

Wpływ wielkości i kształtu kruszywa na wytrzymałość betonu na ściskanie i plastyczność

The effect of size and shape of aggregate on compressive strength and ductility of concrete

Hamid Reza Darvishvand¹, Seiyed Ali Haj Seiyed Taghia^{1*}, Masood Ebrahimi²

¹Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

²Engineering Technology Department, South Carolina State University, SC, USA

*Corresponding author: S.A. Haj Saiyed Taglia; e-mail: ali.taghia@qiau.ac.ir

Streszczenie

Zagadnienie wielkości i kształtu kruszywa w betonie dla osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości i plastyczności, jest jednym z ważniejszych zagadnień w budownictwie. Do zbadania tych właściwości wybrano dwa rodzaje kruszywa o czterech uziarnieniach. Pierwszym kruszywem był żwir o zaokrąglonych ziarnach zaś drugim grys o ziarnach ostrokrawędzistych. Maksymalne wymiary ziaren wynosiły dla obu kruszyw odpowiednio 9,5, 12,5, 19 i 25 mm. Dobrano zawartość cementu 250, 350, 450 i 550 kg/m³ oraz stosunek wody do cementu równy 0,4. W pierwszej kolejności wykonano badania wytrzymałości na ściskanie oraz odkształcalności próbek. Zgodnie z wynikami badań, wytrzymałość na ściskanie wzrastała wraz ze wzrostem zawartości cementu, co jest zgodne z oczekiwaniami. Beton z kruszywa o maksymalnej wielkości ziaren wynoszącej 12,5 mm ma największą wytrzymałość na ściskanie i plastyczność w porównaniu z innymi uziarnieniami i zostało wybrane jako optymalne, a betony z kruszywa ostrokrawędziste mają większą wytrzymałość na ściskanie i plastyczność w porównaniu z betonami z kruszyw o zaokrąglonych ziarnach.

Słowa kluczowe: zawartość cementu, kruszywo, naprężenie-odkształcenie, wytrzymałość na ściskanie, plastyczność

Summary

The issue of the size and shape of the aggregates in concrete is one of the most challenging subjects in the building industry, in order to reach maximum strength and ductility. To investigate this issue, two types of aggregate were selected. One was the river aggregate - gravel with rounded grains and the second was a crushed stone with sharp-edged grains, both with the maximum sizes of 9.5, 12.5, 19, and 25 mm respectively. The cement content was 250, 350, 450, and 550 kg/m³ and the water to cement ratio was equal to 0.4. At first, the compressive strength and stress-strain relationship were examined. According to the test results, the compressive strength increases with increasing cement content, as expected. The aggregate with the largest grain size of 12.5 mm gives the highest compressive strength and ductility compared to other grain sizes and it was selected as the optimal choice and finally, the sharp-edged aggregates have higher compressive strength and ductility in comparing to the rounded grain aggregates.

Keywords: cement content, aggregate, stress-strain, compressive strength, ductility

1. Wprowadzenie

1.1. Kruszywa

Beton jest mieszaniną spoiwa cementowego, kruszywa i wody. Kruszywo jest powszechnie uważane za obojętny wypełniacz, który stanowi 60 do 80 procent objętości i 70 do 85 procent masy betonu.

1. Introduction

1.1. Aggregates

Concrete is a mixture of cementitious material, aggregate, and water. Aggregate is commonly considered as inert filler, which accounts for 60 to 80 percent of the volume and 70 to 85 percent

Pomimo że kruszywo jest uważane za obojętny wypełniacz, jest ono niezbędnym składnikiem, który określa właściwości termiczne i sprężyste betonu oraz jego stabilność wymiarową. Kruszywo jest klasyfikowane w dwóch różnych uziarnieniach, grubym i drobnym. Kruszywo grube ma zazwyczaj uziarnienie większe od 4,75 mm - pozostaje na sicie nr 4, natomiast kruszywo drobne jest mniejsze od 4,75 mm i przechodzi przez sito nr 4. Wytrzymałość kruszywa na ściskanie jest ważnym czynnikiem przy doborze kruszywa. Przy określaniu wytrzymałości betonu zwykłego, większość kruszyw do betonu ma kilka razy większą wytrzymałość niż inne składniki betonu i dlatego nie jest to główny czynnik wpływający na wytrzymałość betonu zwykłego.

Wielkość ziaren kruszywa grubego wpływa na zapotrzebowanie zaczynu cementowego, do pokrywania jego powierzchni. Większe kruszywa mają mniejszą powierzchnię niż mniejsze, przy tej samej objętości. W związku z tym, zawartość zaczynu cementowego dostępnego do zapewnienia plastyczności, jest zwiększona dla betonu z grubym kruszywem.

Kształt kruszywa wpływa na urabialność betonu ze względu na różnice w powierzchni właściwej. Wymagana jest wystarczająca ilość zaczynu cementowego do pokrycia kruszywa, w celu zapewnienia odpowiedniej plastyczności betonu. Typowe kształty kruszyw pokazano na rys. 1. Spośród nich, kuliste, sześciennie i nieregularne kształty są dobre do stosowania w betonie, ponieważ mogą one korzystnie wpłynąć na poprawę wytrzymałości. Kruszywa płaskie, igielkowate i przyrmatyczne mają małą nośność i łatwo ulegają zniszczeniu. Ponadto stosunek powierzchni do objętości kruszywa kulistego jest najmniejszy (1-2).

