

Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność doraźną ściskanych jednoosiowo betonów wysokowartościowych

The effect of coarse aggregate on the strains of high performance concrete in uniaxial compression

1. Wprowadzenie

W mikrostrukturze betonu występuje porowata, słaba strefa, na granicy stwardniałego zaczynu cementowego z ziarnami kruszywa. Strefa ta zwana przejściową ma szerokość około 20 μm w betonach wysokowartościowych (BWW) i 50 μm w betonach zwykłych [1]. Powstawanie tej strefy w świeżym betonie wynika z wyższego stosunku w/c matrycy cementowej wokół ziarn kruszywa [2]. Mikrostruktura strefy przejściowej różni się zasadniczo od mikrostruktury matrycy cementowej; obok dużej porowatości zawiera ona warstwę portlandytu, wokół ziaren kruszywa [3]. Znacznie mniejszy stosunek w/c w BWW, zwłaszcza nie przekraczający 0,38, powoduje brak strefy przejściowej w tych betonach [4]. Aitcin [5] podkreśla, że ta różnica łączy się z zasadniczą zmianą właściwości mechanicznych i trwałości BWW, w porównaniu z betonem zwykłym.

Natomiast mały stosunek w/c w BWW stwarza niebezpieczeństwo występowania skurczu autogenicznego, a związane z tym naprężenia mogą powodować powstawanie mikrorys w betonie [6]. Zależności naprężenie-odkształcenie (σ_c - ϵ_c) stwardniałego zaczynu cementowego i kruszywa są quasilineowe, natomiast zarówno w przypadku betonów zwykłych jak i BWW są nieliniowe, w całym zakresie naprężeń. W przypadku betonów zwykłych przypisuje się to występowaniu strefy przejściowej, a w BWW koncentracji naprężeń na powierzchni kruszywa. W betonie, podobnie jak w innych materiałach kompozytowych, różnice w modułach sprężystości matrycy cementowej i kruszywa przyczyniają się do koncentracji naprężeń w tej strefie, co wpływa na wytrzymałość i inne właściwości betonu. Propagacja mikrorys w betonie zwykłym rozpoczyna się w strefie przejściowej zaczyn-kruszywo i biegnie przez zaczyn, a w przypadku BWW rysy przechodzą przez ziarna kruszywa. Dlatego rola kruszywa grubego w BWW jest znacznie ważniejsza niż w betonie zwykłym, przede wszystkim ich udział w przenoszeniu obciążeń jest znacznie większy. Podstawową rolę odgrywa przyczepność zaczynu do kruszywa, która jest związana z szorstkością jego powierzchni, a także właściwościami sprężystymi i wytrzymałością kruszywa [8].

1. Introduction

In concrete microstructure the interfacial transition zone has a very important place. In high performance concrete (HPC) its thickness is about 20 μm and up to 50 μm in ordinary concrete [1]. The formation of this interface in fresh concrete is due to the higher w/c ratio of paste around the aggregate. [2]. Microstructure of interface zone somewhat differs from the one of the bulk cement matrix. The interface zone is more porous and there is more portlandite in it [3]. The much lower w/c ratio and relatively high amount of cement in HPC make the interface zone tighter and less porous, than that in ordinary concrete [4]. Aitcin [5] was stating that this essential microstructural difference results in a major difference in the mechanical properties and durability of HPC, in comparison to ordinary concrete.

The low w/c ratio, particularly below 0.38, causes the possibility of high autogenous shrinkage occurrence in HPC, which results in considerable local stresses and may produce microcracks in concrete [6]. The stress-strain (σ_c - ϵ_c) relationships of the hardened cement paste and aggregate are linear, but those of both ordinary concrete and HPC are nonlinear in the total range of stress. This is attributed to the interfacial transition zone in ordinary concrete and of stress concentration on aggregate interface with cement matrix in the case of HPC. In concrete, like in the other composite materials, the differences in elasticity moduli between the mortar matrix and aggregate results in stress concentration at the interfacial zone, which affects the strength and other properties of concrete. Microcracks propagation in ordinary concrete starts preferentially along cement paste-aggregate interfaces and continues in cement matrix (7). However, in the case of HPC the cracks are propagating through aggregate grains. Therefore, the role in transferring the stresses of coarse aggregate in HPC is much more significant than in the ordinary concrete. The load transfer mechanism depends on cement paste-aggregate bond strength related to the nature, mineral composition and roughness of aggregate, as well as, elastic and strength properties of cement paste (8).

Tschegg [9] stwierdził, że właściwa energia pęknięcia G_F strefy przejściowej pomiędzy matrycą cementową a piaskowcem lub wapieniem wynosiła od 6 do 18 N/m, pomimo że wartość G_F samej matrycy była równa 80 N/m. Oznacza to, że odporność na powstawanie rys w strefie przejściowej jest 6 razy mniejsza od odporności matrycy. W badaniach Wonga i in. [10] stwierdzono, że energia pęknięcia strefy kontaktowej granitu i matrycy cementowej wynosi tylko około 10% energii pęknięcia samej matrycy. Caliskan [11] wykazał, że kruszywo wapienne zapewnia uzyskanie strefy przejściowej o znacznie mniejszej grubości niż kruszywa granitowe, lub piaskowce. Stwierdzono także, że im większa jest wytrzymałość zaprawy w kompozycie, tym strefa przejściowa ma mniejszą grubość (1).

Przyczepność zaczynu do kruszywa zależy od jego mikrostruktury i jest związana z trzema głównymi mechanizmami: tarcia, powstawania wiązań chemicznych oraz zazębienia mechanicznego [12]. Szorstkość powierzchni kruszywa znacznie zwiększa energię pęknięcia strefy przejściowej w związku z mocniejszym zazębieniem mechanicznym kruszywa z matrycą cementową [7]. Ponadto zaletę szorstkiej powierzchni kruszywa stanowi jej wpływ na mikrostrukturę strefy przejściowej. Niektóre minerały w kruszywie sprzyjają powstawaniu fazy C-S-H w strefie przejściowej [13]. Do takich minerałów należy albit, który reaguje z wodorotlenkiem wapnia dając fazę C-S-H. Reakcja ta jest ułatwiona w związku z tworzeniem roztworów stałych albitu z anortytem, w których jony wapnia i sodu zastępują się w strukturze tych minerałów. Z tego względu wnikanie jonów wapnia do struktury albitu w warstwie powierzchniowej tego minerału w betonie jest ułatwione i ta warstwa ulega stopniowej przemianie w C-S-H. Jak wiadomo dużą zawartość albitu wykazuje bazalt i granit. Korzystny skład strefy przejściowej w betonie z kruszywem bazaltowym potwierdził także Starzyk [14].

