

Zastosowanie przyspieszonego twardnienia w przypadku samozagęszczającego się betonu

Accelerated curing for self-compacting concrete

Słowa kluczowe: samozagęszczający się beton, przyspieszone twardnienie w gorącej wodzie, właściwości samozagęszczającego się betonu po przyspieszonym twardnieniu

Keywords: self-compacting concrete, accelerated heat treatment curing, properties of SCC after accelerated hardening

1. Wprowadzenie

Technologia samozagęszczającego się betonu (SZB) została opracowana w Japonii, z końcem lat osiemdziesiątych. Jest to beton, który nie wymaga wibracji dla układania i zagęszczania (1), płynie pod wpływem siły ciężkości, wypełniając szczelnie szalunki, nawet w przypadku gęsto ułożonego zbrojenia. Stwardniały beton ma dużą szczelność, jednorodność oraz wykazuje te same właściwości, przede wszystkim trwałość, co tradycyjny, wibrowany beton. Płynność i odporność na segregację SZB daje duży stopień jednorodności, minimalną porowatość i dobrą wytrzymałość, zapewniając bardzo dobrą trwałość konstrukcji. Płynność, mała lepkość plastyczna są zaletami SZB.

Dodatki mineralne o dużej mianości, o wielkości cząstek mniejszej od 0,125 mm są zwykle stosowane w betonie jako wypełniacze, a także materiały pucolanowe lub o utajonych właściwościach hydraulicznych.

Czasami prace projektowe konstrukcji trwają zbyt długo i są za kosztowne, szczególnie w wyniku opóźnień w podejmowaniu decyzji w odpowiednim czasie (2). Realizacja projektu wymaga także dużego zaangażowania, jak nieco wcześniej prawidłowe dobranie składu mieszanki betonowej. Z tych powodów stosuje się przyspieszone dojrzewanie betonu, pozwalające na osiągnięcie potrzebnych wytrzymałości w krótkim czasie. Pozwala to równocześnie na usunięcie szalunków w ciągu 24 godzin, co skraca czas budowy i umożliwia zmniejszenie jej kosztów. Często stosowana technologia dojrzewania betonu obejmuje obróbkę parą pod ciśnieniem atmosferycznym, dojrzewanie w ciepłej lub gotującej się wodzie, a w końcu autoklawizację.

Podwyższenie temperatury na początku twardnienia przyspiesza hydratację cementu i w konsekwencji rozwój wytrzymałości. Sto-

1. Introduction

Self-compacting concrete (SCC), developed in Japan in the late 80's; is a concrete that does not require vibration for placing and compaction (1). It can flow under its own weight, filling the formwork completely, and achieving full compaction, even in presence of congested reinforcement. The hardened concrete is dense, homogeneous, has the same engineering properties and durability as traditional vibrated concrete. The fluidity and segregation resistance of the SCC ensures a high level of homogeneity, minimal concrete voids, and uniform concrete strength, providing the potential for a superior level of finish and durability to the structure. The flowability, viscosity and passing ability are advantageous properties of SCC.

Finely-divided inorganic material of particle size smaller than 0.125 mm are usually used in concrete as inert or pozzolanic/ latent hydraulic additions.

On the other hand, construction projects go sometimes through time and cost overrun, due to a delay in decision making in appropriate period (2). Many activities are involved in the execution of a project; finalization of the concrete mix proportions being an important issue. Accelerated curing is applied in concrete to achieve the required strength in short time. It is especially useful in the prefabrication industry. It enables the removal of the formwork within 24 hours, thereby reducing the cycle time, and resulting in cost-saving benefits. The most commonly adopted curing techniques are steam curing at atmospheric pressure, warm water curing, boiling water curing and autoclaving.

An increase in the curing temperature increases the rate of hydration of cement and the consequent strength development. Concerns with accelerated curing include, however, a potential for an increased moisture loss during the curing process and possible

sowanie przyspieszonego twardnienia stwarza jednak potencjalne ryzyko zwiększonej utraty wilgotności podczas tego procesu, co może mieć niekorzystny wpływ na trwałość betonu w długim okresie, a jest związane z wyższą temperaturą. Jak wiadomo mała przepuszczalność zewnętrznych warstw betonu ogranicza wnikanie agresywnych roztworów.

