

Wpływ napowietrzenia i zawartości żużla w cemencie na skurcz i pęcznienie betonu

The effect of air entrainment and cements containing slag on shrinkage and swelling of concrete

1. Wstęp

Reakcja cementu z wodą powoduje ogólne zmniejszenie objętości zaczynu. Zmniejszenie to można obliczyć na podstawie gęstości substratów i produktów hydratacji. Te zmiany objętości nazywamy skurczem „chemicznym” lub kontrakcją, a wiążą się one z mniejszą objętością wody w fazach uwodnionych od jej objętości w fazie ciekłej. Pierwszy zjawisko kontrakcji badał Le Chatelier i z tego względu czasem w literaturze, szczególnie francuskiej, jest ona nazywana skurczem Le Chatelier (1).

Kontrakcja zależy od mineralnego składu cementu. Największą kontrakcję wykazuje C_3A , a najmniejszą C_2S i wynoszą one odpowiednio 7% i 1%. Kontrakcję można obliczyć na podstawie mas cząsteczkowych i gęstości substratów i produktów reakcji składników cementu z wodą. Skurcz chemiczny występuje również w betonie i jest tym większy im więcej cementu zawiera ten kompozyt. W związku z tym, że zachodzi on przed i w trakcie procesu wiązania, a więc w okresie w którym beton jest jeszcze plastyczny, ma on małe znaczenie praktyczne.

Następny skurcz zachodzi już w okresie twardnienia i znany jest jako skurcz samorzutny lub autowysychanie. Jest on bowiem związany z powstawaniem w zaczynie porów wypełnionych powietrzem, co prowadzi do zmniejszenia ciśnienia cząstkowego pary wodnej w równowadze z zaczynem, a więc do autosuszenia. Z fizycznego punktu widzenia jego mechanizm jest taki sam jak skurczu suszenia i skutek jest także podobny. Skurcz ten może prowadzić do mikropęknięć w betonie, zachodzi on bowiem po związaniu zaczynu, a więc gdy beton ma już pewną wytrzymałość i prowadzi do powstawania znacznych naprężeń w materiale (2).

W przypadku betonów wysokowartościowych, w których stosunek w/c jest z reguły mały, skurcz samorzutny ma duże znaczenie. W tych warunkach układ zawiera więcej cementu gdyż stosunkowo więcej wody odbiorą nanopory, utworzone w wyniku skurczu chemicznego. Ponadto będzie mniej wody kapilarnej w mieszance wyjściowej, a także te kapilary będą miały mniejszą średnicę i powstające w nich naprężenia będą większe.

1. Introduction

The reaction of cement with water causes the overall decrease of the paste volume. This volume decrease can be calculated taking the densities of substrates and products of hydration. This change of the volume is called “chemical” shrinkage or contraction, and is caused by the lower water volume in the hydrates in comparison with the free water. The first which studies the contraction was Le Chatelier and due to this fact sometime in the literature, particularly of French authors, it is called Le Chatelier shrinkage (1).

The contraction depends on cement phase composition, but also the alkalis and SO_3 content. The highest contraction has C_3A and the lowest C_2S which are 7% and 1% respectively. Contraction can be calculated from the molecular mass and densities of substrates and products of cement components reaction with water. The chemical shrinkage takes place also in concrete and is increasing with cement content in this composite. Because it takes place before and during setting, then in the period in which the concrete is still plastic, thus it is of low importance.

The second shrinkage takes place in the hardening period and it is called the autogeneous or self-drying shrinkage. It is linked with the pores formation in the paste filled with air, which is causing the decrease of water vapour partial pressure in equilibrium with the paste, thus to self-drying. From the physical point of view its mechanism is the same as drying shrinkage and the effect is also similar. This shrinkage can lead to microcracks formation in concrete, because it takes place after final set of the paste when concrete has some strength and causes to the formation of significant stresses in the material (2).

In the case of High Performance Concrete, in which the w/c ratio as a rule is low, the autogeneous shrinkage is important. In this condition the system contains more cement because the nanopores, formed due to chemical shrinkage, will take relatively more water. Additionally it will be less capillary water in starting concrete mix, and also these capillaries will have lower diameters and the stresses formed in them will be higher.

Skurcz samorzutny będzie znacznie mniejszy jeżeli hydratacja cementu w zaczynie o małym w/c zachodzi w warunkach zewnętrznego źródła wody, jednak wystąpi gdyż zawsze znajdują się w betonie miniobszary, w których nanopory i kapilary będą odcięte od zewnętrznego źródła wody (2).

Skurcz samorzutny będzie zależał od składu cementu i będzie mniejszy w przypadku cementów z dodatkami mineralnymi, przy czym wpływ ten będzie wzrastał ze zwiększeniem udziału tych dodatków. Jest to zrozumiałe, gdyż wiąże się ze znacznie wolniejszą hydratacją i reakcją pozzolanową tych dodatków, które znacznie dłużej pozostają w formie bezwodnych składników zaczynu. Podobny efekt zachodzi w betonie, w którym zastąpienie części cementu dodatkami mineralnymi zmniejsza skurcz samorzutny.

Beton stosowany w konstrukcjach różnego rodzaju jest bezpośrednio po ułożeniu narażony na suszenie co jest połączone ze skurczem, bowiem jak wiadomo zmiany objętości łączą się bezpośrednio z wilgotnością tego kompozytu. W okresie początkowej reakcji cementu z wodą wyróżnia się tak zwany skurcz plastyczny, który jest związany z odparowywaniem wody z powierzchniowych warstw betonu (2). W związku z wczesnym ubytkiem wody, przed rozpoczęciem wiązania i w trakcie tego procesu, kiedy beton jest plastyczny, skurcz ten nazywamy skurczem plastycznym. Kończy się on mniej więcej z końcem wiązania, gdy odkształcalność betonu znacznie maleje (3). Ma on duże znaczenie w przypadku powierzchni płaskich, takich jak płyty fundamentowe i stropy, o dużym stosunku powierzchni do grubości, w przypadku których ubytek wody może być znaczny, zwłaszcza w okresie letnim i przy dużym wietrze. Prowadzi on wówczas do powstawania rys, co wskazuje na konieczność rozpoczęcia pielęgnacji betonu bezpośrednio po jego ułożeniu.