Odnosnie do maksymalnego rozmiaru kruszywa, które zapewnia maksymalną wytrzymałość na ściskanie, Diamond (3) uwzględnił wymiary od 10 do 12 mm, Byfors i in. (4) w swoich badaniach podali wymiary od 13,2 do 26,5 mm na materiałach z RPA, a Steven i in. (5) oraz Al-Oraimi i in. (6) uwzględnili odpowiednio rozmiary od 9,5 do 12,5 mm i 10 mm.

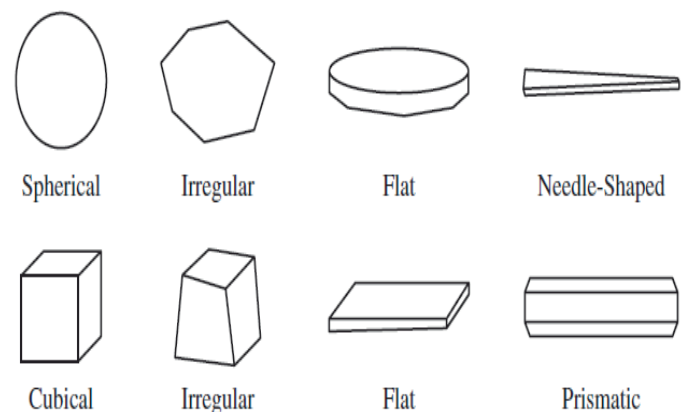
1.2. Zawartość cementu

Zawartość cementu wpływa na urabialność betonu w dwojaki sposób. Po pierwsze, dla danego wskaźnika w/c, im większa jest zawartość cementu, tym większa jest całkowita ilość wody w betonie, a tym samym poprawia się konsystencja mieszanki. Po drugie, zaczyn cementowy pełni rolę powłoki, wypełnienia pustek i pokrycia ziaren kruszywa. W normalnym betonie, zbyt mała zawartość cementu powoduje, że mieszanka jest trudna w obróbce, ma niską konsystencję, a w konsekwencji źle nadaje się do prac wykończeniowych. Duża zawartość cementu oznacza większą dostępność czynnika smarowego, poprawiającego konsystencję. W końcu, wraz ze wzrostem zawartości cementu przy małym wskaźniku w/c, można poprawić zarówno konsystencję, jak i spoistość. Przy tym samym wskaźniku w/c, im większa zawartość cementu, tym lepszą urabialność można osiągnąć. Zwiększenie rozdrobnienia cementu powoduje zmniejszenie płynności betonu przy danym wskaźniku w/c, ale zwiększy spoistość. Betony zawierające bardzo duży

of the mass of concrete. Although aggregate is considered as inert filler, it is a necessary component that defines the concrete thermal and elastic properties and dimensional stability. Aggregate is classified into two different types, coarse and fine. Coarse aggregate is usually greater than 4.75 mm – retained on a No. 4 sieve, while fine aggregate is smaller than 4.75 mm – passing the No. 4 sieve. The compressive aggregate strength is an important factor in the selection of aggregate. When determining the strength of normal concrete, most concrete aggregates are several times stronger than the other components in concrete and therefore are not the main factor determining the strength of normal concrete.

The particle size of coarse aggregates is influencing the paste requirement for coating, through the surface area. The larger aggregates have a smaller surface area than smaller aggregates, with the same volume. Subsequently, the content of the paste available for lubrication is increased for concrete with large aggregates.

The aggregate shape affects the workability of concrete due to the differences in surface area. A sufficient amount of paste is required to coat the aggregate, to provide lubrication. The typical shapes of aggregates are shown in Fig. 1. Among these, spherical, cubical, and irregular shapes are good for application in concrete because they can benefit to improve strength. Flat, needle-shaped, and prismatic aggregates are weak in load-carrying capacity and can easily crash. Besides, the surface to volume ratio of a spherical aggregate is the smallest (1-2).



Rys. 1. Różne podstawowe kształty kruszyw

Fig. 1. Different basic shapes of aggregates

Regarding the aggregate maximum size which gives the maximum compressive strength, Diamond (3) has considered the dimensions between 10 to 12 mm, Byfors et al (4), in their research reported the dimensions of between 13.2 to 26.5 mm on materials of South Africa, and Steven et al (5) and Al-Oraimi et al (6) considered the sizes of 9.5 to 12.5 mm and 10 mm, respectively.

1.2. Cement content

Cement content influences the workability of concrete in two ways. First, for a given w/c ratio, the larger the cement content, the higher the total water amount in concrete; hence, the consistency of concrete will be enhanced. Second, cement paste plays the roles

udział cementu, lub bardzo drobny cement, wykazują doskonałą spoistość, ale wykazują tendencję do zwiększonej lepkości (1-2).

Zgodnie z wynikami badań Heba (7) i Shenbaga i in. (8), zwiększając zawartość cementu, zwiększa się również wytrzymałość na ściskanie.