Skład betonu, dobór materiałów i warunki dojrzewania są podstawowymi czynnikami, które określają szybkość realizacji konstrukcji, a co może nawet ważniejsze, osiągnięcie założonej wytrzymałości i trwałości tego kompozytu. W pracy zbadano wpływ przyspieszonego początku twardnienia na podstawowe właściwości SZB, złożonego z różnych dodatków mineralnych, którymi zastępowano cement. Przyspieszone twardnienia zapewniono stosując gorącą wodę.

2. Doświadczenia

Jako spoiwo odniesienia stosowano przemysłowy cement CEM I 42.5 N. Jego skład chemiczny podano w tablicy 1; powierzchnia właściwa Blaine's wynosiła 370 m²/kg. Granulowanym żużlem wielkopieczowym zastępowano 50% cementu, uzyskując spoiwo C1. Skład chemiczny żużla podano także w tablicy 1, natomiast jego powierzchnia właściwa wynosiła 580 m²/kg.

Inny cement hutniczy C2 pochodził z przemysłowej produkcji i jest dostępny na rynku, a stosuje się go w specjalnych projektach budowlanych w Egipcie. W tym spoiwie 50% cementu odpornego na siarczan zastąpiono żużlem. Powierzchnia właściwa cementu C2 była równa 420 m²/kg według Blaine'a.

Trzeci cement C3 przygotowano w laboratorium zastępując 10% referencyjnego cementu CEM I pyłem krzemionkowym [PK] i 25%

detrimental effects on the long-term durability of concrete because of the high temperatures. Low permeability characteristics of the surface layer limit the ingress of substances that can initiate or propagate possible deleterious actions.

The concrete composition, material selection, and curing are crucial factors which determine the speed of realizing the target strength and durability. In this work, the effect of accelerated curing on some fundamental properties of self-compacting concrete composed of different supplementary cementitious materials is studied. The accelerated curing is achieved with hot water.

2. Experimental

The reference binder used in this work is CEM I 42.5 N supplied from the local market. Its oxide composition is given in Table 1 and its Blaine area is 370 m²/kg. Commercial granulated blast furnace slag was utilized to replace 50% of the reference cement to produce C1. The oxide composition of the slag is shown in Table 1, its fineness amounts to 580 m²/kg.

Another slag cement (C2) prepared for special construction projects in Egypt was provided from the market. In this cement, 50% of sulfate resisting cement was replaced by slag. The Blaine area of the cement was 420 m²/kg.

A third cement (C3) was prepared in the laboratory by replacing the reference cement CEM I by 10% of silica fume (SF) and 25% of fly ashes (FA). The oxide compositions of both admixtures are given in Table 1. The BET surface area of silica fume was 2100 m²/kg and the fineness of the fly ash was Blaine's 330 m²/kg.

Self-Compacting Concrete (SCC) was prepared from the cements according to ASTM 237R-07. The target compressive strength was

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY SKŁADNIKÓW SPOIW, %

THE CHEMICAL COMPOSITION OF BINDER COMPONENTS, %

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl	LOI	P ₂ O ₅
CEM I 42.5 N	20.39	3.95	3.66	62.18	1.71	0.60	0.40	2.86	0.06	4.08	n.d.
Slag	34.52	11.81	1.24	35.60	8.00	0.21	0.76	0.77	0.04	5.00	n.d.
Silica fume	95.3	0.23	0.66	0.76	0.40	0.23	0.71	0.46	n.d.	0.72	0.1
Fly ash	59.60	22.30	6.57	1.67	1.93	0.88	2.11	1.41	n.d.	1.77	0.27

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD SAMOZAGĘSZCZAJĄCEGO SIĘ BETONU

THE MIX PROPORTION OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Designation	Aggregates, kg		Binder constituents, Kg					Water, Liter	Superplasticizer, liter
	sand	Crushed stone	CEM I 42.5 N (C)	SRC/Slag (C2)	Slag	SF	FA		
SCC/ C	742.5	907.5	450		-----	-----	-----	166.5	2
SCC/ C1	742.5	907.5	225		225	-----	-----	166.5	1.5
SCC/ C2	742.5	907.5		450				166.5	1.0
SCC/ C3	742.5	907.5	292.5		-----	45	112.5	166.5	1.5

popiołem lotnym [PI]. Skład chemiczny obu dodatków mineralnych podano w tablicy 1. Powierzchnia właściwa BET pyłu krzemionkowego wynosiła 2100 m²/kg, a popiołu lotnego 330 m²/kg, według Blaine'a.