Beton wystawiony na działanie suchego powietrza lub wiatru traci pewną ilość zawartej w nim wody i zmniejsza swoją masę. W powierzchniowych kapilarach tworzą się meniski i wywołują naprężenia rozciągające, które zmniejszają pozorną objętość betonu. Jest to skurcz wysychania i towarzyszy mu ubytek masy betonu. Im większy w/c tym skurcz przebiega szybciej i osiąga większą wartość, ponieważ z dużych i połączonych ze sobą kapilar woda może odparowywać bardzo łatwo. Końcowa wartość skurczu przy wysychaniu zależy od wielkości porowatości i struktury porów oraz od względnej wilgotności powietrza.

Pierwszy raz suszony beton wykazuje nieodwracalny skurcz, na którego wielkość znacznie wpływa porowatość kompozytu, natomiast na odwracalny nie. Skurcz nieodwracalny stanowi 0,3 do 0,6 skurczu odwracalnego, który zachodzi powtarzalnie przy kolejnym suszeniu i nawilżaniu betonu. Neville (3) podaje, że częściej spotykana jest wartość mniejsza, natomiast według Czernina (4) skurcz nieodwracalny jest znacznie większy od odwracalnego. Trzeba pamiętać, że skurcz betonu zależy od zawartości kruszywa (3). Stopień ograniczenia skurczu jest związany z wymiarami oraz z właściwościami sprężystymi kruszywa. Są jednak kruszywa, które same ulegają skurczowi przy wysychaniu i jest on tego

The autogenous shrinkage will be significantly lower if cement hydration proceeds in the condition of external source of water, however, it will take place because always it can be found in concrete a micro-volumes in which the nanopores and capillaries will be cut from this external water (2).

The autogenous shrinkage will depend on cement composition and will be lower in the case of cements with mineral additions, and this effect will increase with the increase of the share of these additives. It is self-understanding because it is linked with slower hydration and pozzolanic reaction of these additions, which longer remain in the state of anhydrous component of the paste. The same conditions are in concrete, in which the partial replacement of cement by mineral additions is reducing the autogenous shrinkage.

The concrete applied in different kinds of constructions is immediately after placing exposed to drying which is linked with shrinkage because, as it is known, the volume changes are linked directly with the moisture content of this composite. In the initially period of cement reaction with water one can distinguish so called plastic shrinkage, which is caused with the evaporation of water from surface layers of concrete (2). Because of the early of water reduction, before the initial setting and during this process, when the concrete is plastic, this shrinkage is called plastic shrinkage. It ends more or less with the final setting, when the concrete volumetric strain became much reduced (3). It has a high importance in the case of flat concrete surfaces as foundation, slab and floors, with high surface to thickness ratio, in the case of which the water reduction can be high, especially in summer time and in strong wind. It causes the cracks formation which shows the necessity of concrete curing immediately after its placing.

The concrete exposed to dry air or wind is losing some part of its water with the decrease of mass. In the capillaries located near the surface the menisci appear with the tension stresses formation, accompanied with the apparent concrete volume reduction. It is the drying shrinkage, with simultaneous reduction of concrete mass. The rate of shrinkage and its value are increasing with the w/c ratio due to bigger and connected capillaries from which the water can be evaporated very quickly. The final drying shrinkage value depends on porosity and pores structure and on relative air humidity.

The first time dried concrete shows the irreversible shrinkage, which value is highly dependent on composite porosity. However, the reversible shrinkage does not show this dependence. The irreversible shrinkage represents 0.3 to 0.6 of reversible shrinkage, which is occurring repeatedly during consecutive drying and moistening of concrete. Neville (3) states that more frequently can be find this lower value, however, according Czernin (4) the irreversible shrinkage is much bigger than reversible. It should be remember that the concrete shrinkage is dependent on aggregate content (3). The degree of shrinkage constrain is linked with the aggregates grading and their elastic properties. However there are aggregates which themselves underwent shrinkage during drying and it is of the same order that the concrete shrinkage with non-

samego rzędu co skurcz betonu z kruszywem bezskurczowym; Neville (3) zalicza do tego kruszywa niektóre bazalty.

Oceniając wielkość skurczu betonu należy pamiętać, że będzie on także zależał od wielkości elementów betonowych; często może wystąpić znaczny gradient wilgotności w ich wnętrzu. Ponieważ wysychanie następuje na powierzchni betonu, w związku z tym wartość skurczu ulega poważnym wahaniom w zależności od wymiarów i kształtu elementu i jest funkcją stosunku powierzchni do objętości.

Znane są różne hipotezy wyjaśniające zjawisko skurczu nieodwrotnego. Trzeba wymienić dwie: oddawanie wody międzywarstwowej przez żel C-S-H oraz zmiana energii powierzchniowej cząstek żelu. Zmniejszenie odległości między warstwami C-S-H przyczynia się do zwiększenia ilości wiązań chemicznych Si-O-Si, czyli do zwiększenia stopnia polimeryzacji anionów krzemotlenowych w strukturze tej fazy. Prowadzi to do nieodwrotnego zmniejszenia odległości międzyplaszczynowej w fazie C-S-H, a więc do nieodwrotnego skurczu (4). Natomiast zmiana gęstości żelu zasadza się na dużej energii powierzchniowej jego maleńkich cząstek, powodującej ich znaczną adhezję i skurcz układu, w warunkach małej prężności pary wodnej, a więc małej wilgotności betonu. Pomiędzy blisko upakowanymi cząstkami żelu mogą wystąpić wiązania van der Waalsa stabilizujące ten stan. Energia powierzchniowa może ulegać zmniejszeniu poprzez adsorpcję cząsteczek wody z atmosfery gazowej, co prowadzi do utworzenia błonki wodnej na cząstkach żelu. Transport wody może również zachodzić w wyniku dyfuzji i jej oddziaływanie na cząstki żelu będzie analogiczne jak w przypadku fazy gazowej. Zmniejszenie energii powierzchniowej zmniejsza naprężenie ściskające w żelu, który ulega ekspansji. Tym wyjaśnia się pęcznienie betonu, po jego zanurzeniu w wodzie.

Stosunkowo bardzo niewiele jest badań dotyczących wpływu napowietrzenia na skurcz betonu. Neville (3) przytacza jedną pracę Keene'a, który stwierdził, że napowietrzenie betonu nie ma wpływu na skurcz. Z tego względu niniejsza praca poświęcona jest wpły-

shrinking aggregate; Neville (3) rates among them some basalts.

