn z kruszywem, określanych ogólnie jako przyczepność. Szacowanie wytrzymałości jest z tego powodu bardzo przybliżone.

W przypadku analizowania wytrzymałości na ściskanie betonu cementowego łatwo dostrzec, iż zaczyn jest niemal zawsze składnikiem słabszym, z czego wynika, iż z punktu widzenia uzyskania maksymalnej wytrzymałości materiału, jego udział objętościowy powinien być możliwie jak najmniejszy. Z przytoczonego prawa mieszanin wynika pozornie paradoksalny wniosek, że w celu uzyskania maksymalnej wytrzymałości, beton powinien się składać z samego kruszywa. Z oczywistych względów uzyskanie takiego „betonu” nie jest jednak możliwe.

Zagadnienie wpływu zawartości zaczynu na właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego było już przedmiotem licznych badań i analiz prowadzonych przez cały szereg badaczy (6–8). Jednak wyniki tych badań albo straciły na ważności z powodu zmian w jakości i zróżnicowaniu spoiw cementowych oraz postępu w technologii betonu, jakie miały miejsce w ciągu wielu lat (6), albo nie pozwalają na łatwą bezpośrednią ocenę ilościową tego wpływu (7), lub także niewielki zakres zróżnicowania zmiennych czynników związanych ze składem betonu nie pozwala na ich uogólnienie (8).

Przedmiotem prezentowanych w tej pracy badań była ilościowa ocena wpływu zawartości zaczynu, zmieniana w uznanych za dopuszczalne granicach, na wytrzymałość współczesnego betonu konstrukcyjnego na ściskanie oraz na jego wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Efekty wpływu zmiennej zawartości zaczynu na wytrzymałość betonu badano stosując różny stosunek w/c. Informacje o wpływie zawartości zaczynu na inną ważną techniczną właściwość betonu, jego nasiąkliwość wodą, znaleźć można we wcześniejszej pracy autorów (9), w której stosowano te same betony, które są analizowane w prezentowanych badaniach.

2. Stosowane betony

Badaniami objęto trzy grupy betonów wykonanych z trzech najczęściej stosowanych w praktyce rodzajów cementów: CEM I 42.5; CEM II/A-V 42.5 i CEM III/A 42.5. Cementy te charakteryzowały się bardzo podobną dwudziestośmiodniową wytrzymałością na ściskanie, która wynosiła odpowiednio: 55.1; 56.2 i 50.7 MPa.

the property is estimated as a weighed mean of properties of both components, i.e. hardened cement paste (W_z) and aggregate (W_k). Knowing the properties of both components and their relative contents (V_z and V_k) the concrete property can be estimated as:

$$W_b = V_z W_z + V_k W_k$$

This simplified relationship has one major lack, especially in the case of strength estimation, which relies in not taking into account the bond of cement paste and aggregate, generally defined as adhesion. Therefore, the strength estimation is very approximate.

Considering the compressive strength of concrete it is evident that cement paste is almost always a weaker component, what causes that for obtain the composite with maximum strength cement paste content should be as low as possible. Based on the cited rule of mixtures a seemingly paradoxical conclusion can be drawn that for obtain the maximum strength, the concrete should be composed of aggregate only. Production of such “concrete” is obviously impossible.

The influence of cement paste content on the properties of concrete mix and on hardened concrete has already been a goal of extensive works and analyses of many authors (6–8). However, the results have become obsolete because of the changes in the quality and the diversity of cementitious material and the development of the concrete technology, which took place over many years (6), or the results do not allow an easy direct quantitative evaluation of that influence (7), or little range of variation of changeable parameters of concrete composition also does not allow to find a general rule (8).

A quantitative evaluation, how significantly cement paste content changing in acceptable range is influencing on the compressive and splitting tensile strength of present structural concrete was the goal of presented investigation. The effect of the variable cement paste content on concrete strength were analysed in the context of variable w/c ratios. The information concerning the influence of cement paste content on the other important technical property of concrete, i.e. water absorption, can be found in the previous paper of the authors (9), which were devoted to the same concrete as analysed in presented investigations.

2. Used concretes

The investigation covered three groups of concretes produced of three the most frequently used cements: CEM I 42.5; CEM II/A-V 42.5 and CEM III/A 42.5. These cements have a similar compressive strength after 28 days, namely 55.1, 56.2 and 50.7 MPa respectively.

Twelve concretes were examined in each group. These concretes were differentiated by w/c ratio (from 0.30 to 0.60), cement paste content V_z (from 240 to 360 dm³/m³) and the type of coarse aggregate 2/16 mm (gravel or basalt). To ensure the constant average thickness of cement paste layer on the aggregate particles, around 0.06 mm, the aggregate composition in particular concretes has

Każda grupa obejmowała 12 betonów, o zróżnicowanym stosunku w/c (od 0.30 do 0.60), różnej zawartości zaczynu cementowego V_z (od 240 do 360 dm³/m³) oraz innym rodzaju kruszywa grubego 2/16 mm (żwir lub grys bazaltowy). W celu zapewnienia stałej wartości średniej grubości otulenia ziaren kruszywa zaczynem, na poziomie około 0.06 mm, składy kruszywa w poszczególnych betonach miały zmienny punkt piaskowy, który wynosił 24, 35 i 45%, odpowiednio przy zawartości zaczynu 240, 300 i 360 dm³/m³. Należy podkreślić, że wszystkie badane betony cechowały się podobną konsystencją i urabialnością mieszanki betonowej. Obydwie te właściwości utrzymywano na stałym poziomie za pomocą domieszek upłynniających.