Beton samozagęszczający się przygotowano z tych cementów zgodnie z normą ASTM 237R-0.7. Przyjęto docelową wytrzymałość betonu na ściskanie równą 50 MPa. Jako kruszywo drobne stosowano piasek, a grube stanowił dolomit łamany; jego udział wynosił 55%. Całkowita zawartość spoiwa wynosiła 450 kg/m³ betonu, a stosunek w/c był równy 0,37. Jako domieszkę stosowano polycarboksylany, w celu zapewnienia średnicy rozplywu 650 do 800 mm. Skład mieszanki betonowej z cementu odniesienia C, cementów hutniczych C1 i C2, a także ze spoiwa, w którym część cementu zastąpiono pyłem krzemionkowym i popiołem lotnym C3, podano w tablicy 2.

Mieszankę betonową przygotowano w mieszalniku o pojemności 0,05 m³ zgodną z normą ASTM C192/C 192M (2004). Grube i drobne kruszywo wsypywano do mieszalnika i mieszano z połową wody zarobowej przez 1 minutę. Następnie wsypywano spoiwo i szybko uruchamiano mieszalnik, podając równocześnie pozostałą ilość wody z superplastyfikatorem. Drugi czas mieszania wynosił 2 minuty. Rozlew mieszanki SZB mieścił się pomiędzy 730 a 750 mm. Właściwości świeżej mieszanki badano stosując T-50, pojemnik L, lejek V, a wyniki podano w tablicy 3.

Z mieszanki SZB przygotowano kostki o wymiarach 10 cm, które poddano przyspieszonemu twardnieniu w następującym cyklu: 2 godziny podgrzewania w wodzie od temperatury pokojowej do 65°C, wygrzewanie w tej temperaturze przez 14 godzin i chłodzenie w ciągu 15 minut do temperatury pokojowej. Ten sam cykl, jednak z temperaturą maksymalną 85°C, powtórzono dla drugiej serii próbek. Wytrzymałość na ściskanie mierzono po 3, 7, 28 i 56 dniach, zgodnie z normą ASTM C39.

Zdolność do absorpcji wody kostek mierzono zgodnie z normą ASTM C1585. Całkowitą porowatość oznaczano na kostkach o wymiarach 5 cm, które poddano wcześniej przyspieszonemu twardnieniu. W trakcie badań próbki zanurzano w wodzie na 24 godziny, po czym ważono w suchym powietrzu, jednak w warunkach ich powierzchni nasyconych wodą, a ich masę oznaczano W1. Następnie próbki suszono w piecu w 105°C i ważono, oznaczając ich masę W3. Porowatość całkowitą w obliczono stosując wzór:

$$(W1 - W3)/V \cdot 100 \text{ w } \%$$

gdzie V jest objętością próbki.

Równoległą serię kostek i beleczek zanurzono w 5% roztworze Na₂SO₄·10H₂O, oznaczając wytrzymałość i ekspansję w ciągu 56 dni; beleczki o wymiarach 25,4x25,4x28,5 mm służyły do pomiarów ekspansji.

50 N/mm². Fine sand and dolomitic crushed stone were used as aggregates with a ratio of 0.55. The total binder content used was 450 kg/m³ concrete and the water/binder ratio was 0.37. A commercial polycarboxylate admixture was selected to produce a slump flow of 650-800 mm. The mix proportions of the concrete produced from the reference cement C, the slag cements (C1 and C2) as well as from the silica fume/fly ash cement (C3) are given in Table 2.