Evaluating the shrinkage size it should be remember, that it will depend on sizes of concrete elements; frequently the moisture gradient can be formed in their interior. Drying occurs on the concrete surface, thus the shrinkage size will underwent the significant changes in relation with dimensions and shape of elements and is the function of the surface to volume ratio,

There are different hypothesis explaining the irreversible shrinkage. Two should be mention: loss of interlayer water by C-S-H gel and the change of surface energy by gel particles. The distance decrease between C-S-H layers causes the increase of chemical bonds with the oxygen bridges formation Si-O-Si, thus increasing the polymerisation degree of silicate anions in the structure of this phase. This causes the irreversible decrease of interlayer distance in C-S-H phase, thus the irreversible shrinkage (5). However, the change of gel density is due to the high surface energy of its very small particles, causing their high adhesion and system shrinkage in the condition of low water vapour pressure, then the low moisture of concrete. Between closely packed gel particles the van der Waals bonds can be formed, which will stabilise this state. The surface energy can decrease through the water molecules adsorption from the gaseous phase, which lead to the surface film formation on gel particles. Water transport can also go through diffusion in the liquid phase and its molecules influence on gel particles will be the same as in the case of gaseous phase. The surface energy decrease causes the compressive stress diminution in gel, which shows expansion. This explains the concrete expansion in water.

There are relatively few published papers on the air entrainment effect on concrete shrinkage. Neville (3) cites the Keene work which has stated that the air-entraining in concrete has no influence on shrinkage. It is the reason that the main goal of this study is to learn the air entraining effect on the shrinkage of this composite.

2. Materials and methods

To study the volume changes of concrete – shrinkage in the air and swelling in water, two series of concretes were prepared: non air-entrained and air-entrained, with w/c ratio = 0.5. The concretes were produced from the following kinds of cements: Portland CEM I 42.5R, Portland-Slag CEM II-/B-S 42.5N and Slag CEM III/A 42.5N. All three cements were produced in one cement plant from the same clinker. From each of these cements two concretes were prepared: without air-entraining agent and with this additive, added in the quantity 0.20-0.28% of cement mass. As fine aggregate the natural quartz sand was applied (Dziergowice 0-2 mm), and as coarse aggregates natural gravel (Dziergowi-

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH, kg /m³

COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES, kg/m³

Beton z kruszywem węglanowym łamanym Concrete with crushed dolomite aggregate	Beton z kruszywem otoczkowym naturalnym Concrete with natural gravel aggregate
K ₂₋₈ = 565 Aggregate 2-8 mm 565	K ₂₋₈ = 548 Aggregate 2-8 mm 548
K ₈₋₁₆ = 702 Aggregate 8-16 mm 702	K ₈₋₁₆ = 681 Aggregate 8-16 mm 681
C = 350	
W = 175*	
P = 605	
w/c = 0.50	

* Remark: total water content in non-air entrained and air entrained concrete; in the last with the water added with the agent.

* Uwaga: całkowita masa wody w betonie nienapowietrzonym oraz napowietrzonym, w tym ostatnim z uwzględnieniem wody zawartej w domieszce.

wowi napowietrzenia betonu, przy zastosowaniu dwóch rodzajów cementu, na skurcz i pęcznienie tego kompozytu.

2. Materiały i metody badań

Do badań zmian objętości betonu – skurczu w powietrzu i pęcznienia w wodzie, zastosowano dwie serie betonów: nienapowietrzone i napowietrzone, o stosunku $w/c=0,50$. Betony sporządzono z następujących rodzajów cementów: portlandzki CEM I 42,5R, portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 42,5N i hutniczy CEM III/A 42,5N. Wszystkie trzy cementy zostały wyprodukowane w tej samej cementowni, z tego samego klinkieru portlandzkiego. Z każdego z tych cementów wykonano po dwa betony: bez domieszki napowietrzającej oraz z domieszką napowietrzającą, dodawaną w ilości 0,20-0,28% masy cementu. Jako kruszywo drobne zastosowano naturalny piasek kwarcowy (Dziergowice 0,0-2,0 mm), a jako kruszywo grube naturalne kruszywo otoczkowe (Dziergowice 2-8 mm oraz Wójcice 8-16 mm). Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 1.

Ponadto w celu zbadania wpływu rodzaju kruszywa na zmiany wymiarów liniowych próbek betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego, o tym samym składzie (tablica 1), przygotowano ten kompozyt z łamanego kruszywa węglanowego z kopalni Laskowa, zachowując tę samą objętość obu kruszyw grubych – łamanego i naturalnego. Do wykonania betonów z kruszywem łamanym użyto naturalny piasek kwarcowy (z piaskowni Brzegi-Nida) oraz ten sam cement portlandzki i tę samą domieszkę napowietrzającą, jak w przypadku betonu z grubym kruszywem naturalnym.

Oprócz oznaczenia właściwości stwardniałego betonu wykonano następujące badania mieszanek betonowych, według normy PN-EN 12350 części 2, 6 i 7:

- konsystencji metodą opadu stożka,
- zawartości powietrza metodą ciśnieniową,
- gęstości objętościowej mieszanki betonowej.

Wyniki badań mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2 / Table 2

WYNIKI BADAŃ MIESZANEK BETONOWYCH

THE RESULTS OF CONCRETE MIXTURES EXAMINATION

Kruszywo Aggregate	łamane kruszywo węglanowe crushed dolomite		naturalne kruszywo otoczkowe natural gravel					
	CEM I		CEM I		CEM II/B-S		CEM III/A	
Cement	np*	P	np	p	np	P	np	p
Beton/Concrete	np*	P	np	p	np	P	np	p
Opad stożka, Cone method, cm	3.2	5.3	3.0	5.6	1.0	5.0	4.0	5.0
Zawartość powietrza, Air content, %	2.1	5.4	2.2	5.6	2.0	5.2	2.2	5.4
Gęstość obj. mieszanki, Mix bulk density, kg/dm ³	2.40	2.32	2.35	2.26	2.36	2.29	2.37	2.26

* Uwaga: np – beton nienapowietrzony, p – beton napowietrzony

* Remark: np – non-air entrained, p – air entrained

ce 2-8 mm and Wójcice 8-16 mm). The composition of the concrete mixes are presented in Table 1.

Additionally in order to study the effect of kind of aggregates on the change of samples linear dimensions of air entrained and non-entrained concretes of the same composition (Table 1), this composite was prepared of crushed dolomite aggregate from Laskowa quarry, keeping the same volume of these two aggregates – crushed and natural. For the preparation of concrete with crushed aggregate the natural quartz sand from the plant Brzegi-Nida was used and the same Portland cement as well as the same air-entraining agent as in the case of coarse natural gravel.