Przedstawione zróżnicowanie składu pozwoliło na uzyskanie betonów o wytrzymałości na ściskanie zmieniających się w szerokim zakresie – od około 40 do około 100 MPa. Składy betonów i szczegółowe informacje dotyczące ich składu przedstawiono w tablicy

W przypadku betonów o w/c = 0.30 z grubego kruszywa bazaltowego, wykonano także dodatkową serię zawierającą dodatek pyłu krzemionkowego, w ilości 8% masy cementu. W przypadku zawartości zaczynu wynoszącej 240 dm³/m³ niemożliwym okazało się uzyskanie mieszanki o poprawnej urabialności. Z tego powodu badano tylko dwa jego warianty, z zaczynem w ilości 300 i 360 dm³/m³. Wyniki wpływu zawartości zaczynu na wytrzymałość tych betonów analizowano oddzielnie.

3. Próbk i metody ich badań

Do badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu stosowano kostki o boku 150 mm. Te wytrzymałości oznaczano po dziewięćdziesięciodniowym okresie ich dojrzewania. W czasie pierwszych 28 dni próbki dojrzewały w komorze, w temperaturze 20±2°C i wilgotności względnej powietrza > 90%, a następnie, do chwili badania, w warunkach laboratoryjnych, w zmiennej temperaturze, w zakresie od 18 do 25°C i wilgotności względnej powietrza od 45 do 60%.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD TRZECH GRUP BETONÓW Z TRZECH CEMENTÓW: CEM I 42.5; CEM II/A-V 42.5 i CEM III/A 42.5

COMPOSITION OF THE THREE GROUPS OF CONCRETES FROM THREE CEMENTS: CEM I 42.5; CEM II/A-V 42.5 AND CEM III/A 42.5

| | w/c = 0.30 | | | w/c = 0.40 | | | w/c = 0.50 | | | w/c = 0.60 | | |
|-------|-------------------------------|------|-----|-------------------------------|------|-----|-----------------------------|------|-----|-----------------------------|------|----------|
| | V_z | C | W | V_z | C | W | V_z | C | W | V_z | C | W |
| V_z | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 |
| C | 385 | 482 | 578 | 332 | 415 | 498 | 292 | 365 | 438 | 260 | 325 | 390 |
| W | 116 | 145 | 173 | 133 | 166 | 199 | 146 | 182 | 219 | 156 | 195 | 234 |
| P | 540 | 684 | 825 | 540 | 684 | 825 | 546 | 687 | 828 | 546 | 687 | 828 |
| K_g | bazalt (basalt) 2/8 + 8/16 mm | | | bazalt (basalt) 2/8 + 8/16 mm | | | żwir (gravel) 2/8 + 8/16 mm | | | żwir (gravel) 2/8 + 8/16 mm | | |
| | 1675 | 1332 | 992 | 1675 | 1332 | 992 | 1440 | 1146 | 852 | 1440 | 1146 | 852 |
| SP | tak / yes | | | | | | | | | | | nie / no |

V_z – zawartość zaczynu cementowego w betonie [dm³/m³]; C – cement CEM I lub CEM II lub CEM III [kg/m³];

W, P, K_g – odpowiednio woda, piasek, kruszywo grube [kg/m³]; SP – superplastyfikator

V_z – cement paste content [dm³/m³]; C – cement types: CEM I or CEM II or CEM III content [kg/m³];

W, P, K_g – respectively water, sand and coarse aggregate content [kg/m³]; SP – superplasticizer

variable sand content, namely 24, 35 and 45%, for the cement paste content equal to 240, 300 and 360 dm³/m³ respectively. It must be underlined that all concretes were produced of the mixes having similar consistency and workability. Both these properties were controlled by superplasticizer addition.

Presented diversity of composition enabled to obtain concretes with variable strength, within the wide range from around 40 up to around 100 MPa. The concretes composition and detailed information of composition variation are presented in Table 1.

In the case of concrete with w/c = 0.30 and the coarse basalt aggregate, one series was also produced with the addition of 8% by cement mass of silica fume. It was impossible to obtain the concrete mix with correct workability in the case of cement paste content equal to 240 dm³/m³. It was the cause that only two variants of this concrete were examined, with cement paste content of 300 and 360 dm³/m³. The results of the influence of cement paste content on the strength of these concretes were analysed separately.

3. Samples, investigated properties and methods of evaluation

For the examination of compressive and splitting tensile strength cubic samples of dimension of 150 mm were used. These strength were examined after 90 days of curing. During first 28 days samples were cured in a chamber at temperature of 20±2°C and relative air humidity above 90%. Then, up to test time, the samples were kept in the laboratory conditions at changeable temperature in the range from 18 to 25°C and relative humidity in the range of 45-60%.

The compressive and splitting tensile strength were tested in compliance with the requirements of PN-EN 12390-3:2011 Standard and PN-EN 12390-6:2011 Standard, respectively. For each of 36 concrete composition both types of strength were tested on 3 samples. The average values were used in presented further analyses.