The fresh SCC mixtures were prepared using a mixer with a nominal capacity of 0.05 m³ conforming to ASTM C192/C 192M (2004). The coarse and fine aggregates were charged first into the mixer and were mixed with one-half of the mixing water for 60 seconds. The mixer was stopped, the cementing materials were charged and the mixer was quickly restarted during the addition of the second-half of water with superplasticizer. The mixing time was 120 seconds. The slump flow for the SCC mixes varied between 730 and 750 mm. The properties of fresh concrete mix as measured by T-50 (s), L-Box and V-Funnel (0.5s) are cited in Table 3.

10x10x10 cm cubic samples were cast from the different mixes and subjected to an accelerated curing cycle as follows: 2 hours heating in water from room temperature to 65°C, holding the sample 14 hours at 65°C, cooling to room temperature for 15 minutes then leaving the samples in air. The same cycle was repeated for another group of samples by heating up to 85°C. The compressive strength was measured after 3, 7, 28 and 56 days according to ASTM C39.

The water absorption capacity of the cubes was determined by immersion, according to ASTM C1585. The total porosity was determined on 5x5x5 cm of the heat cured cubic samples as follows: at the time of test, the specimens were immersed in water for 24 hours and weighed in saturated-surface under dry condition, the respective weight was denoted by (W1). The specimen was oven dried at 105°C for 24 hours and the weight (W3) was recorded. The total porosity was calculated using the following equation: Total porosity, % = (W1-W3)/V·100, where (V) is the volume of the specimen.

A parallel series of the heat-cured cubic and prism samples were immersed in 5% sodium sulfate decahydrate solution. The compressive strength and expansion was measured for times up to 56 days; 25.4x25.4x28.5 mm prisms were used to measure the expansion.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEJ MIESZANKI SAMOZAGĘSZCZAJĄCEGO SIĘ BETONU

THE PROPERTIES OF THE FRESH MIX OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Mix ID	SCC/C	SCC/C1	SCC/C2	SCC/C3
Slump flow, mm	730	730	740	750
T-50, s	6.5	6	6	7
L-Box	0.93	0.97	1	0.92
V-Funnel, 0.5s	5.5	6	5	5

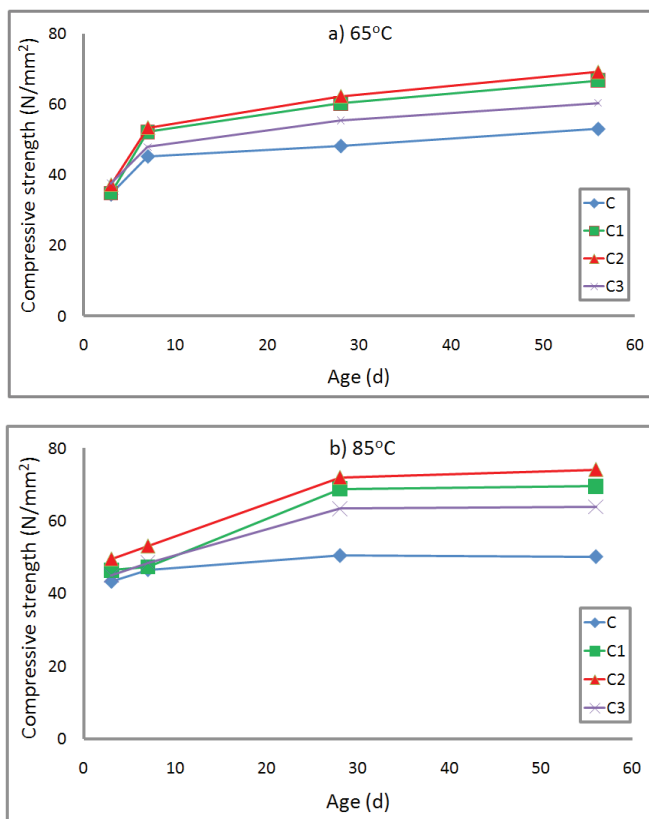
3. Wyniki

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Na rysunku 1 pokazano wytrzymałość próbek SZB poddanych przyspieszonemu twardnieniu w 65°C i 85°C, a następnie dojrzewających przez 56 dni w powietrzu, w laboratorium. Krzywe zmian wytrzymałości pokazują, że cementy z dodatkami to jest C1, C2 i C3 mają lepszą wytrzymałość w stosunku do próbek z cementu odniesienia, twardniejących w obu temperaturach. Po 56 dniach dojrzewania wytrzymałość próbek z cementów z dodatkami wzrastają z podwyższeniem temperatury twardnienia o około 5%, natomiast wytrzymałość próbki wzorcowej maleje mniej więcej o tę samą wielkość.