Beside the examination of the properties of hardened concrete the following determinations of concrete mixtures, according PN-EN 12350, parts 2, 6 and 7, were made:

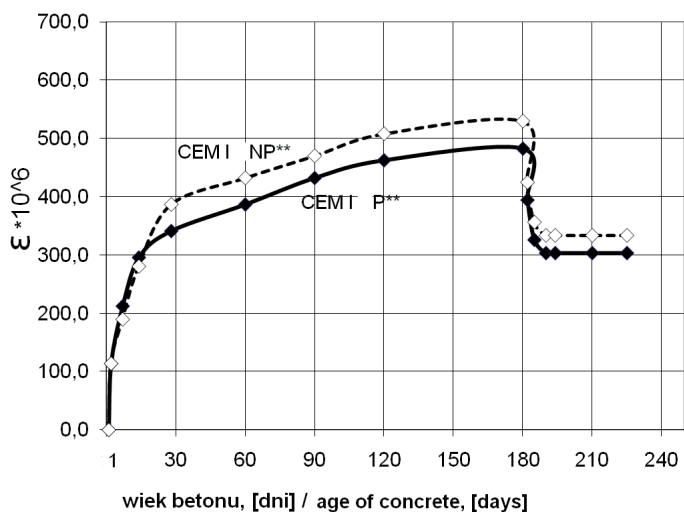
- consistency with cone method,
- air content, using pressure method,
- bulk density.

The results are given in Table 2.

From the moment of the first measurement, i.e. after 24 hours from the concrete mix preparation, the samples with natural gravel aggregate were cured in the air at the temperature of 20°C and moisture of 70% rh.

The measurements period of linear changes was 390 days in the air and then, after immersion in water, the measurements lasted 45 days. However, the concrete samples with crushed dolomite aggregate were measured 180 days during air curing at the temperature 18°C and rh of 65%, and then 45 days in water.

The linear dimension changes was measured with Amsler's apparatus, according to the Polish standard PN-B-06714-23:1984, using 6 samples of each concrete with dimensions 10x10x50 cm, equipped with steel pins cemented in the both ends of the beams. The first measurement was made after 24 hours from concrete beams preparation. The compressive strength was measured on 5 cubes of dimension 15x15x15 cm for each concrete. The measurements were conducted according the standard PN-EN-206-1:2003.



**Uwaga: - beton z węglanowym kruszywem łamanym
 ** Remark: - concrete with crushed dolomite aggregate

Rys. 1. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu portlandzkiego i łamanego kruszywa węglanowego

Fig. 1. Shrinkage and swelling of air entrained and non-air entrained concrete from Portland cement and crushed dolomite aggregate

Od chwili pierwszego pomiaru, to jest po 24 godzinach od wykonania betonu, próbki betonowe z naturalnym kruszywem otoczkowym dojrzewały w powietrzu o wilgotności względnej $70 \pm 5\%$ i w temperaturze 20°C . Czas badania odkształceń wynosił 390 dni w powietrzu, po czym umieszczano je w wodzie i pomiary trwały 45 dni. Natomiast próbki betonowe z kruszywem łamanym były badane przez 180 dni w powietrzu o wilgotności względnej $65 \pm 5\%$ i w temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$, a następnie 45 dni w wodzie.

Do badań odkształceń zastosowano aparat Amslera, przy czym pomiary prowadzono zgodnie z normą PN-B-06714-23:1984 : Kruszywa mineralne. Badania – Oznaczanie zmian objętościowych betonu metodą Amslera i obejmowały po 6 próbek każdego betonu, o wymiarach $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}$ z czopikami stalowymi zabetonowanymi na końcach beleczek. Pierwszy pomiar wykonywano już po 24 godzinach od wykonania próbek. Natomiast wytrzymałość betonu na ściskanie mierzono na 5 kostkach każdego betonu, o wymiarach $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$. Metody pomiarowe były zgodne z normą PN-EN-206-1:2003: Beton.

3. Omówienie wyników badań

3.1. Skurcz i pęcznienie betonów

3.1.1. Wpływ napowietrzenia

Wyniki badań skurczu w powietrzu i pęcznienia w wodzie betonu z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R i łamanego kruszywa węglanowego, przedstawione na rysunku 1, wykazały

3. Discussion of experimental results

3.1. Concrete shrinkage and swelling

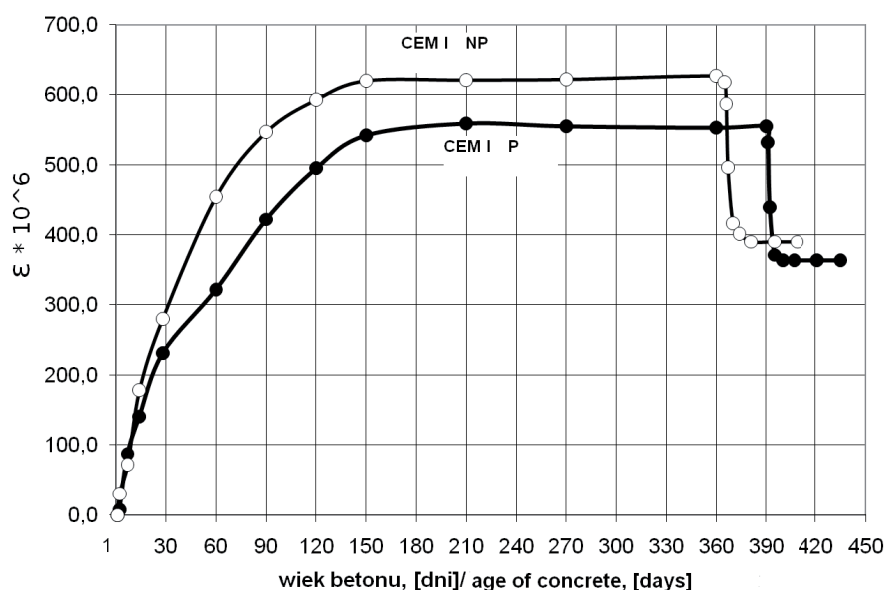
3.1.1. The influence of air entrainment

The results of shrinkage study in the air and swelling in water of concrete from Portland cement CEM I 42.5R and crushed dolomite aggregate have shown that air-entraining caused a small decrease of linear dimension changes of the samples (Fig. 1).