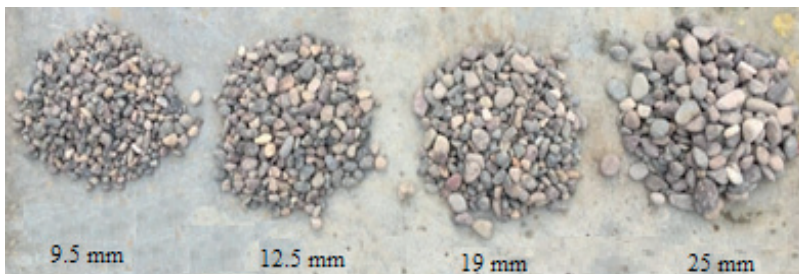
Aby dokładniej zbadać powyższe zagadnienie, w niniejszej pracy uwzględniono wpływ kruszywa zaokrąglonego i ostrokrawędzistego oraz maksymalnego wymiaru kruszywa grubego o czterech różnych rozmiarach, przy zmiennej zawartości cementu. Głównym celem niniejszej pracy jest określenie wpływu tych parametrów na wytrzymałość na ściskanie i plastyczność betonu.

2. Program doświadczeń

2.1. Materiały

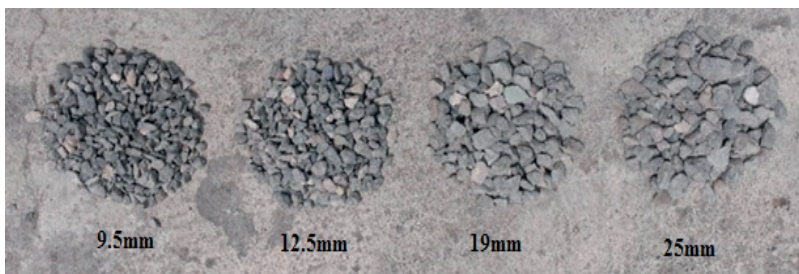
Cement stosowany do przygotowania próbek był zwykłym cementem portlandzkim typu II wg ASTM C150 (9), a użyte kruszywa żwirowe i piaskowe były zgodne z ASTM C33 (10). Wielkość ziaren piasku leżała w zakresie od 0 do 4,75 mm i miał on gęstość pozorną w stanie suchym 2650 kg/m³, a jego dwudziestoczterogodzinna absorpcja wody wynosiła 1,5%. Ponadto zarówno dla żwiru jak i gysu zastosowano cztery różne uziarnienia – odpowiednio o maksymalnych wymiarach ziaren wynoszących 9,5, 12,5, 19 i 25 mm, jak pokazano na rysunkach 2 i 3.

Zastosowano superplastyfikator typu P10-3R zgodny z normą ASTM C494 (11).



Rys. 2. Maksymalny wymiar odsianego zaokrąglonego kruszywa, o wymiarach od lewej do prawej strony 9,5, 12,5 i 25 mm

Fig. 2. Maximum size of sieved rounded aggregate respectively from left to right having sizes of 9.5, 12.5, 19, and 25 mm



Rys. 3. Maksymalny wymiar odsianego ostrokrawędzistego kruszywa, o wymiarach od lewej do prawej strony 9,5, 12,5 i 25 mm

Fig. 3 Maximum size of sieved sharp-edged aggregate respectively from left to right having sizes of 9.5, 12.5, 19, and 25 mm

of coating, filling, and lubrication for aggregate particles, by itself. In normal concrete, considerably low cement content tends to produce a harsh mixture, with poor consistency and subsequently poor finish ability. High cement content implies that more lubricant is available for consistency improvement. Finally, with an increase of the cement content at a low w/c ratio, both consistency and cohesiveness can be improved. Under the same w/c ratio, the higher cement content, the better workability can be achieved. Increasing the fineness of the cement particles will decrease the fluidity of the concrete at a given w/c ratio, but will increase the cohesiveness. Concretes, containing a very high proportion of cement or very fine cement, show excellent cohesiveness but tend to be sticky (1-2).

According to the results of Heba (7) and Shenbaga et al (8), by increasing cement content, compressive strength will be increased too.

To investigate further the above-mentioned challenges, the effects of rounded and sharp aggregates and the maximum size of coarse aggregate with four different sizes and cement contents, are taken into consideration in this paper. The effect of those parameters on compressive strength and ductility is the main purpose of this study.

2. Experimental program

2.1. Material properties

The cement used in the samples was ordinary Portland cement type-II based on ASTM C150 (9) and the gravel and sand aggregates used were in accordance with ASTM C33 (10). The sand gradation was within the range of 0 to 4.75 mm. The apparent density in SSD state was 2650 kg/m³. Its 24-hour water absorption was 1.5%. Moreover, both types of coarse aggregate - rounded and sharp edged, were used in four different sizes with maximum diameters of 9.5, 12.5, 19, and 25 mm, as shown in Figs. 2 and 3. The used superplasticizer was of type P10-3R based on ASTM C494 (11).

2.2. Mix design and chart designation

In this study, a total of 32 mix designs were used. Mix proportions are presented in Table 1. The abbreviations are as follow:

C followed by 1-4 number: represents the cement content with values of 250, 350, 450, and 550 kg/m³, respectively

GN, GB followed by 1-4 number denote the rounded aggregates, sharp-edged aggregates, and the maximum size of the coarse aggregate which are equal to 9.5, 12.5, 19, and 25 mm, respectively.