W związku ze znacznymi różnicami we właściwościach naturalnych skał, ich przyczepność do matrycy cementowej jest różna, co ma duży wpływ na wytrzymałość betonu. Na przykład niezadawalające właściwości mechaniczne BWW z kruszywem granitowym w przeciwieństwie do betonów z kruszywem bazaltowym i węglanowym stwierdzono w dwóch pracach [15, 16].

W przepisach normowych odkształcalność betonu pod doraźnym obciążeniem ściskającym analizowana jest przede wszystkim na podstawie wartości modułu sprężystości E_c , odkształcenia granicznego ε_{c1} przy maksymalnym naprężeniu oraz współczynnika odkształcenia poprzecznego ν_c . Wartości normowe tych właściwości uzależniona się przede wszystkim od klasy wytrzymałości betonu na ściskanie. Jedynie przyjmując moduł sprężystości $E_{cm,PN}$ uwzględnia się wpływ rodzaju kruszywa. Zalecenie to wprowadzono dopiero w normie PN-EN 1992-1-1:2008. Wartości $E_{cm,PN}$ dla poszczególnych klas betonu odnoszą się do betonu z kwarcytowym kruszywem otoczkowym [17]. W przypadku stosowania bazaltu wartość należy zwiększyć o 20%, a przy kruszywach wapiennych i piaskowcowych zmniejszyć, odpowiednio o 10% i 30%. W wartościach odkształceń $\varepsilon_{c1m,PN}$ nie uwzględnia się wpływu rodzaju kruszywa grubego. W przypadku współczynnika odkształcenia poprzecznego (Poissona) norma PN-EN 1992-1-1:2008 zaleca

Tschegg (9) stated that specific fracture energy G_F of some sandstone-cement matrix and limestone-matrix interfacial transition zone varied between 6 and 18 N/m, although G_F value of the matrix was 80 N/m. This means that the crack resistance of aggregate-cement matrix interface is about six-times lower than that of cement matrix. In the Wong [10] study of granite-cement matrix interfacial transition zone, it was found that the fracture energy of this zone was only about 10% of fracture energy of the matrix itself. Caliskan [11] has shown that limestone aggregates provided noticeably thinner interfacial zone than that of granite and sandstone aggregates. It was also found that the higher the matrix strength in the composite, the thinner the interfacial transition zone.

Cement paste-aggregate bond depends on the surface of the aggregate and is connected with the three main mechanisms: physical friction, formation of chemical bond and mechanical interlocking [12]. The roughness of the aggregate surface significantly increases the fracture energy of the interface transition zone due to stronger mechanical interlocking of aggregate with cement matrix (7). Moreover, other advantages of high roughness of aggregate surface is its influence on the microstructure of the interface zone. Some minerals on aggregate surface have advantageous effect on C-S-H phase formation in transition zone (13). To these minerals belong albite, which reacts with calcium hydroxide and C-S-H is formed. This reaction is facilitated by the solid solutions of albite with anortite, in which calcium ions substitute sodium in the structure of these minerals. It is the cause that the calcium ions can enter to the surface layer of albite and C-S-H is formed in this layer. The high albite content have basalt and granite. The usefulness of basalt aggregate was also confirmed by Starzyk [14].

Due to significant differences in the properties of natural rocks, their bond to cement matrix is variable, which has a significant effect on concrete strength. For example the unsatisfactory mechanical properties of HPC from granite aggregate, contrary to the HPC of basalt and carbonate aggregate, were found in some studies (15, 16).

In standard regulations, the concrete strain in compressive loading is primarily analyzed on the basis of the modulus of elasticity E_c , strains ε_{c1} in the concrete at cracking f_c and lateral strain coefficient ν_c (Poisson's ratio). Standard values of these properties are dependent mainly on the concrete compressive strength class. Only using the $E_{cm,EN}$ modulus of elasticity the effect of aggregate type can be taken into consideration. This recommendation was introduced in the standard PN-EN 1992-1-1:2008. Standard $E_{cm,EN}$ values for each class of concrete refer to concrete with quartzite gravel. In the case of basalt, the value shall be increased by 20%, and for limestone and sandstone aggregates the values shall be diminished by 10% and 30%, respectively. As far as $\varepsilon_{c1m,PN}$ strain values are concerned the effect of coarse aggregate type is not considered. In the case of the lateral strain coefficient (Poisson's ratio), in the standard PN-EN 1992-1-1:2008 the use of a constant value $\nu_c = 0,20$ is recommended. However, according to the studies (15, 18) the coefficient ν_c is significantly dependent on the properties of coarse aggregate and generally is in the range from

przyjmowanie stałej wartości $v_c = 0,20$. Natomiast według badań [15, 18] wartość współczynnika v_c jest zależna od właściwości kruszywa grubego i na ogół mieści się w zakresie od 0,15 do 0,22. Większość prezentowanych w literaturze wyników badań odkształcalności dotyczy betonów zwykłych, natomiast rzadko spotyka się publikacje wyników badań BWW z zastosowaniem kilku rodzajów kruszyw. Z tego względu niniejszą pracę poświęcono wpływowi kruszywa grubego na odkształcalność BWW.