During whole period of experiments the air-entrained concrete had lower shrinkage than the non-air entrained one. The difference in shrinkage after 28 days was $46 \cdot 10^{-6}$ and after 180 days $47 \cdot 10^{-6}$, it is about 12% and 9% respectively. The similar relations were maintained as far as the swelling in water of non-air entrained and air entrained concrete was compared.

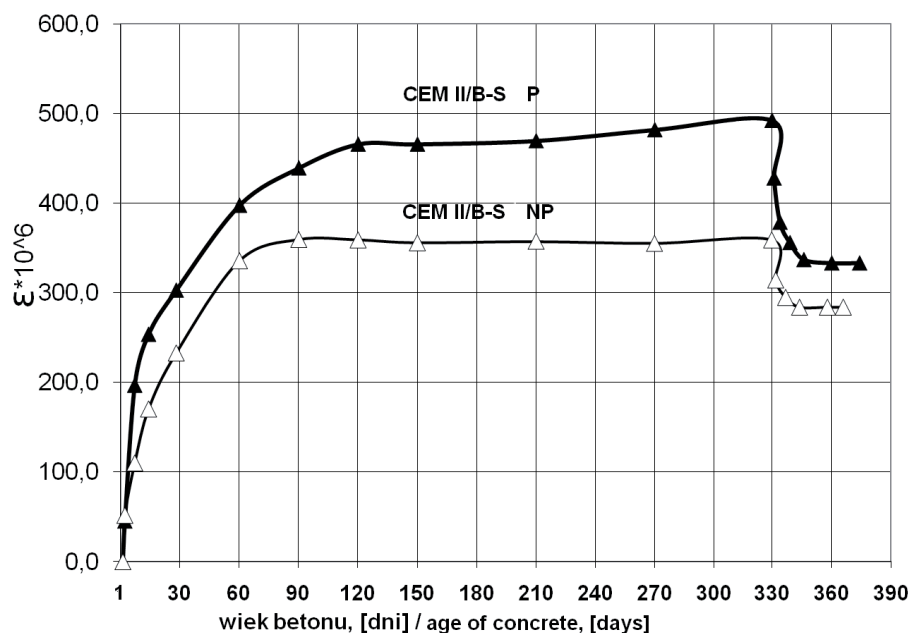
The examination of the linear changes of the non-air entrained and air-entrained concrete beams from Portland cement CEM I 42.5R and natural gravel as a function of time the same results were given (Fig. 2).

The research results show that starting from the 7th day till the shrinkage stabilisation, i.e. from 330 to 360 or 390 days, the air-entrained concrete had smaller linear changes than the non-air entrained one. The highest shrinkage value of non-air entrained concrete was $620 \cdot 10^{-6}$, however, of air-entrained concrete $560 \cdot 10^{-6}$. The relative difference of linear changes in the period from 150 to 360 days was about 15%, relatively to the non-air entrained concrete. The highest differences of shrinkage change of air-entrained and non-air entrained concretes appeared between 28 and 90 days. The swelling of air entrained and non-air entrained concrete was $152 \cdot 10^{-6}$ and $201 \cdot 10^{-6}$ respectively, thus also



Rys. 2. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu portlandzkiego i naturalnego kruszywa otoczkowego

Fig. 2. Shrinkage and swelling of non-air entrained and air entrained concrete from Portland cement and natural gravel



Rys. 3. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/B-S 42,5 N.

Fig. 3. Shrinkage and swelling of non-air entrained and air entrained concrete from Portland Slag cement CEM II/B-S 42,5 N

niewielkie zmniejszenie odkształceń, spowodowane przez napowietrzenie.

Przez cały okres badań beton napowietrzony miał mniejszy skurcz niż beton nienapowietrzony. Różnica skurczu po 28 dniach wynosiła $46 \cdot 10^{-6}$ to jest. około 12%, a po 180 dniach odpowiednio $47 \cdot 10^{-6}$ i 9%. Podobne relacje zostały zachowane w wielkościach pęcznienia w wodzie betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań odkształceń betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego z ementu portlandzkiego CEM I 42,5R i z naturalnego kruszywa otoczkowego, w zależności od czasu.

Wyniki badań wykazują, że począwszy od 7 dni aż do stabilizacji skurczu, to znaczy od 330 do 360 lub 390 dni, beton napowietrzony osiągnął mniejsze odkształcenia niż beton nienapowietrzony. Maksymalna wartość skurczu betonu nienapowietrzonego wynosiła $620 \cdot 10^{-6}$, natomiast betonu napowietrzonego $560 \cdot 10^{-6}$. Względna różnica wielkości odkształceń w okresie od 150 do 360 dni wynosiła około 15%, w stosunku do betonu nienapowietrzonego. Największe różnice przebiegu skurczu betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego występowały w okresie od 28 do 90 dni. Skurcz odwrotny (pęcznienie) betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wynosił odpowiednio $152 \cdot 10^{-6}$ i $201 \cdot 10^{-6}$, a więc i w tym przypadku beton napowietrzony wykazał mniejsze zmiany objętości niż beton nienapowietrzony.

W oparciu o uzyskane wyniki badań skurczu i pęcznienia betonów wykonanych z cementu portlandzkiego z kruszywem otoczkowym oraz łamanym dolomitowym

in this case the air-entrained concrete has shown the lower linear dimension differences than the non-air entrained one.

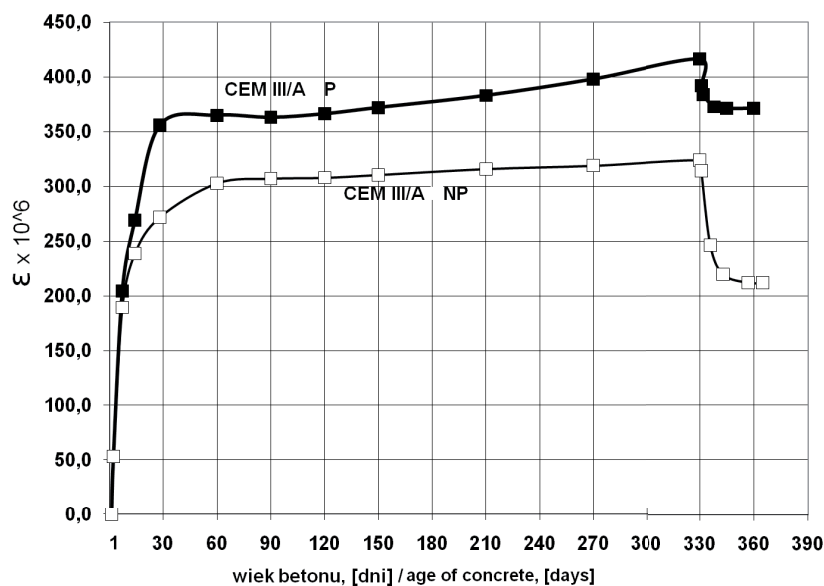
The results of shrinkage and swelling of concrete from Portland cement and natural gravel aggregate as well as of crushed dolomite aggregate have shown that the air entraining of concrete decreases these changes.