2.3 Preparation and curing of specimens

Concrete samples were put into pre-prepared molds and kept at constant temperature and humidity for 24

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH

MIX PROPORTIONS OF INVESTIGATED CONCRETES

No.	Name Nazwa	Maximum aggregate grain size Maksymalna wielkość ziarna kruszywa, mm	Coarse aggregate Kruszywo grube, kg	Sand Piasek, kg	Cement, kg
1	C1GN1	9.5	1290	898	250
2	C1GN2	12.5	1290	898	250
3	C1GN3	19	1290	898	250
4	C1GN4	25	1290	898	250
5	C1GB1	9.5	1290	898	250
6	C1GB2	12.5	1290	898	250
7	C1GB3	19	1290	898	250
8	C1GB4	25	1290	898	250
9	C2GN1	9.5	1170	820	350
10	C2GN2	12.5	1170	820	350
11	C2GN3	19	1170	820	350
12	C2GN4	25	1170	820	350
13	C2GB1	9.5	1170	820	350
14	C2GB2	12.5	1170	820	350
15	C2GB3	19	1170	820	350
16	C2GB4	25	1170	820	350
17	C3GN1	9.5	1090	762	450
18	C3GN2	12.5	1090	762	450
19	C3GN3	19	1090	762	450
20	C3GN4	25	1090	762	450
21	C3GB1	9.5	1090	762	450
22	C3GB2	12.5	1090	762	450
23	C3GB3	19	1090	762	450
24	C3GB4	25	1090	762	450
25	C4GN1	9.5	947	663	550
26	C4GN2	12.5	947	663	550
27	C4GN3	19	947	663	550
28	C4GN4	25	947	663	550
29	C4GB1	9.5	947	663	550
30	C4GB2	12.5	947	663	550
31	C4GB3	19	947	663	550
32	C4GB4	25	947	663	550

2.2. Projekt mieszanki

W badaniach zastosowano łącznie 32 rodzaje mieszanki, których składy przedstawiono w tablicy 1. Skróty są następujące:

C, po którym następują liczby od 1 do 4: oznacza zawartość cementu o wartościach odpowiednio 250, 350, 450 i 550 kg/m³

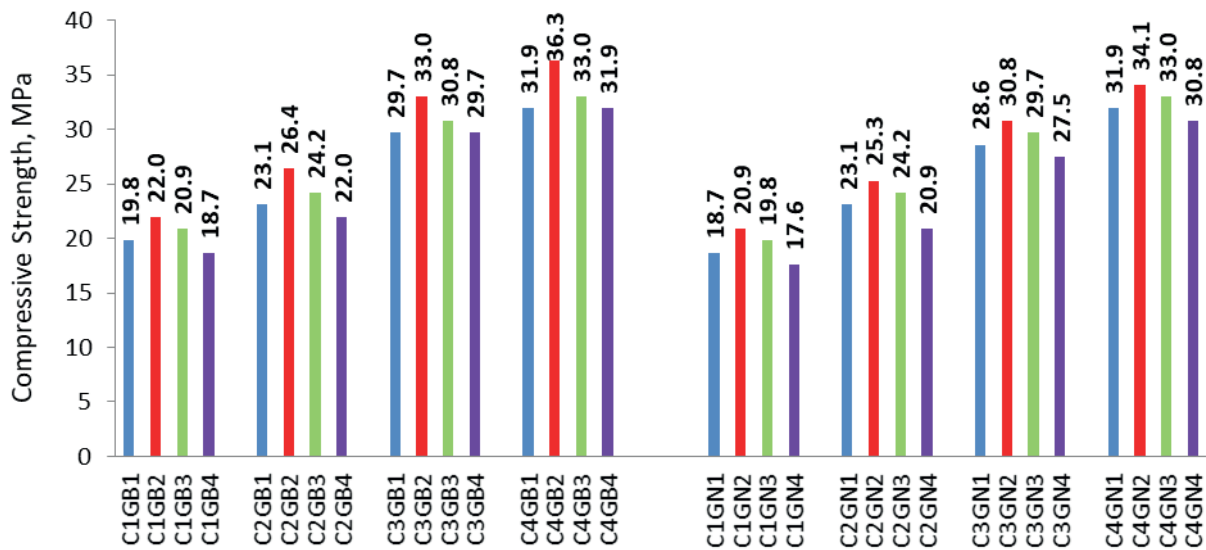
GN, GB, po których następują numery 1-4 oznaczają odpowiednio kruszywo o zaokrąglonych narożach, kruszywo o ostrych narożach oraz maksymalny wymiar kruszywa grubego, który wynosi odpowiednio 9,5, 12,5, 19 i 25 mm.

hours to harden. After 24 hours, the samples were removed from the molds and placed into the water pond with a temperature of $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ to be cured. The curing time for the samples was considered 28 days, to perform compressive strength and stress-strain tests.

3. Results and discussion

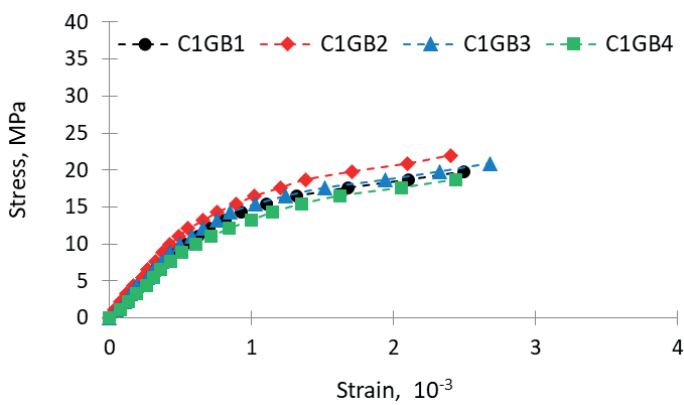
3.1. The effect of shape and size of coarse aggregate and cement content on compressive strength