Tablica 2 / Table 2

WYTRZYMAŁOŚĆ BETONÓW NA ŚCISKANIE I NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU

CONCRETES COMPRESSIVE AND SPLITTING TENSILE STRENGTH

| Betony z cementu CEM I 42,5/Concretes of CEM I 42.5 | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| kruszywo grube coarse aggregate | bazaltowe/basalt | | | | | | żwirowe/gravel | | | | | |
| w/c | 0.30 | | | 0.40 | | | 0.50 | | | 0.60 | | |
| V_z | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 |
| f_{c90} | 87,8 | 83,2 | 77,2 | 80,8 | 73,1 | 63,7 | 70,8 | 56,6 | 50,8 | 61,8 | 44,6 | 43,0 |
| f_{190} | 5.5 | 5.0 | 4.2 | 5.4 | 4.8 | 4.2 | 4.4 | 4.1 | 3.9 | 3.9 | 3.6 | 3.2 |
| f_{190}/f_{c90} | 0.063 | 0.060 | 0.054 | 0.067 | 0.066 | 0.066 | 0.062 | 0.072 | 0.077 | 0.063 | 0.081 | 0.074 |
| Betony z cementu CEM II/A-V 42,5/Concretes of CEM II/A-V 42.5 | | | | | | | | | | | | |
| kruszywo grube coarse aggregate | bazaltowe/basalt | | | | | | żwirowe/gravel | | | | | |
| w/c | 0.30 | | | 0.40 | | | 0.50 | | | 0.60 | | |
| V_z | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 |
| f_{c90} | 97.4 | 91.2 | 87.8 | 85.1 | 80.6 | 66.9 | 66.3 | 60.4 | 57.6 | 60.3 | 55.1 | 46.7 |
| f_{190} | 6.1 | 5.8 | 5.3 | 5.5 | 4.8 | 4.1 | 4.8 | 3.9 | 3.3 | 4.3 | 3.6 | 2.9 |
| f_{190}/f_{c90} | 0.063 | 0.064 | 0.060 | 0.065 | 0.060 | 0.061 | 0.072 | 0.065 | 0.057 | 0.071 | 0.065 | 0.062 |
| Betony z cementu CEM III/A 42,5/Concretes of CEM III/A 42.5 | | | | | | | | | | | | |
| kruszywo grube coarse aggregate | bazaltowe/basalt | | | | | | żwirowe/gravel | | | | | |
| w/c | 0.30 | | | 0.40 | | | 0.50 | | | 0.60 | | |
| V_z | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 | 240 | 300 | 360 |
| f_{c90} | 88.8 | 78.0 | 74.3 | 76.3 | 67.9 | 61.5 | 63.3 | 49.9 | 46.5 | 49.3 | 45.8 | 41.9 |
| f_{190} | 6.3 | 5.9 | 5.1 | 5.1 | 4.5 | 3.9 | 4.2 | 3.9 | 3.6 | 3.9 | 3.4 | 3.2 |
| f_{190}/f_{c90} | 0.071 | 0.076 | 0.069 | 0.067 | 0.066 | 0.063 | 0.066 | 0.078 | 0.077 | 0.079 | 0.074 | 0.076 |

V_z – zawartość zaczynu cementowego w betonie [dm^3/m^3]; f_{c90} , f_{190} – wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]

V_z – cement paste content [dm^3/m^3]; f_{c90} , f_{190} – respectively compressive and flexural tensile strength [MPa]

Warunki badania wytrzymałości na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu były zgodne z zaleceniami norm, odpowiednio PN-EN 12390-3:2011 i PN-EN 12390-6:2011. Dla każdego z 36 wariantów składu betonu obie te wytrzymałości oznaczano na 3 próbkach. W prowadzonych analizach korzystano z wartości średnich.

4. Wyniki badań i ich analiza

4.1. Wyniki badań

Wyniki badań wytrzymałości betonów na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu oraz obliczone wartości wskaźnika kruchości, rozumianego jako iloraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu do wytrzymałości na ściskanie (f_{190}/f_{c90}), podano w tablicy 2.

4.2. Wpływ zawartości zaczynu na wytrzymałość na ściskanie

Analizę wpływu zawartości zaczynu na wytrzymałość betonów na ściskanie przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym analizowano oddzielnie betony z kruszywa żwirowego, o stosunku $w/c = 0.50$ i 0.60 i oddzielnie betony z kruszywa bazaltowego,