Quite different relation of the linear changes was found for concrete made from Portland Slag cement (Fig. 3). Air entrainment of this concrete caused the increase of shrinkage.

Till three days shrinkage of both concrete air entrained and non-air entrained was almost the same (about $50 \cdot 10^{-6}$). However, after 120 days the shrinkage of non-air entrained concrete was much higher than of air-entrained, equal $480 \cdot 10^{-6}$. The shrinkage of the last one was only $360 \cdot 10^{-6}$. From 120 days till the end of measurements i.e. to 330 days the shrinkage of air-entrained concrete was higher than that of non-air entrained one. The highest shrinkage differences of these two concretes were found in the period from 120 till 330 days and lay between 30 and 34%.

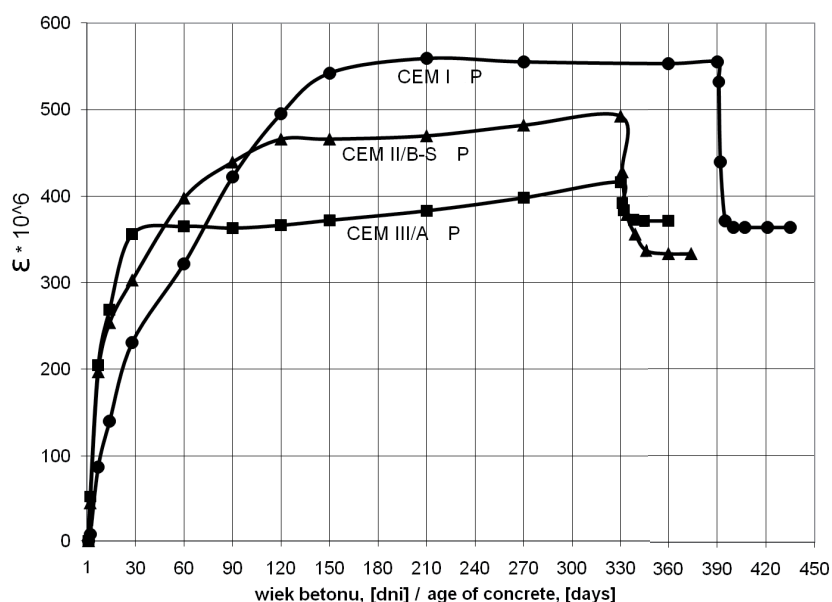
The swelling of air-entrained and non-air entrained concrete was $160 \cdot 10^{-6}$ and $75 \cdot 10^{-6}$ respectively. Thus the air-entrained concrete had twice higher linear dimension change than non-air entrained.

Very similar shrinkage and swelling phenomena have shown the concretes from Portland Slag cement and Slag cement (Fig. 4). Also in this case the air entraining of concrete caused the increase of shrinkage.



Rys.4. Skurcz i pęcznienie napowietrzonego i nienapowietrzonego betonu z cementu hutniczego CEM III/A 42,5N

Fig.4. Shrinkage and swelling of air entrained and non-air entrained concrete from Slag cement CEM III/A 42,5N



Rys. 5. Wpływ rodzaju cementu na odkształcenia betonów napowietrzonych

Fig. 5. The influence of cement kind on linear dimension changes of air entrained concrete

można stwierdzić, że napowietrzenie betonu zmniejsza odkształcenia tego kompozytu.

Zupełnie inny obraz zmian objętości wykazały betony wykonane z cementu portlandzkiego żuźlowego (rysunek 3). Napowietrzenie betonu spowodowało zwiększenie skurczu.

Do trzech dni odkształcenia skurczowe obu betonów napowietrzonego i nienapowietrzonego były w przybliżeniu jednakowe (około $50 \cdot 10^{-6}$). Natomiast po 120 dniach skurcz betonu napowietrzonego wynosił $480 \cdot 10^{-6}$ i był znacznie większy niż betonu nienapowietrzonego, który w tym czasie osiągnął wartość około $360 \cdot 10^{-6}$. Od 120 dni aż do zakończenia badań skurczu, to jest do 330 dni, beton napowietrzony miał większe wartości odkształceń skurczowych niż beton nienapowietrzony. Największe różnice skurczu betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wystąpiły w okresie od 120 do 330 dni i wynosiły one od 30% do 34%. Skurcz odwracalny (pęcznienie) betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wynosił odpowiednio $160 \cdot 10^{-6}$ i $75 \cdot 10^{-6}$. W powyższym przypadku beton napowietrzony wykazał dwukrotnie większe odkształcenia niż beton nienapowietrzony.

Bardzo podobny przebieg skurczu i pęcznienia wykazały betony wykonane z cementu portlandzkiego żuźlowego i z cementu

Till 7 days the shrinkage of air-entrained and non-air entrained concretes was similar and reached the relatively close values $204 \cdot 10^{-6}$ and $190 \cdot 10^{-6}$ respectively. In the period ranging from 7 to 30 days the quicker and higher increase of air-entrained concrete shrinkage appeared, which raised till $356 \cdot 10^{-6}$, however, the shrinkage of non-air entrained concrete reached in the same period only $272 \cdot 10^{-6}$. From 60 days till the end of the measurements i.e. till 330 days the air-entrained concrete had the higher shrinkage than the non-air entrained one, and the relative difference laid from 20 to 28%. The highest difference of the shrinkage of air-entrained and non-air entrained shrinkage was found after 30 days.

Swelling of these two concrete was equal $45 \cdot 10^{-6}$ and $112 \cdot 10^{-6}$ respectively. In the case of concrete from Slag cement the air-entrained samples showed twice lower swelling than the ones of non-air entrained concrete.