Największą wytrzymałość miały próbki SZB/C2 z cementu z klinieru odpornego na siarczany z żużlem, a następnie kolejno SZB/C1 z CEM I z żużlem i SZB/C3 z cementu, do którego w laboratorium dodano pył krzemionkowy i popiół lotny. Po twardnieniu w 65°C i 85°C wytrzymałość po 56 dniach próbek SZB/C2 była większa od próbek z cementu odniesienia odpowiednio o 30% i o 40%.

Należy podkreślić, że w przypadku obu temperatur twardnienia docelowa wytrzymałość 50 MPa została osiągnięta przez wszystkie próbki SZB z cementów z dodatkami mineralnymi. Wytrzymałość próbek SZB z cementu odniesienia, po twardnieniu w 65°C i 85°C, wyniosła także 50 MPa, jednak dopiero po 56 dniach.



Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie próbek z SZB twardniejących w temperaturach 65°C i 85°C, a następnie dojrzewających w powietrzu przez 56 dni

Fig. 1. The compressive strength of self-compacting concrete samples cured at 65°C and and 85°C and left in air for time up to 56 days

3. Results

3.1 Compressive strength

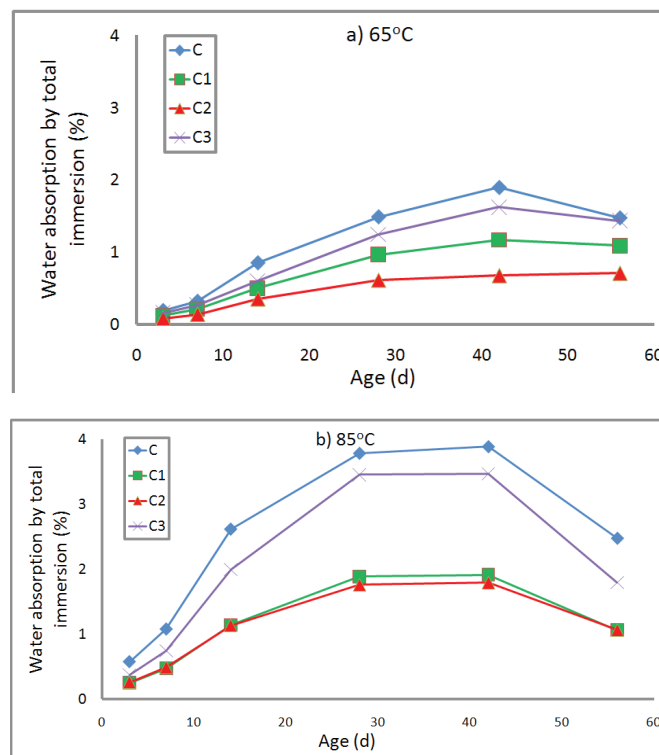
The compressive strength results of the SCC samples cured at 65°C and 85°C and exposed to air for time up to 56 days are shown in Fig. 1. It is clear from the figure that the strength curves of the SCC specimens made with the blended cements (C1, C2 and C3) are higher than that of the reference at both curing temperatures. At 56-day, the strength of the SCC/blended cements increase with increasing the curing temperature by an average of ~5.5%, and the strength of the SCC/reference decreases by almost the same percentage.

The highest strength are obtained for the SCC/C2 made of sulfate resisting cement and slag, followed by SCC/C1 made of CEM I and slag, then SCC/C3 prepared with silica fume and fly ash. At 65°C and 85°C, the 56-day strength of the SCC/C2 are higher than those of the reference by around 30% and 46% respectively.