2. Materiały

Badaniami objęto 10 betonów, które podzielono na 2 grupy, o różnym w/c. Jedną grupę stanowiły betony wysokiej wytrzymałości (BWW), o w/c = 0,28, a drugą, badane porównawczo, betony zwykłe (BZ), o w/c = 0,70. Betony wykonywano z pięciu różnych kruszyw grubych o uziarnieniu 2÷16 mm, w związku z czym w każdej grupie uzyskano pięć betonów. Do badań wytypowano kruszywa masowo stosowane do produkcji BWW, oraz dla porównania dolomit i piaskowiec, a także jedno kruszywo naturalne (19, 20). Były to dwa kruszywa ze skał magmowych: grys bazaltowy z kopalni Gracze (B) i grys granitowy z Granicznej (G) oraz trzy kruszywa ze skał osadowych: grys dolomitowy z Laskowej (D) i grys kwarcytowy z Wiśniówki (K), a także naturalne kruszywo otoczkowe z Suwałk (O). Jako kruszywo drobne stosowano piasek naturalny płukany 0÷2 mm z Suwałk. Wszystkie betony wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R oraz utrzymywano ten sam udział objętościowy kruszywa grubego. Punkt piaskowy stosu okruczego, wyrażony objętościowo był także stały i wynosił $37\pm 1\%$. W celu utrzymania zbliżonej konsystencji mieszanek betonowych, w betonie BWW zastosowano superplastyfikator polikarboksylanowy. Wskaźnik konsystencji mieszanek betonowych, oznaczony metodą stożka opadowego, wynosił 10 ± 3 cm, co według normy PN-EN 206-1:2003 Beton, odpowiada klasom konsystencji S2÷S3 [22]. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych, oznaczona metodą ciśnieniową, wynosiła $1,8\pm 0,1\%$. Skład mieszanek betonowych podano w tablicach 1 i 2.

Z każdego betonu wykonano 8 próbek walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, z których 5 przeznaczono do badania wytrzymałości na ściskanie, a 3 do badania odkształceń betonu. Próbkę badano po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych. Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONÓW BWW O w/c = 0,28 (PRZY UWZGLĘDNIENIU WODY Z SP), kg/m³ *

COMPOSITION OF HPC WITH w/c = 0.28 (INCLUDING WATER IN SP), kg/m³*

Składniki Components	Oznaczenie betonu/concrete designation (rodzaj kruszywa grubego)/coarse aggregate				
	B028-B bazalt/basalt	B028-G granit/granite	B028-D dolomit/dolomite	B028-K kwarcyt/quartzite	B028-O otoczek/gravel
Cement	479	479	479	479	479
Piasek / Sand	699	699	699	699	699
kruszywo grube / Coarse aggregate	1258	1151	1229	1160	1151
Woda / Water	128	128	128	128	128
Superplastyfikator / Superplasticizer	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5

*Uwaga: różnice w zawartości kruszywa grubego wynikają z różnej ich gęstości

*Remark: Differences in coarse aggregate content are linked with their different density

0,15 to 0,22. The majority of the test results of strain properties presented in literature is concerning the ordinary concretes, and papers concerning HPC test results from different types of aggregate are seldom. Therefore, the objective of this paper is to study the effect of coarse aggregate on HPC strain properties.

2. Materials

In the study ten concretes, divided into two groups depending on the w/c ratio, were produced. One group consisted of HPCs of w/c = 0.28, and the second group embraced ordinary concretes of w/c = 0.70. In each group, concretes were produced from five different coarse aggregates of nominal sizes 2÷16 mm. High quality aggregate was used for the tests, considering its practical use, availability and properties representative for a particular aggregate type (19, 20). Two crushed aggregates of igneous rocks were used: basalt from Gracze (B) and granite from Graniczna (G) as well as two crushed aggregates of sedimentary rocks: dolomite from Laskowa (D), quartzite from Wiśniówka (K) and natural gravel from Suwałki (O). Natural washed sand of 0÷2 mm from Suwałki was used as fine aggregate. Ordinary Portland cement CEM I 42,5R was used in all concretes. In each group of concrete, the same volume of coarse aggregate was applied. Constant sand content in aggregate composition, expressed by volume, was $37\pm 1\%$. In order to maintain a similar consistency of HPC mixes, a polycarboxylate superplasticizer was applied. The consistency of concrete mixes, tested as slump was 10 ± 3 cm. It corresponds to consistency classes of S2÷S3. Air content in concrete mixes, determined applying pressure method was $1,8\pm 0,1\%$. Composition of concrete mixes is given in table 1 and 2.

From each type of concrete mix, 8 cylindrical specimens 150 mm in diameter and 300 mm in height, from 5 were used for compressive strength testing and 3 for strain testing. Specimens were tested after 28 days of curing in laboratory conditions. Upper surfaces of the specimens were polished to make the basis smooth and parallel. While determining strain properties of concrete (modulus of elasticity, Poisson's ratio, stress-strain relationship) strain gauges were used to measure the strains. In measurements of E_c and v_c values, the range from 0.5 MPa to $0.4f_{cm}$ was considered according to the PN-EN 1992-1-1:2008. Tests were carried out in the Labo-

nych. Górne powierzchnie próbek oszlifowano, uzyskując gładkość i równoległość podstaw. Przy określaniu modułu sprężystości, współczynnika Poissona i zależność naprężenie-odkształcenie do pomiaru odkształceń stosowano tensometry elektrooporowe. W pomiarach wielkości E_c i ν_c przyjęto zakres od 0,5 MPa do $0,4f_{cm}$, według PN-EN 1992-1-1:200. Badania przeprowadzono w Laboratorium Budownictwa Politechniki Lubelskiej, za pomocą maszyny wytrzymałościowej ADVANTEST 9, sterowanej komputerowo.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANEK BETONÓW BZ O w/c = 0,70, W kg/m³ *

COMPOSITION OF ORDINARY CONCRETES WITH w/c = 0.70*

Składniki Components	Oznaczenie betonu/concrete designation (rodzaj kruszywa grubego)/coarse aggregate				
	B070-B (bazalt)	B070-G (granit)	B070-D (dolomit)	B070-K (kwarcyt)	B070-O (otoczak)
Cement	260	260	260	260	260
Piasek / Sand	697	697	697	697	697
Kruszywo grube / Coarse aggregate	1334	1221	1303	1230	1221
Woda / Water	182	182	182	182	182