3.1.2. Effect of cement kind

The results of the measurements have shown high difference in the linear change behaviour of the air-entrained and non-air entrained concrete in relation to the cement kind. In order to emphasize these differences the curves of the linear dimension changes of all air-entrained concrete were presented on Fig. 5. Up to 75 days the shrinkage of air-entrained concrete from Portland Slag and Slag cements was much higher than in the case of the concrete from Portland cement. However, the samples of the first concretes much quicker reached the "plateau", contrary to the concrete of Portland cement which shrinkage has increased till 150 days. As the result already after 120 days the shrinkage of the last concrete was the highest. These relations were maintained till the end of measurements. Thus the shrinkage of the concrete samples from Portland cement reached after 390 days $560 \cdot 10^{-6}$, and the shrinkage of concrete from containing slag cements was lower and from CEM II/B-S cement was $492 \cdot 10^{-6}$, but from Slag cement even less, reaching after 330 days $416 \cdot 10^{-6}$. The difference of shrinkage of air-entrained concrete from Slag cement and Portland cement reached as much as 26%.

Similar changes shows the shrinkage of the non-air entrained samples; the highest value equal $620 \cdot 10^{-6}$ after 330 days the concrete

Tablica 3 / Table 3

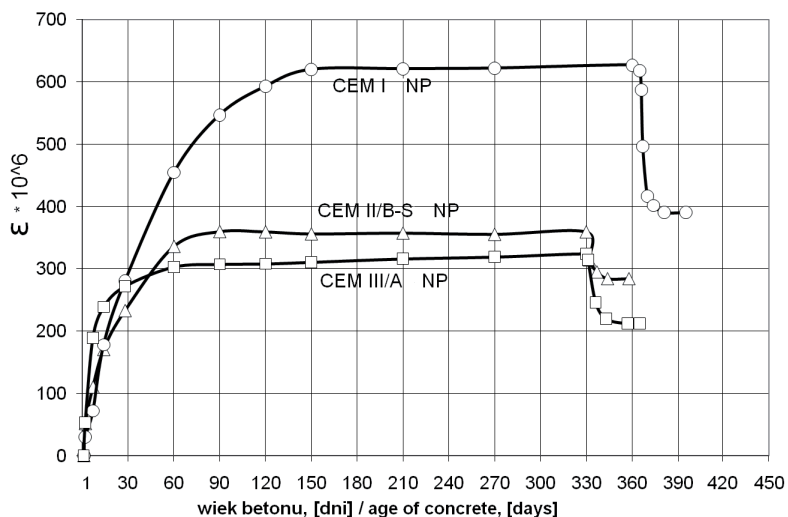
WYTRZYMAŁOŚĆ PRÓBEK BETONÓW NA ŚCISKANIE PO 28 DNI I KLASY WYTRZYMAŁOŚCI

COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETES AFTER 28 DAYS AND THEIR CLASS OF STRENGTH

Cement	CEM I*		CEM I		CEM II/B-S		CEM III/A	
	np	p	np	p	np.	p	np	p
Beton / Concrete								
f_{cm} , MPa	41,90	35,10	46,10	38,90	51,80	43,20	52,00	45,80
Klasa wytrzymałości Strength class	C30/37	C25/30	C30/37	C25/30	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37

* Uwaga: beton z węglanowym kruszywem łamanym

* Remark: concrete with crushed dolomite aggregate



Rys.6. Wpływ rodzaju cementu na odkształcenia betonu nienapowietrzonego

Fig.6. Effect of cement kind on the linear dimension changes of non-air entrained concrete

hutniczego CEM III/A 42,5N (rysunek 4). Napowietrzenie betonu również i w tym przypadku spowodowało zwiększenie skurczu.

Do 7 dni odkształcenia skurczowe betonów napowietrzonego i nienapowietrzonego przebiegały podobnie i osiągnęły podobny zakres, wynosząc odpowiednio $204 \cdot 10^{-6}$ i $190 \cdot 10^{-6}$. W okresie od 7 do 30 dni nastąpił większy i szybszy przyrost skurczu betonu napowietrzonego, który wyniósł $356 \cdot 10^{-6}$, natomiast skurcz betonu nienapowietrzonego w tym samym okresie osiągnął poziom $272 \cdot 10^{-6}$. Od 60 dni aż do zakończenia badań, to jest do 330 dni, beton napowietrzony miał większy skurcz niż beton nienapowietrzony, a względna różnica odkształceń wynosiła od 20 do 28%. Największa różnica skurczu betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wystąpiła po 30 dniach. Skurcz odwracalny (pęcznienie) betonu napowietrzonego i nienapowietrzonego wynosił odpowiednio $45 \cdot 10^{-6}$ i $112 \cdot 10^{-6}$. W przypadku betonów z cementu hutniczego próbki napowietrzone wykazały dwukrotnie mniejsze pęcznienie niż beton nienapowietrzony.

3.1.2. Wpływ rodzaju cementu

Wyniki badań wykazały znaczne różnice w przebiegu odkształceń betonów napowietrzonych w zależności od rodzaju cementu. W celu uwypuklenia tych różnic krzywe zmian wymiarów liniowych próbek betonów napowietrzonych zestawiono na rysunku 5. Do 75 dni skurcz betonów napowietrzonych z cementów zawierających żużel był znacznie większy niż w przypadku betonu z cementu portlandzkiego. Jednak próbki tych pierwszych betonów znacznie szybciej osiągnęły plateau, podczas gdy skurcz betonu z cementu portlandzkiego wzrastał aż do 150 dni. W efekcie już po 120 dniach skurcz tego ostatniego betonu był największy. Relacje te utrzymywały się do końca pomiarów. W związku z tym skurcz próbek betonu z cementu portlandzkiego osiągnął po 390 dniach $560 \cdot 10^{-6}$, natomiast skurcz betonu z cementów zawierających żużel był mniejszy i wynosił w przypadku betonu z cementu portlandzkiego żużlowego $492 \cdot 10^{-6}$, a w przypadku betonu z cementu hutniczego jeszcze mniej, osiągając po 330 dniach $416 \cdot 10^{-6}$. Tak

from Portland cement has reached. However, the shrinkage of concrete from Portland Slag cement was $350 \cdot 10^{-6}$, and from Slag cement only $320 \cdot 10^{-6}$, thus they were much lower by 43% and 49%, in comparison with the concrete shrinkage from Portland cement (Fig. 6). In the case of the non-air entrained concrete the early increase of shrinkage was similar, and the differences start to be higher after 30 days of air curing.