The samples corresponding to each mix design were prepared for compressive strength testing based on standard ASTM C39 (12) in $\phi 15 \times 30$ cm cylindrical samples at the age of 28 days. Figure 4



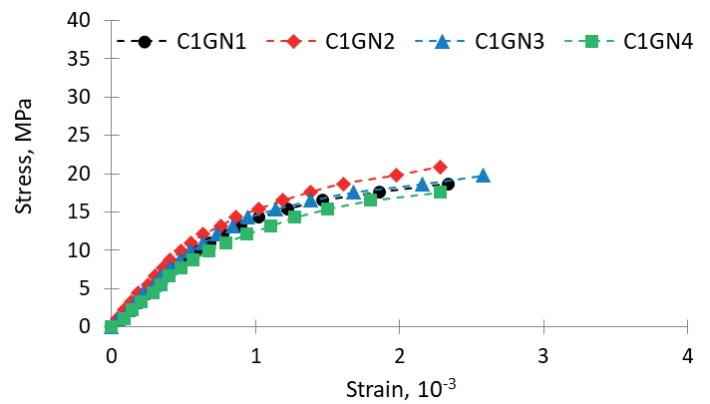
Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie próbek walcowych

Fig. 4. Compressive strength of cylindrical samples



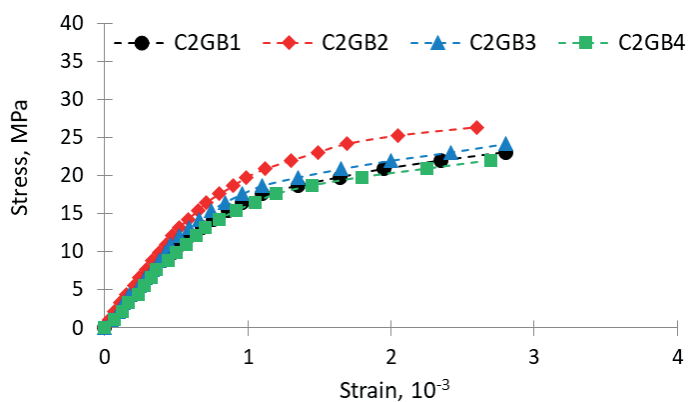
Rys. 5. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa ostrokrawędzistego i zawartości cementu 250 kg/m³

Fig. 5 Stress-strain diagrams for concrete made from sharp-edged aggregate and cement content 250 kg/m³



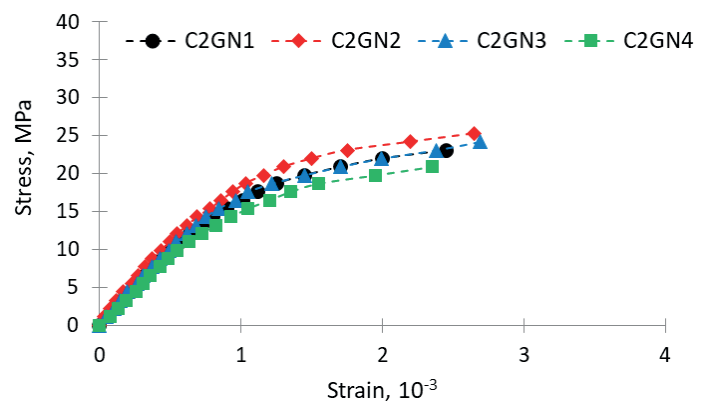
Rys. 6. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa o ziarach obłych i zawartości cementu 250 kg/m³

Fig. 6. Stress-strain diagrams for concrete made from rounded aggregate and cement content 250 kg/m³



Rys. 7. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa ostrokrawędzistego i zawartości cementu 350 kg/m³

Fig. 7 Stress-strain diagrams for sharp-edged aggregate and cement content 350 kg/m³



Rys. 8. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa o obłych ziarnach i zawartości cementu 350 kg/m³

Fig. 8 Stress-strain diagrams for concrete made from rounded corners aggregate and cement content 350 kg/m³

2.3. Przygotowanie próbek i ich dojrzewanie

Próbki betonu umieszczano w przygotowanych wcześniej formach i przechowywano w stałej temperaturze i wilgotności przez 24 godziny, w celu stwardnienia. Po 24 godzinach próbki wyjmowano z form i umieszczano w zbiorniku wodnym w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, w celu stwardnienia. Czas dojrzewania próbek wynosił 28 dni, po czym badano wytrzymałość na ściskanie i odkształcalność.

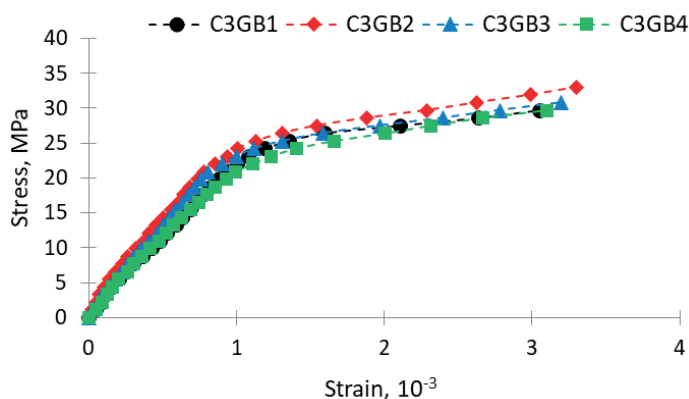
3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wpływ kształtu i wielkości kruszywa grubego oraz zawartości cementu na wytrzymałość na ściskanie

Próbki odpowiadające wszystkim składom mieszanek do badania wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach według normy ASTM C39 (12), przygotowano jako próbki walcowe o wymiarach $\phi 15 \times 30$ cm. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ kształtu i wielkości kruszywa grubego oraz zawartości cementu na wytrzymałość próbek na ściskanie.