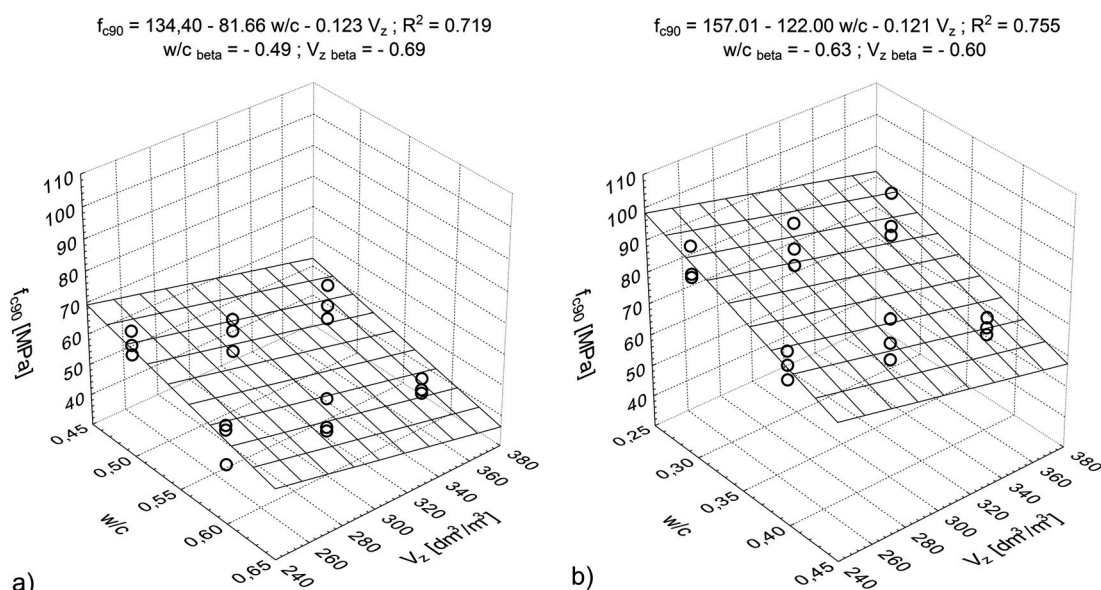
4. Result and analysis

4.1. Results

The results of compressive and splitting tensile strength of concretes, as well as calculated values of brittleness index, defined as a quotient of splitting tensile strength to compressive strength (f_{190}/f_{c90}), are given in Table 2.

4.2. Influence of cement paste content on compressive strength

The analysis of the influence of cement paste content on the compressive strength of concretes was performed in two stages. In the first stage concretes made of gravel aggregate and characterized by $w/c = 0.50$ and 0.60 ratio were analyzed separately from concretes made of basalt aggregate, in case of which the w/c ratio was equal to 0.30 and 0.40 . The results of the analysis, as a linear regression functions and their charts, values of coefficients of variations and standardized coefficients of regression w/c_{beta} and $V_{z \text{ beta}}$, showing contribution of the two variables to the strength prediction, are presented in Fig. 1. Similar analysis, but covering all investigated concretes, is presented in Fig. 2.



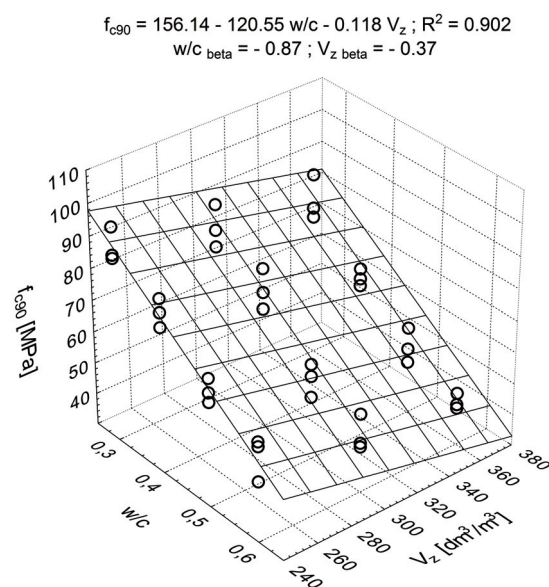
Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie f_{c90} od wskaźnika w/c i zawartości zaczynu V_z dla betonów z różnych cementów analizowana oddzielnie dla betonów wykonanych z kruszywa żwirowego (a) i bazaltowego (b)

Fig. 1. The relationship between compressive strength f_{c90} and w/c ratio and cement paste content V_z for concretes made of different cements, presented separately for concretes made of gravel aggregate (a) and basalt aggregate (b)

w przypadku których stosunek w/c wynosił 0.30 i 0.40. Wyniki tej analizy, w postaci liniowych funkcji regresji i ich wykresów, wartości współczynników determinacji oraz standaryzowanych współczynników regresji w/c_{beta} i V_z_{beta} , podających wkład, jaki wnoszą obydwie zmienne w predykcję wytrzymałości, przedstawiono na rysunku 1. Podobną analizę, lecz obejmującą wszystkie rozpatrywane betony przedstawia rysunek 2.

Stopień skorelowania wytrzymałości na ściskanie z rozpatrywanymi zmiennymi parametrami składu betonu jest w każdym z przedstawionych przypadków wysoki ($R^2 = 0.72$ do 0.90). Uznano więc, że zależności te można wystarczająco dokładnie opisać funkcjami liniowymi. Sformułowane zależności wykazują wyraźnie, iż oprócz oczywistego wpływu stosunku w/c, na wytrzymałość na ściskanie betonu ma także znaczny wpływ zawartość zaczynu cementowego. Im jest ona większa, tym wytrzymałość betonu jest mniejsza. Porównanie standaryzowanych współczynników regresji V_z_{beta} wykazuje, że wpływ ten ma największe znaczenie w przypadku betonów o większym w/c (0.50 i 0.60), wykonanych z kruszywa żwirowego. Wpływ ten okazał się większy ($V_z_{\text{beta}} = -0.69$) od wpływu w/c ($w/c_{\text{beta}} = -0.49$). Wyjaśnić to można po pierwsze tym, że przy dużym w/c jest największa różnica pomiędzy wytrzymałością stwardniałego zaczynu cementowego a wytrzymałością kruszywa, a po drugie, względne zróżnicowanie wytrzymałości zaczynów o dużych w/c = 0.50 i 0.60 jest niewielkie. To małe zróżnicowanie wytrzymałości wynika z tego, że wprawdzie porowatość zaczynu jest quasyliniowo zależna od w/c (2, 10), lecz wytrzymałość od porowatości zależy w sposób nieliniowy (11). W przypadku betonów o małym w/c (0.30 i 0.40) wytrzymałość stwardniałego zaczynu jest bliższa wytrzymałości kruszywa, a ponadto, z podobnych powodów jak wymienione wyżej, zróżnicowanie wytrzymałości zaczynów jest większe. Stąd wpływ obydwu rozpatrywanych czynników (w/c i V_z), okazał się podobny.