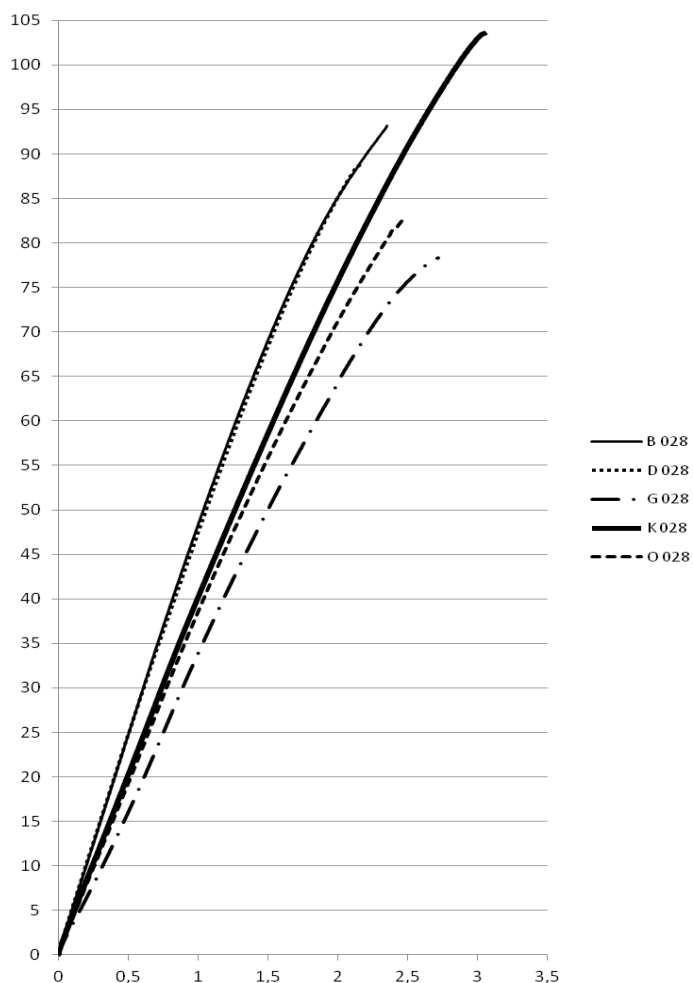
*Uwaga: jak pod tablicą 1

*Remark: as under table 1

3. Wyniki badań

3.1. Odkształcenia pod obciążeniem doraźnym

Najlepszą oceną wpływu kruszywa na odkształcalność betonu, zarówno BWW jak i zwykłego, są krzywe naprężenie-odkształ-



Rys. 1. Zależności $\sigma_c-\epsilon_c$ przy doraźnym, jednoosiowym ściskaniu BWW [w/c = 0,28] z różnych kruszyw. Na osi rzędnych naprężenia w MPa, a na osi odciętych odkształcenia w %

Fig. 1. Stress – strain curves of HPC [w/c = 0.28] from different aggregates tested in compression; on ordinate axis :MPa, on abscissa: %

ratory of Building Engineering at Lublin University of Technology and they were performed in a computer controlled testing machine ADVANTEST 9 (this ensures, inter alia, maintaining a constant increase in stress and appropriate frequency of readings).

3. Test results

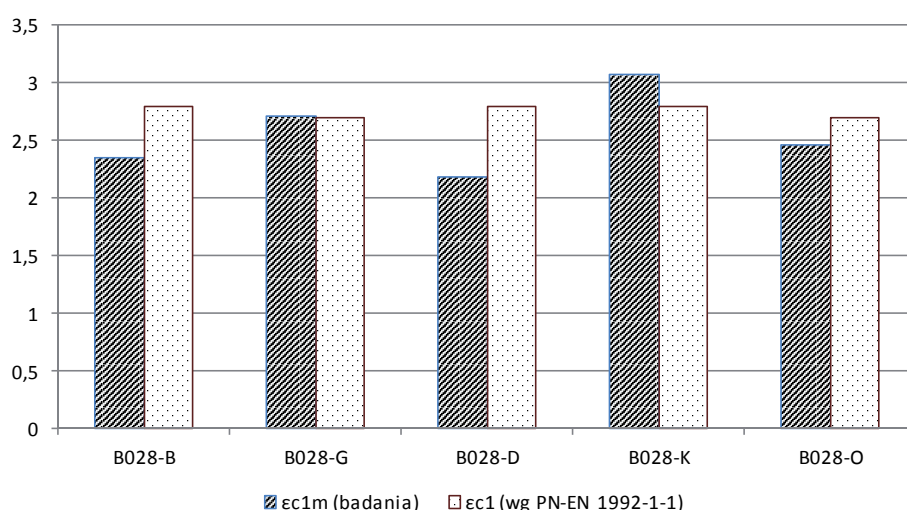
3.1. Strains in uniaxial compression

The best method of aggregate effect on strain properties of HPC and ordinary concrete examination are stress-strain $\sigma_c-\epsilon_c$ curves (Figs. 1 and 2). From the $\sigma_c-\epsilon_c$ relationships it has been found that the highest strain – defined as an increase in strains at the same range of stress, and the lowest modulus of elasticity are those of concrete with granite aggregate. This relation concerns both HPC and ordinary concrete. Concretes of quartzite and gravel showed nearly the same increase in strains. The best elastic properties had HPCs and ordinary concretes from dolomite and basalt aggregates. Thus, the effect of aggregate on strains of concrete with w/c ratio equal to 0.28 and 0.70 is practically the same. This proves a very high effect on strain of the aggregate type. Additionally, nearly linear stress-strain relationship of HPC was observed as well (Fig. 1). This is most likely due to the quite different interface zone and higher strength of cement matrix, similar to the strength of aggregate. It causes higher resistance of HPC on crack formation and much higher than of ordinary concrete level of strain at cracking. However, the loss of the proportionality of strains increase of ordinary concrete is occurring at stress lower than 50% of the strength at cracking (Fig. 2). It proves the high stress concentration caused by different mechanical properties of hardened cement paste and aggregate, as well as accelerated propagation of cracks in the weak interfacial transition zone. The highest strains at cracking on the stress-strain curves (Figs. 1 and 2) are in typical for the concretes from quartzite and granite aggregates. The highest strain of HPC of quartzite aggregate, linked with high strength is untypical.