Z rysunku 4 wynika, że wytrzymałość na ściskanie próbek wzrasta wraz ze wzrostem zawartości cementu. Ponadto, próbki przygotowane przy użyciu kruszywa o ziarnach ostrokrawędzistych mają większą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu z próbkami z kruszywem o zaokrąglonych ziarnach, ponieważ kruszywo ostrokrawędziste lepiej się zazębia niż kruszywo o narożach zaokrąglonych.

Dodatkowo, zwiększając maksymalny wymiar kruszywa do 12,5 mm, uzyskuje się maksymalny wzrost wytrzymałości na ściskanie, który następnie ulega zmniejszeniu. Próbki betonu zawierające kruszywo o maksymalnym wymiarze 9,5 mm mają mniejszą wytrzymałość, ponieważ mikrostruktura betonu jest nieprawidłowa i beton staje się plastyczny, a zaczyn cementowy staje się dominujący i w związku z tym zaczynają się pęknięcia biegnące od zaczynu cementowego. W przypadku maksymalnego



Rys. 9. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa ostrokrawędzistego i zawartości cementu 450 kg/m³

Fig. 9 Stress-strain diagrams for sharp-edged aggregate and cement content 450 kg/m³

demonstrates the effect of the shape and size of coarse aggregate and cement content on the compressive strength of the samples.

Figure 4 illustrates, that the compressive strength of the samples is increased by the increasing cement content.

Moreover, the samples prepared from sharp-edged aggregates were of greater compressive strength, in comparison with those made from rounded aggregates, because the sharp corners aggregates have a better interlocking than the rounded corners aggregates.

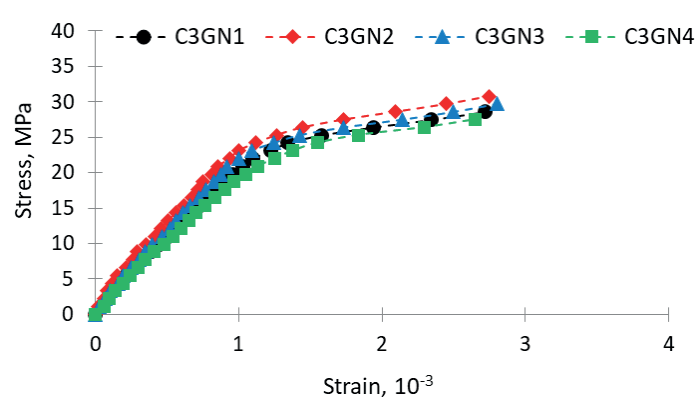
Additionally, by the increase in a maximum aggregate size up to 12.5 mm, the compressive strength reaches its maximum. It decreases for coarser aggregates. The concrete samples containing aggregates with a maximum size of 9.5 mm are of lower strength since the concrete structure is damaged and the concrete goes towards being plastic and the cement paste becomes dominant and accordingly, cracks start from the cement paste. In the case of the maximum aggregate size of 12.5 mm, the sample endures a greater strength due to better interlocking between the aggregates and the cement paste. On the other hand, the samples containing aggregates greater than 12.5 mm are cracked and crushed quicker under loading and the aggregates are sticking out.

3.2. The effect of shape and size of coarse aggregate and cement content on the ductility of concrete

The stress-strain testing was performed on the $\phi 15 \times 30$ cm cylindrical samples at the age of 28 days and results are shown in Figures 5 to 12.

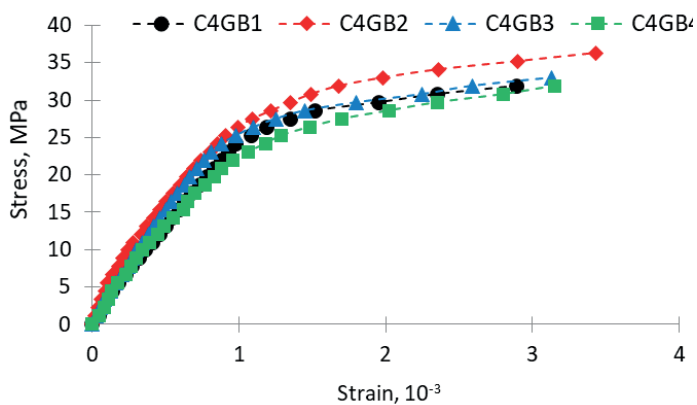
The ductility of testing samples [cylindrical $\phi 15 \times 30$ cm] was obtained from dividing ultimate strain over yielding strain, in accordance with ASCE41-13 (13). The yielding strain was calculated by making a bilinear stress-strain curve of the samples, by using MATLAB 2010 (14). This is presented in Figure 13 which shows a sample illustration of the bilinear stress-strain curve of mix design C4GN4.

The estimation of ductility of the samples is shown in Figure 14.