It is noted that at both temperatures, the target strength of 50 N/mm² is attained after 28 days for all SCC made of the blended cements. This strength was measured also for the SCC/reference cured at 85°C and at 65°C, however, for these samples the target strength is realized only after 56 days.

3.2. Water absorption

The water absorption capacity of the SCC samples cured at 65°C and 85°C is shown in Fig. 2. The curves show an increase in the



Rys. 2. Absorpcja wody próbek SZB, twardniejących w temperaturze 65°C i 85°C w funkcji czasu

Fig. 2. The water absorption capacity of SCC samples cured at 65°C and 85°C with time

3.2. Absorpcja wody

Na rysunku 2 pokazano krzywe absorpcji wody próbek twardniejących w 65°C i 85°C. Krzywe na tym rysunku wykazują wzrost absorpcji z czasem aż do 42 dni, po których następuje spadek, w okresie do 56 dni. Największą absorpcją wody cechowały się próbki SZB z cementu odniesienia, twardniejące w 65°C, które po 42 dniach osiągnęły absorpcję 1,9%. Uległa ona prawie podwojeniu w próbkach z tego cementu, twardniejących w 85°C, osiągając około 3,9%.

SZB z dodatkiem pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego wykazał drugą w kolejności największą absorpcję wody, przy czym wielkości maksymalne osiągnęły 1,6% i 3,5% po 42 dniach zanurzenia w wodzie, w przypadku próbek twardniejących odpowiednio w 65°C i 85°C.

Próbki SZB z cementów C1 i C2 zawierających żużel wykazują mniejszą absorpcję od próbek z cementu odniesienia i cementu z dodatkami pyłu krzemionkowego oraz popiołu lotnego w przypadku obu temperatur przyspieszonego twardnienia, przy czym różnica jest większa w przypadku twardnienia w temperaturze 85°C. W przypadku próbek z cementów z żużlem twardniejących w tej temperaturze absorpcja wody po 56 dniach jest mniejsza o około 56% od próbek referencyjnych.

3.2. Porowatość

Całkowita porowatość próbek SZB wykazuje taką samą tendencję ogólną jak absorpcja wody, co pokazano na rysunku 3. Próbka SZB z CEM I ma największą porowatość w porównaniu do innych próbek SZB; jej wielkość wzrasta do 42 dnia, a następnie wykazuje mały spadek. Porowatość tej próbki odniesienia wrasta od 10% do 24% z podwyższeniem temperatury twardnienia z 65°C do 85°C, a w przypadku próbki po 56 dniach wrasta nawet o 34%.

Próbki SZB z cementów z dodatkami twardniejące w 65°C mają mniejszą porowatość od wzorcowej. Po 56 dniach próbki z SZB z cementów z żużlem mają średnią porowatość mniejszą od próbki odniesienia o 24%, natomiast z SZB z dodatkami pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego wykazują mniejszą porowatość od wzorca tylko o 13,6%.

3.2. Odporność na siarczany

Z pośród próbek twardniejących w 65°C najlepszą odporność wykazują te z cementu odpornego na siarczany z dodatkiem żużla [rysunek 4]; po 28 i 56 dniach mają wytrzymałość odpowiednio około 70 MPa i 77 MPa. Inne próbki SZB z CEM I z żużlem [C1] oraz z pyłem krzemionkowym i popiołem lotnym [C3] mają bardzo podobną wytrzymałość, wynoszącą około 60 MPa. Najmniejszą wytrzymałość na ściskanie wykazał SZB z CEM I. Twardnienie w 85°C spowodowało wyraźne zmniejszenie wytrzymałości próbek referencyjnych SZB/C jak również dwóch betonów z CEM I z dodatkiem żużla [SZB/C1] oraz CEM I/Pk-PI [SZB/C3].

absorption values with time up to 42 days, followed by a drop after 56 days. The highest water absorption curve is found for the SCC/reference (CEM I) after curing at 65°C, which leads to a maximum absorption value of ~1.9% in the 42-day sample, this value is almost doubled to ~3.9% upon curing at 85°C.