Compression strains ϵ_{c1m} of the HPCs from basalt, dolomite and gravel aggregates at cracking stress f_c were lower by 16, 22 and 8%, respectively than standard values (Fig. 3). However, the only

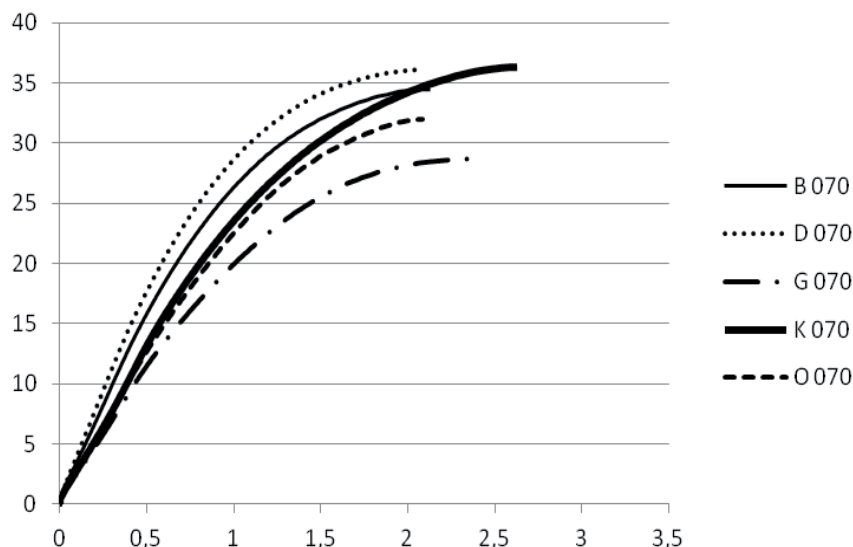
cenie $\sigma_c - \varepsilon_c$ (rysunki 1 i 2). Krzywe $\sigma_c - \varepsilon_c$ uzyskane w badaniach wykazują, że największy moduł sprężystości wykazują betony z kruszywami dolomitowym i bazaltowym, największą odkształcalność, rozumianą jako stosunek przyrostu odkształceń do wywołującego go przyrostu naprężeń, a zatem i najmniejszy moduł sprężystości, wykazują próbki z kruszywa granitowego i to zarówno w przypadku BWW jak i betonu zwykłego. Średni i prawie taki sam przyrost odkształceń osiągnęły betony z kruszywem kwarcytowym i otoczkowym. Ponadto na podkreślenie zasługuje prawie prostoliniowa zależność $\sigma - \varepsilon$ w przypadku betonów BWW (rysunek 1). Jest to wynikiem zbliżenia właściwości mechanicznych stwardniałego zaczynu do właściwości materiału kruszywa oraz, wspomnianej już, większej wytrzymałości strefy przejściowej. Wszystko to powoduje większą odporność betonu na powstawanie rys oraz znacznie wyższy w porównaniu z betonem zwykłym poziom naprężeń krytycznych betonów BWW o $w/c = 0,28$; na poziomie, na którym wykres sigma-epsilon z liniowego przechodzi w krzywoliniowy (granica sprężystości) (5,7).

Natomiast w przypadku betonów zwykłych (rysunek 2) utrata proporcjonalności przyrostu odkształcenia do przyrostu naprężenia występuje przy naprężeniach mniejszych od 50% od wytrzymałości maksymalnej, co świadczy o występowaniu koncentracji naprężeń, spowodowanej dużym zróżnicowaniem właściwości mechanicznych stwardniałego zaczynu i kamiennego materiału kruszywa oraz łatwiejszym powstawaniu rys w słabej strefie przejściowej. Z przebiegu krzywych naprężenie-odkształcenie (rysunki 1 i 2) wynika także, że największe odkształcenia graniczne wykazują betony z kruszywa kwarcytowego i granitowego. Największe odkształcenie BWW z kruszywa kwarcytowego jest trudne do



Rys. 3. Odkształcenia graniczne przy maksymalnym naprężeniu betonów BWW oraz wymagania według PN-EN 1992-1-1:2008

Fig. 3. Strain at failure under maximum stress of HPC and requirement according to PN-EN 1992-1-1:2008



Rys. 2. Zależności $\sigma_c - \varepsilon_c$ przy doraźnym, jednoosiowym ściskaniu betonów zwykłych [$w/c = 0,70$] z różnych kruszyw. Na osi rzędnych naprężenia w MPa, a na osi odciętych odkształcenia w %, (21)

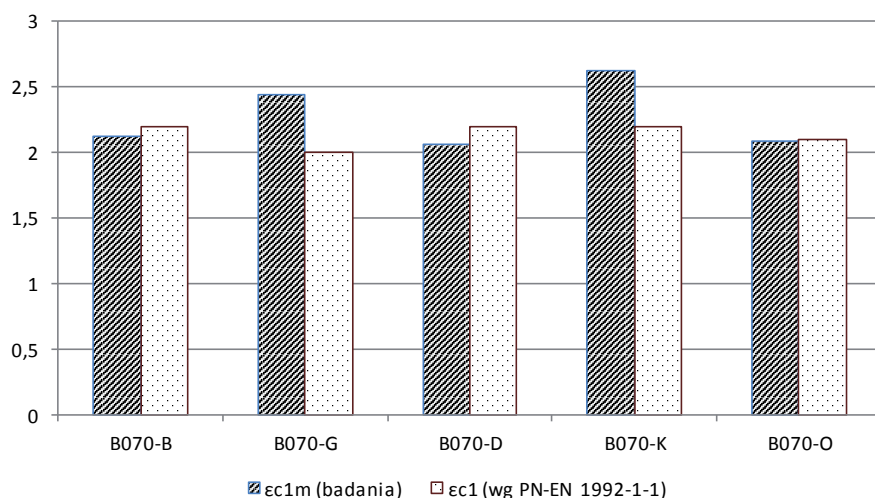
Fig.2. Stress – strain curves of ordinary concretes [$w/c = 0.70$] from different aggregates tested in compression; on ordinate axis :MPa, on abscissa: %, (21)

strain ε_{c1m} of the HPC of quartzite aggregate at peak stress was higher than the standard value. Almost the same relations of the strains ε_{c1} resulted from the tests of the group of ordinary concretes. The test results of strain ε_{c1m} of the ordinary concretes at the cracking stress, in comparison with the strains ε_{c1} recommended by the standard, were lower by approximately 5% in the case of concrete from basalt and dolomite aggregates and higher by about 20% in the case of concrete from granite and quartzite aggregates (Fig. 4).