Rys. 10. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa o obłych ziarnach i zawartości cementu 450 kg/m³

Fig. 10 Stress-strain diagrams for concrete made from rounded aggregate and cement content 450 kg/m³



Rys. 11. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa ostrokrawędzistego i zawartości cementu 550 kg/m³

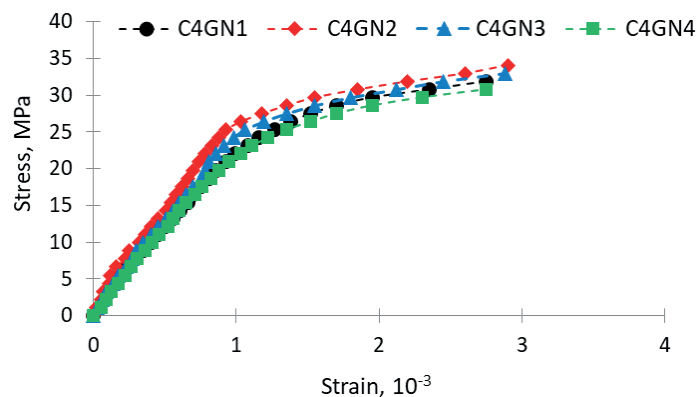
Fig. 11. Stress-strain diagrams for concrete made from sharp-edged aggregate and cement content 550 kg/m³

rozmiaru kruszywa 12,5 mm, próbka ma większą wytrzymałość ze względu na lepsze ząbienie się kruszywa z matrycą cementową. Z kolei próbki zawierające kruszywo większe od 12,5 mm szybciej pękają i kruszą się pod obciążeniem, a kruszywo wystaje z matrycy.

3.2. Wpływ kształtu i wielkości kruszywa grubego oraz zawartości cementu na plastyczność betonu

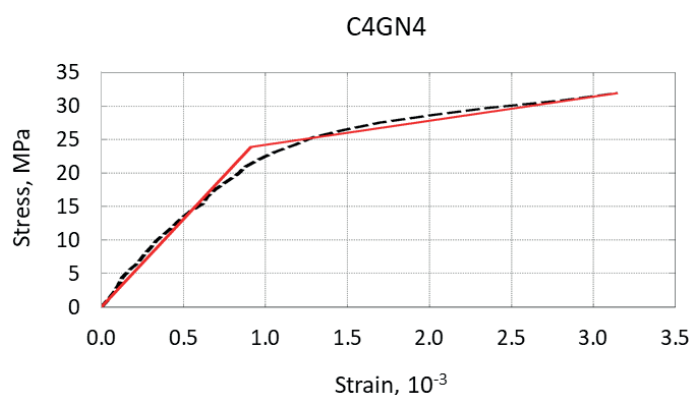
Badania naprężenie-odkształcenie przeprowadzono na próbkach cylindrycznych o wymiarach $\phi 15 \times 30$ cm po 28 dniach i pokazano na rysunkach od 5 do 12.

Plastyczność badanych próbek walcowych $\phi 15 \times 30$ cm uzyskuje się dzieląc odkształcenie końcowe przez odkształcenie graniczne, zgodnie z normą ASCE41-13 (13). Odkształcenie plastyczne obliczono poprzez wykonanie bilinearnej krzywej naprężenie-od-



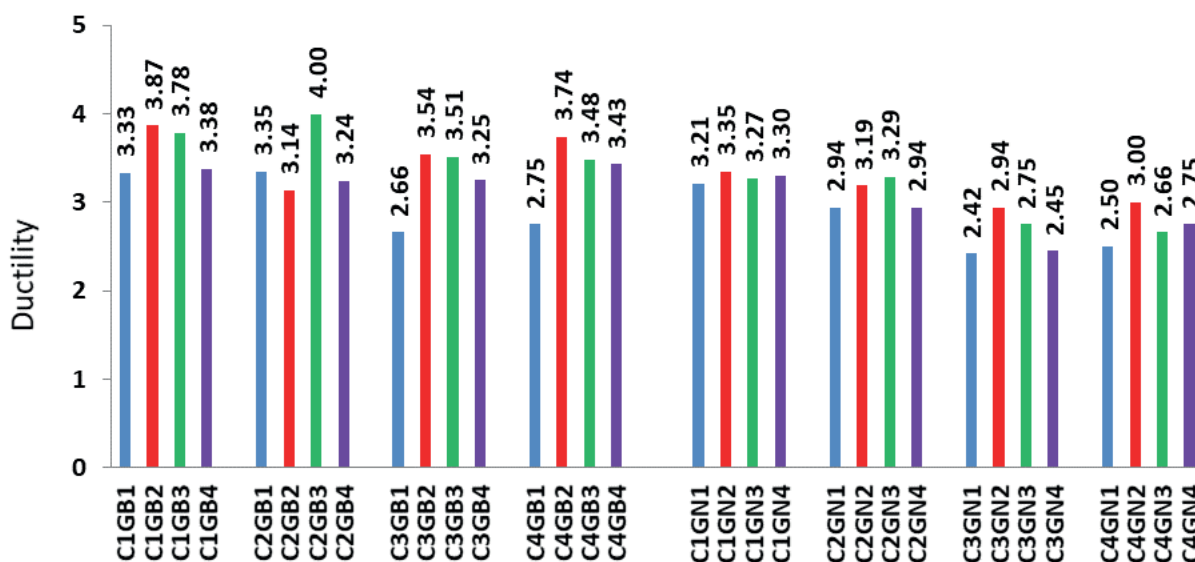
Rys. 12. Krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu z kruszywa o obłych ziarnach i zawartości cementu 550 kg/m³