The influence of air-entraining of concrete mixes on shrinkage can be summarized as follows. The addition to the concrete mix from Portland cement about 3% of air, which caused the formation of additional air pores, has the effect of shrinkage decrease of 12% and 15% in the case of crushed dolomite aggregate and natural gravel aggregate, respectively. However, the air-entraining of concretes from cement containing slag caused the increase of shrinkage, which was about 30% higher than in the case of non-air entrained concrete.

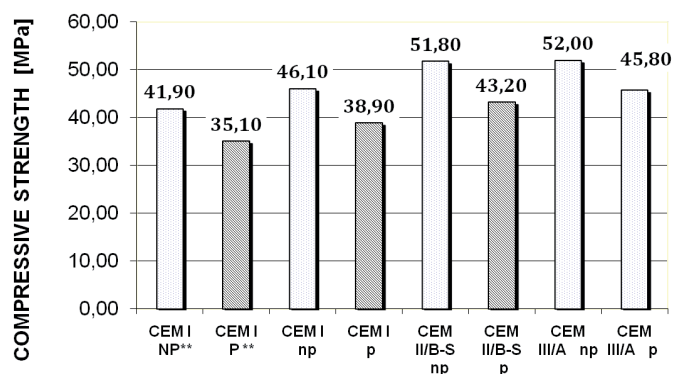
3.2. Compressive strength of concrete

On the Fig. 7 and in Table 3 the mean value of compressive strength of concretes and their classification according to the standard PN-EN-206-1 are given.

As it should be expected the air entraining caused the decrease of strength of concrete from Portland cement by one class, however, in the case of concretes from cements CEM II/B-S and CEM III/A by two classes. The compressive strength of air entrained concrete was on average 17-18% lower than of non-air entrained concrete, which correspond to 5.2-5.5% strength decrease on 1% of air entraining.

5. Conclusions

On the basis of the experimental results the following conclusions can be drawn:



** - beton z węglanowym kruszywem łamanym

** - concrete with crushed carbonate aggregate

Rys. 7. Średnie wytrzymałości na ściskanie w wieku 28 dni w zależności od rodzaju cementu oraz napowietrzenia

Fig. 7. Average compressive strength of concretes in the age of 28 days depending on cement type and air entrainment

więc różnica skurczu betonów napowietrzonych z cementu hutniczego i portlandzkiego osiągnęła aż 26%.

Podobny przebieg miał skurcz próbek betonów nienapowietrzonych; największą wielkość wynoszącą $620 \cdot 10^{-6}$ po 330 dniach osiągnął kompozyt z cementu portlandzkiego. Natomiast odkształcenia skurczowe betonu z cementu portlandzkiego żużlowego wynosiły $350 \cdot 10^{-6}$, a z cementu hutniczego $320 \cdot 10^{-6}$, a więc były dużo mniejsze – odpowiednio o 43% i 49%, w porównaniu ze skurczem betonu z cementu portlandzkiego (rysunek 6). W przypadku próbek betonów nienapowietrzonych początkowy przebieg zmian skurczowych był zbliżony, a różnice zaczęły się zaznaczać po 30 dniach.

Wpływ napowietżenia mieszanek betonowych na skurcz można podsumować następująco. Wprowadzenie do mieszanki betonowej z cementu portlandzkiego około 3% dodatkowego powietrza, co spowodowało utworzenie porów powietrznych, w efekcie zmniejszyło o 12% i 15% skurcz, odpowiednio w przypadku betonu z łamanym kruszywem dolomitowym i z kruszywem naturalnym. Natomiast napowietżenie betonów z cementów zawierających żużel spowodowało zwiększenie skurczu, który był o około 30% większy niż betonów nienapowietrzonych.

3.2. Wytrzymałość betonów na ściskanie

Na rysunku 7 oraz w tabelicy 3 zestawiono średnie wartości wytrzymałości na ściskanie oraz ich klasyfikację zgodnie z PN-EN-206-1.

Jak należało oczekiwać napowietżenie betonu spowodowało zmniejszenie wytrzymałości betonu z cementu portlandzkiego o jedną klasę, natomiast w przypadku napowietżenia betonów z cementów CEM II/B-S i CEM III/A, o dwie klasy. Wytrzymałość na ściskanie betonu napowietżonego była średnio o 17-18% niższa niż betonu nienapowietżonego, co daje 5,2-5,5% spadku wytrzymałości na 1% napowietżenia.

5. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- skurcz napowietżonego betonu z cementu portlandzkiego jest mniejszy niż betonu nienapowietżonego,
- skurcz napowietrzonych betonów z cementów zawierających żużel wielkopieczowy (CEM II/B-S i CEM III/A) jest większy niż betonów nienapowietrzonych,
- porównanie skurczu napowietrzonych i nienapowietrzonych betonów z trzech rodzajów cementów pokazuje, że największy skurcz ma beton nienapowietrzony z cementu portlandzkiego CEM I, a najmniejszy beton nienapowietrzony z cementu hutniczego (CEM III/A),
- skurcz odwracalny (pęcznienie) dojrzałego betonu z cementu portlandzkiego jest większy niż betonów z cementów zawierających żużel,
- wyjaśnienie zagadnienia skurczu betonów napowietrzonych z dodatkiem żużla wielkopieczowego wymaga dalszych badań.

- the shrinkage of air-entrained concrete from Portland cement is lower than the non-air entrained one,
- the shrinkage of air-entrained concretes from cement containing slag addition (CEM II/B-S and CEM III/A) is higher than the non-air entrained concrete,
- the comparison of shrinkage of air entrained and non-entrained concretes produced from three kind of cements shows that the highest shrinkage reached the non-air entrained concrete from Portland cement CEM I, and the lowest the non-air entrained from Slag cement (CEM III/A),
- swelling of hardened concrete from Portland cement is higher than of concretes from cements with slag addition,
- the explanation of the problem of shrinkage of air-entrained concrete from cement with slag addition needs further studies.

Literatura / References

1. M. Buil, J. Baron, 7th ICCI Paris, III, s. VI-37, Paris 1980.
2. P. C. Aitcin P.C. Cement Wapno Beton , **70**, 115 (2003).
3. A. M. Neville, Właściwości Betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
4. W. Czernin, Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers, Bauverlag, Wiesbaden 1980.
5. W. A. Gutteridge, L. J. Parrott, Cem. Concr. Res., **6**, 357 (1976).