The correlation degree between compressive strength and analyzed changing parameters of concrete composition is high in each presented case ($R^2 = 0.72$ to 0.90). Thus it was accepted that these relationships can be described precisely enough by linear functions. Formulated relationships clearly indicate that, besides obvious influence of w/c ratio, the cement paste content has also the significant influence on the compressive strength of concrete. The higher the cement paste content the lower is the concrete strength. The comparison of the standardized coefficients of regression V_z_{beta} indicates that the influence is the most important in



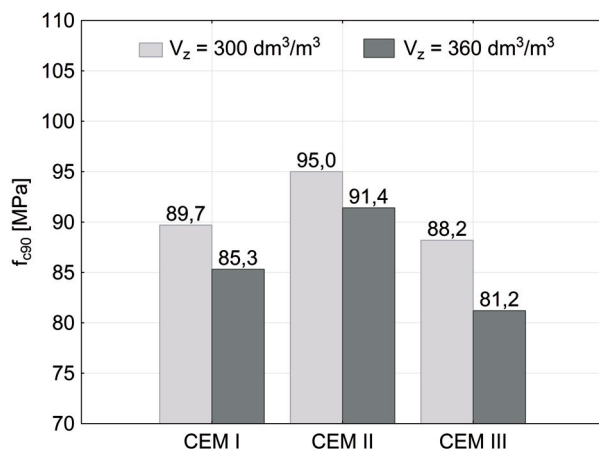
Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie f_{c90} od wskaźnika w/c i zawartości zaczynu V_z analizowana łącznie dla wszystkich betonów

Fig. 2. The relationship between compressive strength f_{c90} and w/c ratio and cement paste content V_z for all concretes

Łączna analiza wyników, w której nie uwzględnia się rodzaju stosowanego kruszywa grubego, wykazuje, że istotność wpływu wskaźnika w/c ($V_{z\beta} = -0.87$) dominuje nad istotnością wpływu zawartości zaczynu ($V_z = -0.37$) na wytrzymałość na ściskanie. Z tej uogólnionej zależności wynika, że bez względu na wielkość stosunku w/c, wzrost zawartości zaczynu w zakresie od 240 do 360 dm³/m³ powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu o około 15 MPa, czyli wzrost zawartości zaczynu o każde 20 dm³/m³ wiąże się ze spadkiem wytrzymałości o około 2.5 MPa przypadają na dm³/m³. Odnosząc to zmniejszenie do wytrzymałości betonów zawierających zaczyn w ilości minimalnej spośród rozpatrywanych (240 dm³/m³) można stwierdzić, że w przypadku betonów o w/c = 0.30; 0.40; 0.50 i 0.60 względny spadek wytrzymałości spowodowany zwiększeniem zawartości zaczynu do 360 dm³/m³ wynosi odpowiednio około 15, 18, 21 i 26%. Wyniki te potwierdzają opinię sprzed kilku dekad wyrażoną między innymi przez Kuczyńskiego (6), iż wpływ zawartości zaczynu jest większy w przypadku betonów o niższej wytrzymałości (o większym w/c), niż w przypadku betonów o wytrzymałości wyższej.

Dodać należy, że problem zawartości zaczynu w betonie ma także i inne aspekty. Betony z większą zawartością zaczynu, zwłaszcza w przypadku dużego w/c, wykazują większy skurcz i większą nasiąkliwość (9). Występuje także aspekt ekonomiczny. Wzrostowi zawartości zaczynu o 120 dm³/m³ w analizowanych granicach od 240 do 360 kg/m³ towarzyszy bowiem bardzo duży wzrost zużycia cementu. W przypadku rozpatrywanych w badaniach skrajnych wartości w/c = 0.30 i 0.60 wynosi on odpowiednio 190 i 130 kg/m³ betonu.

Wpływ zawartości zaczynu na wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem pyłu krzemionkowego pokazano na rysunku 3. Wpływ ten, aczkolwiek ilościowo niewielki i mieszczący się w zakresie błędów pomiaru, daje się jednak zauważyć.