Fig. 12. Stress-strain curves for concrete made from rounded aggregate and cement content of 550 kg/m³



Rys. 13. Ciągłość próbki betonu C4GN4 obliczona za pomocą MATLAB

Fig. 13. Ductility of concrete sample C4GN4 calculated using MATLAB



Rys. 14. Plastyczność badanych próbek betonu

Fig. 14 Ductility of testing samples

kształcenie próbek, przy użyciu programu MATLAB 2010 (14). Przedstawiono to na rysunku 13, na którym pokazano przykładową ilustrację krzywej bilinearnej naprężenie-odkształcenie dla mieszanki zaprojektowanej jako C4GN4.

Oszacowanie plastyczności próbek przedstawiono na rysunku 14.

Wynik z rysunku 14 wykazuje, że plastyczność próbek przygotowanych z kruszywa o ziarnach ostrokrawędzistych jest nieco większa niż próbek wykonanych z kruszywa o ziarnach zaokrąglonych. Warto zaznaczyć, że granica wzrostu plastyczności w większości przypadków przebiega do maksymalnego wymiaru kruszywa 12,5 mm, a powyżej tego wymiaru zaczyna się zmniejszać.

4. Wnioski

1. Zwiększenie zawartości cementu ma znaczny wpływ na poprawę wytrzymałości próbek na ściskanie.
2. Stwierdzono, że kruszywa o ziarnach ostrokrawędzistych mają większą wytrzymałość na ściskanie i plastyczność, w porównaniu z kruszywami o ziarnach zaokrąglonych.
3. Plastyczność w większości przypadków wzrasta w zależności od maksymalnego wymiaru kruszywa do granicy 12,5 mm i zaczyna się zmniejszać, jeśli rozmiar kruszywa wzrasta ponad tę granicę i to samo odnosi się do wytrzymałości na ściskanie próbek.
4. Niniejsze badania prowadzą do wniosku, że maksymalny rozmiar kruszywa równy 12,5 mm i kruszywa o ziarnach ostrokrawędzistych, są najlepsze dla zapewnienia większej wytrzymałości na ściskanie i plastyczności betonu.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować panu Borjali Darvishvand za współpracę przy redagowaniu artykułu oraz panu Mir Shahab Sayyafi za udostępnienie nam swoich urządzeń do badań mechanicznych w Pey Azma Beton Kouhestan Laboratory w Rasht, Iran.

Literatura / References

1. Z. Li, *Advanced Concrete Technology*. Willey, 2011
2. P.K. Metha, P.J.M. Monteiro, *Concrete microstructure properties and materials*. McGraw-Hill Education, 2006.
3. S. Diamond, The microstructure of cement paste in concrete. Proc. 8th IICCC Rio de Janeiro, 1, 122-47 (1986).
4. J. Byfors, C.M. Hansson, J. Tritthart, Pore solution expression as a method to determine influence of mineral additives on chloride binding. *Cem Concr. Res.* 16, 760-770 (1986).
5. S.H. Kosmatka, B. Kerkhof, W.C. Penarese, *Design and Control of Concrete Mixtures*, 14th ed. Portland Cement Association (2006).
6. S. Al-Oraimi, R. Taha, H. Hassan, The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. *Constr. Build. Mater.* 20, 499-503 (2006).

The results presented on Figure 14 indicates that the ductility of the samples prepared with sharp-edged aggregates is slightly higher than those made of rounded aggregates. It is worth mentioning that the borderline for increasing ductility in most cases goes up to the maximum size of aggregate of 12.5 mm and beyond that, it will starts to decline.

4. Conclusions

1. Adding higher content of cement has a significant effect on improving the compressive strength of the samples.
2. It was noticed that sharp-edged aggregates have a higher compressive strength and ductility, compared to the rounded aggregates.
3. Ductility, in most cases, rises with increasing maximum size of aggregate up to a limit of 12.5 mm and it will start to decrease if the size of aggregate increased over this limit and this is also true for the compressive strength.
4. This investigation can be concluded that the maximum size of aggregate equal to 12.5mm and sharp-edged aggregate are the best to provide higher compressive strength and ductility of concrete.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge Mr. Borjali Darvishvand for his collaboration in editing the article and Mr. Mir Shahab Sayyafi for providing us his mechanical testing facilities at Pey Azma Beton Kouhestan Laboratory.

7. M. Heba, Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. *Ain Shams Eng. J.* **2**, 79–86 (2011).
8. R.K. Shenbaga, G.H. Vasant, Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures. *Cem. Concr. Res.* **29**, 673–677 (1999).
9. ASTM C150-99a, “Standard specification for Portland cement”, American Society for Testing and Materials, (1999).
10. ASTM C33/C33M-18, “Standard Specification for Concrete Aggregates”. American Society for Testing and Materials, (2018).
11. ASTM C 494/C 494M – 99a, “Standard specification for chemical admixtures for concrete”, American Society for Testing and Materials, (1999).
12. ASTM C C39-86, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens” American Society for Testing and Materials, (1986).
13. ASCE 41-13, “Seismic evaluation and retrofit of existing buildings” American Society of Civil Engineers, (2014).
14. Matlab 2010b