3.2. Modulus of elasticity and Poisson's ratio

Tables 3 and 4 show the test results of average concrete compressive strength f_{cm} , compressive strains ε_{c1m} at cracking stress f_c , lateral strain coefficients ν_{cm} (Poisson's ratio) as well as modulus of elasticity E_{cm} . The tables also include details concerning strength classes of the concrete subjected to tests, determined on conformity criteria for cylindrical specimens, as well as standard values $\varepsilon_{c1,PN}$, $\nu_{c,PN}$, $E_{cm,PN}$ [PN-EN 1992-1-1:2008], corresponding to the classes of particular types of concretes.

Test results (Table 3) show a very high variation of strain and strength properties of HPC with $w/c = 0.28$ in dependence on aggregate type used. Surprisingly, concrete from granite aggregate has the low modulus of elasticity which is lower by about 15 GPa and 14 GPa than the modulus of concretes from dolomite and basalt aggregates, and also lower the standard value. The modulus of elasticity of HPC from dolomite aggregate is



Rys. 4. Odształcenia graniczne przy maksymalnym naprężeniu betonów zwykłych oraz wartości według PN-EN 1992-1-1:2008

Fig.4. Strain at failure under maximum stress of ordinary concretes and requirement according to PN-EN 1992-1-1:2008

wyjaśnienia bowiem wiąże się z dużą wytrzymałością, przekraczającą 100 MPa.

Betony wysokowartościowe z kruszywa bazaltowego, dolomitowego oraz otoczkowego osiągnęły odształcenia graniczne mniejsze od normowych, odpowiednio o 16, 22 i 8%. Natomiast jedynym betonem, który miał graniczne odształcenia większe względnie o 10%, niż podawane przez normę, był beton z kruszywa kwarcytowego (rysunek 3). Odształcenia graniczne betonów zwykłych były względnie niższe od normowych o około 5% w przypadku betonów z kruszywa bazaltowego i dolomitowego oraz względnie wyższe, o około 20%, w przypadku betonów z kruszywa granitowego i kwarcytowego (rysunek 4).

3.2. Moduł sprężystości i współczynnik Poissona

W tablicach 3 i 4 podano wynikające z przeprowadzonych badań średnie wytrzymałości betonów na ściskanie f_{cm} , odształcenia graniczne przy maksymalnym naprężeniu ściskającym ϵ_{c1m} , współczynniki odształcenia poprzecznego ν_{cm} (Poissona) oraz moduły sprężystości E_{cm} . W tablicach tych zamieszczono również informacje dotyczące klas wytrzymałości zbadanych betonów, ustalone na podstawie kryteriów zgodności dla próbek walcowych [PN-EN 1992-1-1:2008], a także normowe wartości $\epsilon_{c1,PN}$, $\nu_{c,PN}$, $E_{cm,PN}$, odpowiadające klasom poszczególnych betonów.

Uzyskane wyniki (tablica 3) wskazują na bardzo duże zróżnicowanie odształcalności i wytrzymałości BWW o $w/c = 0,28$, związane z rodzajem stosowanego kruszywa. Zaskakująco mały moduł sprężystości ma beton z kruszywa granitowego, który jest mniejszy odpowiednio aż o około 14 i 15 GPa od modułów betonu z kruszywa bazaltowego i dolomitowego, a także mniejszy o około 8 GPa od wartości normowych. Wiąże się to niewątpliwie z małą wytrzymałością na ściskanie betonu z tym kruszywem. Właściwości kruszyw granitowych z Granicznej zostaną zbadane przez

wyższą niż wartość standardowa. Jednakże, moduł sprężystości HPC z agregatem bazaltowym jest niższy niż wartość standardowa. Moduł sprężystości HPC z agregatami dolomitowymi i bazaltowymi jest bardzo podobny i jest najwyższy, co wynika z wysokiej wytrzymałości tych betonów. Ta relacja nie jest ważna dla modułu sprężystości betonów z agregatami kwarcytowymi i żwirowymi. Wytrzymałość pierwszego jest najwyższa ze wszystkich HPC, ale moduł sprężystości jest taki sam jak u betonu z agregatem żwirowym.

Gruby agregat wpływa również na współczynnik Poissona HPC. W przypadku betonów z agregatami bazaltowymi i dolomitowymi jest wyższy niż 0,20 i różni się od wartości podanych w książce Neville'a (18). Jednakże, współczynnik Poissona betonu z agregatami kwarcytowymi i dolomitowymi jest niższy niż ta wartość.

W przypadku zwykłego betonu [$w/c = 0,70$] rodzaj grubego agregatu ma istotny wpływ na wytrzymałość i jeszcze bardziej na moduł sprężystości (Tabela 4). Najlepsze właściwości osiągnięto u betonu z agregatem dolomitowym, co można prawdopodobnie wyjaśnić dobrą siłą przyległości strefy przejściowej. Najgorsze właściwości znaleziono u betonu z agregatem granitowym. Moduł sprężystości tego betonu był niższy o 29% niż moduł sprężystości betonu z agregatem dolomitowym. Satisfactory właściwości betonu z agregatem bazaltowym również obserwowano. Jego moduł sprężystości był wyższy o 20% niż u betonu z agregatem granitowym i o około 15% niż u betonu z agregatem żwirowym. Wyniki testów wykazały, że tylko u betonu z agregatem dolomitowym osiągnięto wartość standardową modułu sprężystości. Moduły sprężystości innych betonów, w tym betonu z agregatem bazaltowym, który powinien być szczególnie podkreślony, były niższe niż wartość standardowa.

Współczynnik Poissona zwykłych betonów jest wyższy niż wartość standardowa tylko w przypadku próbek z agregatem dolomitowym. Można to prawdopodobnie wyjaśnić dobrą siłą przyległości strefy przejściowej, wyniki są takie same u betonu z agregatem żwirowym, a niższe u pozostałych betonów.