Rys. 3. Zależność dziewięćdziesięciodniowej wytrzymałości na ściskanie betonów od zawartości zaczynu (betony o w/s = 0.30 z dodatkiem pyłu krzemionkowego)

Fig. 3. The relationship between compressive strength of concretes after 90 days of hardening and cement paste content (concretes with w/s = 0.30 and silica fume addition)

the case of concretes with higher w/c ratios (0.50 and 0.60), made of gravel aggregate. It is more important ($V_{z\beta} = -0.69$) than the influence of w/c ratio ($w/c_{\beta} = -0.49$). It can be explained by very low strength of hardened cement paste with high w/c ratio thus the difference comparing to the aggregate strength is high. On the other hand, the relative diversity of cement paste strength with high w/c ratios 0.50 and 0.60 is low. This low strength diversity results of quasi-linearly dependence of w/c ratio (2, 12), however, the strength dependence of porosity is nonlinear (13). In the case of concretes with low w/c ratios (0.30 and 0.40) the strength of hardened cement paste is closer to the aggregate strength, moreover, from the same reasons as mentioned above, the strength diversity of cement paste is higher. Hence, the influence of both analyzed parameters (w/c and V_z) was found to be of similar significance.

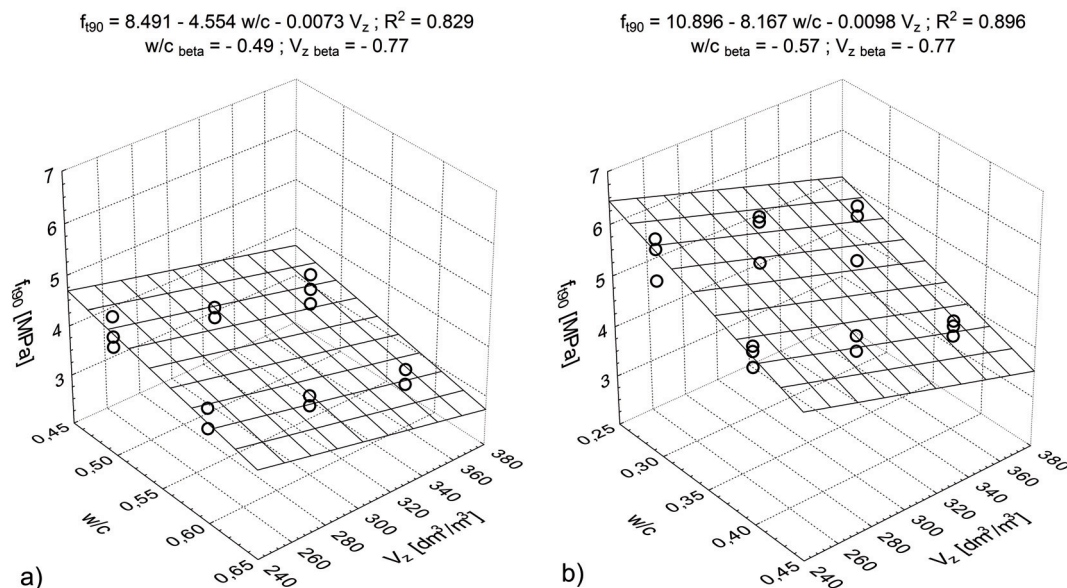
Combined analysis of the results, in which the type of used coarse aggregate is not included, indicates that the significance of the w/c ratio effect ($w/c_{\beta} = -0.87$) dominates over the significance of the cement paste content ($V_{z\beta} = -0.37$) on the compressive strength. The generalized relationship shows that regardless of the w/c ratio, the increase of the cement paste content in the range 240 - 360 dm³/m³ causes the decrease of concrete strength, of around 15 MPa, which is around 2.5 MPa for the cement paste content increase of each 20 dm³/m³. Referring this decrease to the strength of concretes containing cement paste in minimal from used quantity (240 dm³/m³) it can be stated that in the case of concretes with w/c ratios 0.30, 0.40, 0.50 and 0.60 the relative strength decrease caused by increasing of cement paste content up to 360 dm³/m³ is equal to around 15, 18, 21 and 26% respectively. These results confirm the opinion from several decades ago presented among others in the Kuczynski book (6), that the influence of cement paste content is higher in the case of concretes with lower strength (higher w/c ratio) than in the case of concretes with higher strength.

It is worth to mention that the problem of cement paste content in concrete has also other aspects. Concretes with higher cement paste content, especially with high w/c ratios, have higher shrinkage and higher absorption (9). There is also an economical aspect. The increase of cement paste content by 120 dm³/m³ in analyzed ranges 240 - 360 kg/m³ is connected with significant increase of cement use. In the case of applied in the investigation extreme w/c ratios 0.30 and 0.60 the cement use is 190 and 130 kg/m³ of concrete respectively.

The influence of cement paste content on the compressive strength of concretes with silica fume addition is presented in fig. 3. This influence, although quantitatively not significant and being in the range of the measurement error, can be however noticed.

4.3. Influence of cement paste content on splitting tensile strength

The results analysis was performed similarly like in the case of the compressive strength. The results are presented in Figs. 4 and 5.



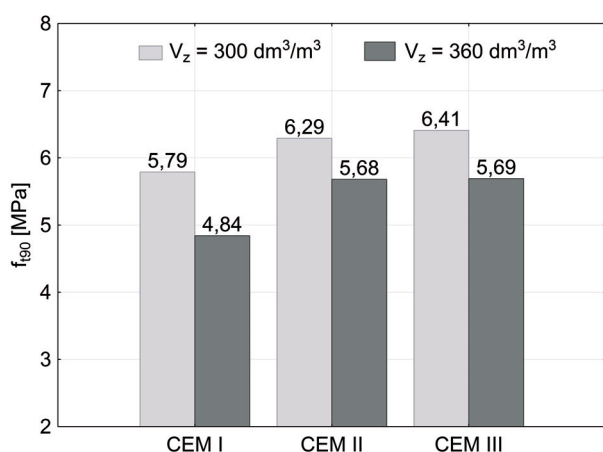
Rys. 4. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{190} od wskaźnika w/c i zawartości zaccynu V_z betonów z różnych cementów, analizowana oddzielnie w przypadku betonów wykonanych z kruszywa żwirowego (a) i bazaltowego (b)

Fig. 4. The relationship between splitting tensile strength f_{190} and w/c ratio and cement paste content V_z for concretes made of different cements, analyzed separately for concretes made of gravel aggregate (a) and basalt aggregate (b)

4.3. Wpływ zawartości zaccynu na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

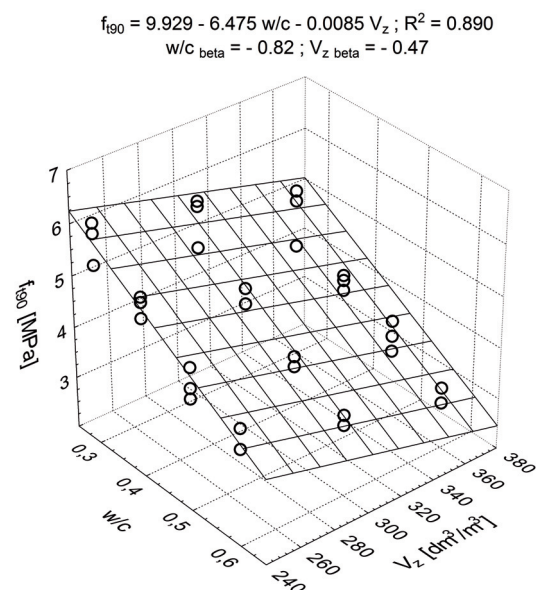
Analizę wyników przeprowadzono podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie. Jej wyniki pokazano na rysunkach 4 i 5.

Przedstawione na rysunkach 3 i 4 zależności wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od zawartości zaccynu i stosunku w/c są niemal identyczne jak wyznaczone dla wytrzymałości na ściskanie. Okazało się więc, że zawartość zaccynu ma podobny wpływ na wytrzymałość na rozciąganie, jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie. Ta analogia wynika z podobieństwa wskaźnika kruchości rozumianego jako stosunek wytrzymałości na



Rys. 6. Zależność dziewięćdziesięciodniowej wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów od zawartości zaccynu (betony o w/s = 0,30 z dodatkiem pyłu krzemionkowego)

Fig. 6. The relationship between splitting tensile strength of concretes after 90 days of hardening and cement paste content (concretes with w/s = 0.30 with silica fume addition)



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{190} od wskaźnika w/c i zawartości zaccynu V_z analizowana łącznie dla wszystkich badanych betonów

Fig. 5. The relationship between flexural tensile strength f_{190} and w/c ratio and cement paste content V_z analyzed for all concretes

Presented in Figs. 4 and 5 relationships between splitting tensile strength and cement paste content and w/c ratio are almost identical, like relationships found for compressive strength. The effect of cement paste content on splitting tensile strength is similar to the influence on compressive strength. Such similarity results from the brittleness index, defined as a quotient of splitting tensile strength to compressive strength, very similar for all analyzed concretes, their values being in a very narrow range 0.06-0.08. Brittleness of concrete is found to be practically independent from w/c ratio

rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie, który był w przypadku wszystkich analizowanych betonów bardzo zbliżony i zawierał się w wąskim przedziale od 0,06 do 0,08. Kruchość betonu okazała się praktycznie niezależna ani od stosunku w/c, ani od zawartości zaczynu w rozpatrywanych zakresach tych parametrów.

Na rysunku 6 pokazano wpływ zawartości zaczynu na wytrzymałość na rozciąganie betonów z dodatkiem pyłu krzemionkowego. Także i w tym przypadku można zauważyć, wprawdzie bardzo słabe i z technicznego punktu widzenia nieistotne, jednak dające się uchwycić pomiarowo zmniejszenie tej wytrzymałości wraz ze wzrostem zawartości zaczynu.

5. Wnioski

Przedstawione wyniki badań i ich analiza pozwalają na sformułowanie następujących, najważniejszych wniosków i spostrzeżeń.

- 1) Zawartość zaczynu w betonie ma znaczny wpływ na jego wytrzymałość. Wpływ ten, wraz z oddziaływaniem stosunku w/c opisać można wystarczająco dokładnie funkcją liniową.
- 2) W bezwzględnych wartościach wpływ ten jest niezależny od stosunku w/c i zaznacza się średnim spadkiem wytrzymałości na ściskanie o około 2.5 MPa przy wzroście zawartości zaczynu o kolejne 20 dm³/m³.
- 3) Wzrost zawartości zaczynu ma znacznie większy wpływ na względne zmniejszenie wytrzymałości betonów o większym stosunku w/c. Porównując wytrzymałość betonów o praktycznie skrajnych zawartościach zaczynu (240 i 360 dm³/m³), obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu o w/c = 0.60 wynosi około 25%, podczas gdy w przypadku w/c = 0.30 jedynie 15%.
- 4) Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu zależy od zawartości zaczynu i wskaźnika w/c w podobny sposób jak wytrzymałość na ściskanie.
- 5) Wyniki badań wykazują, że na kruchość betonu nie wpływa ani zawartość zaczynu w betonie, ani stosunek w/c.