Przyjmując wyniki testów można stwierdzić, że HPC, jak i zwykłe betony z agregatami dolomitowymi i bazaltowymi osiągnęły najwyższą wytrzymałość. Praktycznie, nie ma różnicy między modułem sprężystości i wytrzymałością betonu z agregatami dolomitowymi i bazaltowymi. Jednakże, niską wytrzymałość i niski moduł sprężystości znaleziono u betonu z agregatem granitowym, co wymaga dalszego zbadania właściwości tego agregatu. Beton z agregatem kwarcytowym wykazał nietypowe zachowanie: najwyższą wytrzymałość, ale stosunkowo niski moduł sprężystości, równy do

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADAŃ BETONÓW O w/c = 0,28

RESULTS OF THE TESTS OF HPC WITH w/c = 0.28

Właściwość Property	Oznaczenie betonów/Concrete designation				
	B028-B bazalt/basalt	B028-G granit/granite	B028-D dolomit / dolomite	B028-K kwarcyt / quartzite	B028-O otoczkowe / gravel
$f_{cm,cyl}$, MPa	93,2	78,3	89,0	103,6	82,6
klasa wytrzymałości betonu concrete class	C80/95	C70/85	C80/95	C90/105	C70/85
ε_{c1m} , ‰	2,35	2,72	2,19	3,07	2,46
v_{cm}	0,21	0,18	0,22	0,17	0,20
E_{cm} , GPa	47,1	33,2	48,5	39,9	40,0
	Wartości normowe/Standard values				
$\varepsilon_{c1,PN}$, ‰	2,80	2,70	2,80	2,80	2,70
$v_{c,PN}$	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$E_{cm,PN}$, GPa	50,4	41,0	42,0	44,0	41,0

autorów w celu wyjaśnienia tych wątpliwości. Moduł sprężystości betonu z kruszywa dolomitowego jest większy o 15% od wartości normowych. Natomiast beton z kruszywa bazaltowego ma tylko o 6% mniejszy moduł sprężystości od wartości normowych, co prawdopodobnie jest w granicach błędu pomiarowego (rysunek 5). Moduły sprężystości betonów z kruszywa bazaltowego i dolomitowego są bardzo zbliżone i mają największe wartości, co jest związane z dużą wytrzymałością na ściskanie tych betonów. Nie ma tej zależności w przypadku betonów z kruszywa kwarcytowego i otoczkowego; ten pierwszy ma największą wytrzymałość ze wszystkich BWW, a ten drugi mniejszą o 20 MPa, natomiast ich moduły sprężystości są prawie takie same.

Kruszywo grube ma również wpływ na współczynnik Poissona badanych BWW (rysunek 6). W przypadku betonów z kruszywa bazaltowego i dolomitowego v_{cm} są większe od wartości 0,20, i nie zgadzają się także z podanymi przez Neville'a (18), według którego BWW mają ten współczynnik około 0,15. Natomiast współczynnik Poissona betonów z kruszywa granitowego i kwarcytowego mają mniejsze wartości.

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ BETONÓW O w/c = 0,70

TESTS RESULTS OF ORDINARY CONCRETES WITH w/c = 0.70

Właściwość/ Property	Oznaczenia betonów/concretes designation				
	B070-B bazalt / basalt	B070-G granit / granite	B070-D dolomit / dolomite	B070-K kwarcyt / quartzite	B070-O otoczkowe / gravel
$f_{cm,cyl}$, MPa	34,5	28,7	36,1	36,3	32,0
klasa wytrzymałości strength class	C30/37	C20/25	C30/37	C30/37	C25/30
ε_{c1m} , ‰	2,13	2,44	2,06	2,63	2,09
v_{cm}	0,19	0,17	0,22	0,17	0,20
E_{cm} , GPa	30,9	24,0	33,9	26,3	26,9
	Wartości normowe / Standard values				
$\varepsilon_{c1,PN}$, ‰	2,20	2,00	2,20	2,20	2,10
$v_{c,PN}$	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$E_{cm,PN}$, GPa	38,4	30,0	32,0	32,0	31,0

concrete of gravel aggregate. The lack of the mechanical properties of these aggregates does not permit to explain these relations.

As it should be expected the lowering the w/c ratio from 0.70 to 0.28 caused the high increase of compressive strength and modulus of elasticity. It is worth to underline that the mechanical properties of HPCs and ordinary concretes show the same tendencies in these changes, in relation with the different type of aggregate used. The highest influence on these properties has the type of aggregate. The highest compressive strength achieved the concrete of quartzite aggregate in both groups of concretes i.e. with w/c of 0.70 and 0.28, but the relatively low modulus of elasticity.

4. Conclusions

The test results give the possibility to draw the following conclusions:

- 1) the significant effect of the type of aggregate on the properties of HPCs and ordinary concrete was confirmed,

W przypadku betonów zwykłych [$w/c = 0,70$] rodzaj kruszywa grubego ma duży wpływ na wytrzymałości na ściskanie i jeszcze większy na moduł sprężystości (tablica 4). Największe wartości właściwości osiągnął beton z kruszywa dolomitowego co tłumaczy prawdopodobnie zwarta strefa przejściowa (epitaksja), natomiast najgorsze z kruszywa granitowego. Moduł sprężystości był w przypadku tego ostatniego mniejszy o 29% od betonu z kruszywa dolomitowego. Dobre właściwości związane z odkształcalnością wykazał także beton z kruszywa bazaltowego; moduł sprężystości był większy o ponad 20% w porównaniu z kruszywem granitowym i o prawie 15% w stosunku do betonu z kruszywa otoczkowego. Badania wykazały, że tylko beton z kruszywa dolomitowego osiągnął wartość normową modułu sprężystości, przekraczając ją nieznacznie o 6%. Pozostałe betony miały moduły sprężystości mniejsze od normowych, w tym także beton z kruszywa bazaltowego.

Współczynnik Poissona betonów zwykłych jest większy od podanej w normie wartości 0,20 tylko w przypadku próbek z kruszywa dolomitowego, co jest przypuszczalnie spowodowane strefą przejściową, o dużej wytrzymałości. Taki sam współczynnik Poissona ma beton z kruszywa otoczkowego, a jest on mniejszy w przypadku pozostałych betonów (tablica 4). Wartości normowe odbiegają nieznacznie od podanych przez Neville'a, który podaje współczynnik Poissona dla betonów zwykłych równy 0,22.