Należy podkreślić, że wnioski te dotyczą wytrzymałości betonu po 90 dniach twardnienia. Można jednak sądzić, że zawartość zaczynu wywierać będzie podobny wpływ także na wytrzymałość dwudziestoosmiodniową. Ponieważ zakres badań obejmował szeroką gamę betonów o różnym składzie (rodzaj cementu, kruszywa grubego i stosunku w/c) sformułowanie wnioski mają w dużej mierze znaczenie uniwersalne.

W świetle przedstawionych wyników badań, uwzględnienie potrzeby minimalizacji zawartości zaczynu podczas projektowania składu współczesnego betonu konstrukcyjnego wydaje się w pełni uzasadnione. Oprócz wzrostu wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu, minimalizacja ta ma także wpływ na inne korzystne właściwości betonu jak na przykład mniejszy skurcz i mniejsza nasiąkliwość. Zaznaczyć należy równocześnie, że mieszanki bardziej ubogie w zaczyn cementowy mogą sprawiać więcej kłopotów technologicznych podczas układania i zagęszczania. Problemy te można jednak rozwiązać stosując odpowiednie domieszki chemiczne i efektywne metody zagęszczania.

and from cement paste content in the analyzed ranges of these parameters.

The influence of cement paste content on splitting tensile strength of concretes with silica fume addition is presented in fig. 6. It was found also in this case, indeed very weak and not significant from technical point of view, however, a measurable decrease of this strength with the increase of cement paste content.

5. Conclusions

Presented results and allow to draw the following most important conclusions and remarks:

- 1) The cement paste content in the concrete significantly influences on its basic strength properties. That influence together with the influence of w/c ratio values can be described precisely enough by linear function.
- 2) In absolute values that influence is found to be independent from w/c ratio values and shows around 2.5 MPa average compressive strength decrease as a result of cement paste content increase with every 20 dm³/m³.
- 3) The increase of cement paste content influences more significantly on relative strength decrease of concretes with higher w/c ratio. Comparing the strength of concretes with extreme cement paste contents (240 and 360 dm³/m³), the compressive strength decrease of concrete with w/c = 0.60 is around 25%, while in the case of w/c = 0.30 is only 15%.
- 4) Flexural tensile strength is dependent on cement paste content and w/c ratio in similar way like compressive strength.
- 5) The results indicate that neither cement paste content in the concrete nor w/c ratio influences on the brittleness of concrete.

It must be underlined that conclusions drawn above concern the strength after 90 days of hardening. However, it can be expected that cement paste content will also influence on 28 days strength in similar way. Because the investigation scope covered a wide range of concretes, diverse in respect of the composition (type of cement, coarse aggregate and w/c ratio), the conclusions largely have an universal character.

In terms of presented results, taking into account the necessity of minimization of cement paste content during design of contemporary structural concrete composition seems to be completely justifiable. Besides the increase of compressive and splitting tensile strength, that minimization also causes other more advantageous properties of concrete, lower shrinkage and lower absorption for instance. It also has to be pointed out that concrete mixes poorer in cement paste may cause more technological problems during the laying and compaction. However, these problems may be reduced by use of proper chemical admixtures and effective compaction methods.

The research presented in this paper was conducted within the framework of the N N506 072138 research project funded by the National Science Centre.

Przetawione w artykule badania zostały zrealizowane w ramach projektu badawczego N N506 072138, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Literatura / References

1. Neville A.M.: Właściwości betonu, wyd.V, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków, 2012.
2. Kurdowski W.: Chemia cementu betonu, Wydawnictwo Polski Cement i Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
3. Collepardi M.: The new concrete, Ed. Grafiche Tintoretto, Italy, 2006.
4. Aïtcin P-C.: Bétons haute performance, éd. Eyrolles, Paris, 2001.
5. Śliwiński J.: Efekt ściany – istota zjawiska i sposób jego uwzględniania w projekcie składu mieszanki betonowej, Cement Wapno Beton, **65**, 151-154. 1998.
6. Kuczyński W. i inni: Budownictwo betonowe, tom I cz.2 Technologia betonu, Arkady, Warszawa 1972.
7. de Larrard F.: Concrete mix proportioning. A scientific approach, F&FN SPON, London, 1999.
8. Hermida G.: Influence du volume de pâte et de la concentration en ciment sur la performance du béton : vers le développement d'un béton à contenu minimal en pâte, these de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
9. Tracz T., Śliwiński J.: Effect of cement paste content and w/c ratio on concrete water absorption, Cement Wapno Beton, **69**,131-137. 2012.
10. Tracz T., Śliwiński J.: Influence of cement type and water-cement ratio on open porosity and gas permeability of cement pates, UKIERI Concrete Congress on Innovations in concrete construction, Jalandhar, India, 2013, 461-470.
11. Odler I., Rossler M.: Investigations on the relationships between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes. II. Effect of pore structure and of degree of hydratation, Cement and Concrete Research, vol.15, 3, 1985, 401-410.