Podsumowując uzyskane wyniki trzeba stwierdzić, że BWW jak również betony zwykłe z kruszywa dolomitowego oraz bazaltowego osiągnęły największą wytrzymałość na ściskanie. Praktycznie nie występują różnice pomiędzy wartościami modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie tych betonów. Natomiast relatywnie słabą wytrzymałość i niski moduł sprężystości uzyskał beton z kruszywa granitowego, co wymaga, jak już zaznaczono, zbadania właściwości tego kruszywa. Natomiast beton z kruszywa kwarcytowego wykazuje nietypowe zależności: ma największą wytrzymałość na ściskanie i stosunkowo mały moduł sprężystości, taki sam jak beton z kruszywa otoczkowego, którego wytrzymałość jest mniejsza od betonów z kruszywa dolomitowego i bazaltowego. Brak wytrzymałości na ściskanie stosowanych kruszyw nie pozwala na próbę wyjaśnienia tych różnic.

Jak można było oczekiwać zmniejszenie współczynnika w/c z 0,70 do 0,28 spowodowało duży wzrost wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości. Natomiast jest godne podkreślenia, że wszystkie właściwości BWW i betonów zwykłych wykazują analogiczne zmiany w zależności od rodzajów stosowanych kruszyw. Największą wytrzymałość ma beton z kruszywem kwarcytowym i pomimo tego znacznie mniejszy moduł sprężystości od betonów z kruszywa dolomitowego i bazaltowego. Być może, że zbadanie budowy strefy przejściowej wyjaśnić tą nieoczekiwaną zależność. Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że największe znaczenie ma rodzaj stosowanego kruszywa.

- 2) the similarity of the mechanical properties changes with the type of aggregate in the case of HPCs and ordinary concretes is worth to underline. Even untypical behaviour of concrete from quartzite aggregate is very similar for both kinds of concrete.
- 3) very good properties has the concrete of dolomite aggregate; they are comparable with the concrete of basalt aggregate,
- 4) the lower properties of concrete from gravel aggregate was confirmed,
- 5) the explanation of untypical behaviour of quartzite aggregate needs further studies,
- 6) analogically the explanation of low properties of concrete from granite aggregate needs further experiments.

Literatura / References

1. A. Bentur, M.D. Cohen, Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars, *J. Am. Ceram. Soc.* **70**, 738–743, (1987).
2. P.J.M. Monterio, J.C. Maso, J.P. Ollivier, The aggregate–mortar interface, *Cem. Concr. Res.* **15**, 953–958, (1985).
3. P.C. Aitcin, Hydratacja cementu portlandzkiego widziana oczyma inżyniera budownictwa, *Cement Wapno Beton*, **70**, 115, (2003)
4. D. Winslow, D. Liu, The pore structure of paste in concrete, *Cem. Concr. Res.* **20**, 227–235 (1990).
5. P.C. Aitcin, The durability characteristics of high performance concrete: a review, *Cem. Concr. Comp.* **25**, 409–420, (2003).
6. Caliskan S, Karihaloo BL, Barr BIG. Study of rock mortar interfaces. Part I: Surface roughness of rock aggregates and microstructural characteristics of interface. *Mag Concr. Res.*, **54**, 449–461, (2002).
7. G. Appa Rao B.K. Raghu Prasad, Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength, *Cem. Concr. Res.*, **32**, 253–257, (2002).
8. M. Saito, M. Kawamura, Resistance of the cement–aggregate interfacial zone to propagation of cracks, *Cem. Concr. Res.* **16**, 653–661, (1986).
9. E.K. Tschegg, H.M. Rotter, P.E. Roelfstra, U. Bourgund, P. Jussel, Fracture mechanical behavior of aggregate–cement matrix interfaces, *J. Mater. Civ. Eng.* **7**, (4), 199–203, (1995).
10. Y.L. Wong, L. Lam, C.S. Poon, F.P. Zhou, The Properties of fly ash-modified cement mortar–aggregate interfaces, *Cem. Concr. Res.* **29**, 1905–1913, (1999).
11. Sinan Caliskan, Aggregate/mortar interface: influence of silica fume at the micro- and macro-level, *Cem. Concr. Comp.* **25**, 557–564, (2003).
12. M.H. Zhang, O.E. Gjorv, Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, *Cem. Concr. Res.* **20**, 610–618, (1990).
13. W. Kurdowski, *Chemia Cementu i Betonu*, Polski Cement i PWN, Kraków, Warszawa, 2010.
14. K. Starzyk, Wpływ rodzaju cementu na właściwości BWW z kruszywa bazaltowego, *Cement Wapno Beton*, **73**, 291–296, (2006).
15. A. Ajdukiewicz, A. Kliszczewicz, Odkształcalność doraźna betonów wysokiej wytrzymałości, XLIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, t. 4, Poznań-Krynica, 1998.

4. Wnioski

Uzyskane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- 1) potwierdzono duży wpływ rodzaju kruszywa na właściwości tak BWW jak i betonów zwykłych,
- 2) zwracają uwagę bardzo podobne zmiany właściwości tych obu rodzajów betonu, w zależności od stosowanych kruszyw. Nawet trudne do wyjaśnienia właściwości betonu z kruszywa kwarcytowego, przede wszystkim stosunkowo mały moduł sprężystości przy dużej wytrzymałości na ściskanie, wykazują analogiczne zmiany,
- 3) bardzo dobre właściwości mają betony z kruszywa dolomitowego; nie ustępują one jakością betonom z kruszywa bazaltowego,
- 4) potwierdzono gorsze właściwości betonu z kruszywa otoczkowego,
- 5) wyjaśnienie nietypowych właściwości betonu z kruszywa kwarcytowego wymaga dalszych badań, przede wszystkim strefy przejściowej,
- 6) podobnie wymagają wyjaśnienia niekorzystne właściwości betonu z kruszywa granitowego; w tym celu niezbędne są dodatkowe badania, uwzględniające przede wszystkim właściwości tego kruszywa.

16. Alexander M. G., Fracture energies of interfaces between cement paste and rock, and application to the engineering behaviour of concrete, Proceedings International RILEM Conference, Noordwijk, Netherlands, E & FN Spon, London, 1991.

17. Mosley B., Bungey J., Hulse R. Reinforced concrete design to Eurocode2. Palgrave MacMillan 2007.

18. Neville A. M., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2012.

19. Kozłowski S., Surowce skalne Polski, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986

20. Piasta J., Piasta W. G., Beton zwykły, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.

21. Piasta W, Budzyński W., Góra J.: Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność betonów zwykłych, Przegląd Budowlany, 7-8, 35-38, (2010).