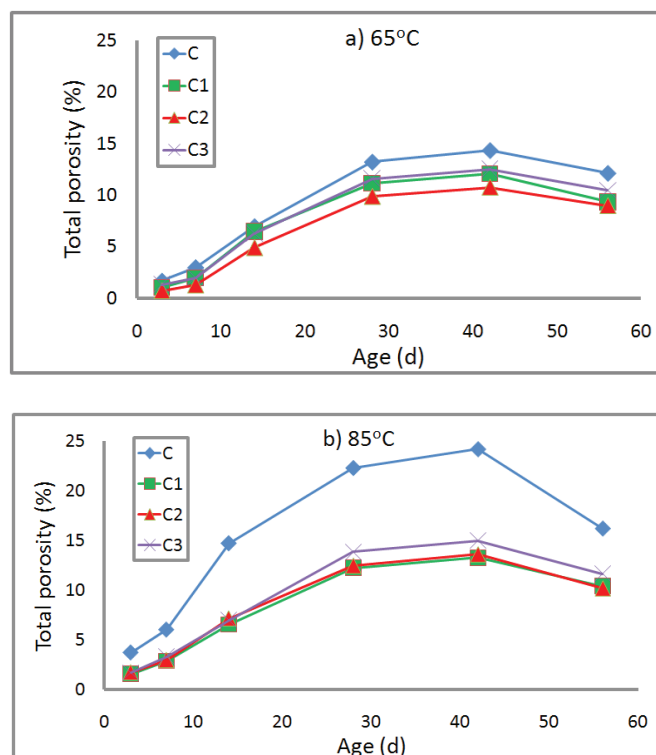
The SCC/C3 with silica fume and fly ash shows the second highest water absorption curve with maximum values of 1.6% and 3.5% in the 42-day samples cured at 65°C and 85°C respectively.

The slag-bearing SCC specimens made from C1 and C2 cements, indicate absorption curves lower than those of the reference and the SCC/SF-FA at both temperatures; the difference being more significant upon curing at 85°C. At this temperature, the 56-day water absorption capacity of the samples from cement with slag are lower than the reference by an average of ~56%.

3.2. Porosity

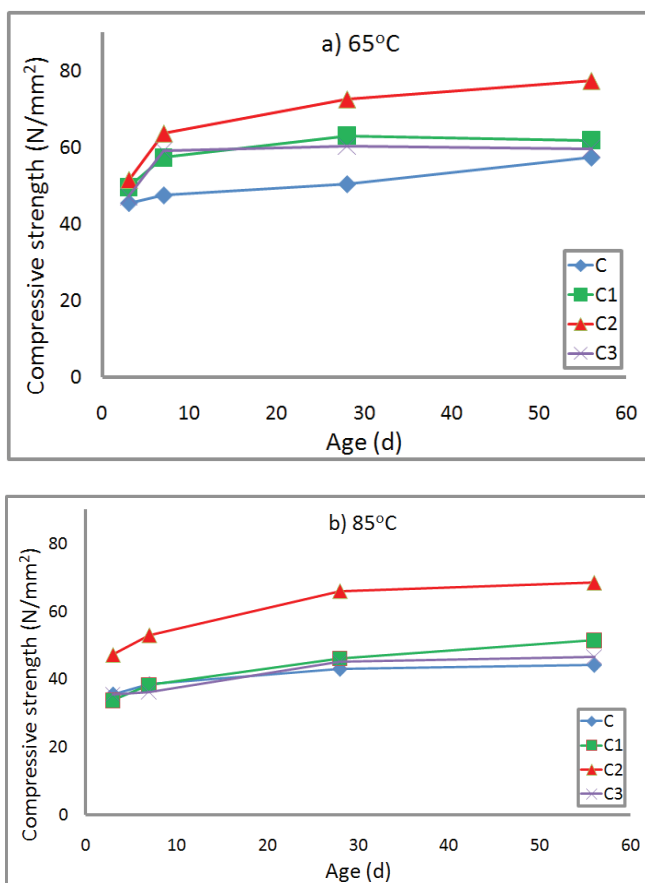
The total porosity of the SCC samples follows the same general trend of the water absorption capacity as indicated in Fig. 3. The SCC/reference (CEM I) shows the highest porosity relative to the other SCC specimens; the values rise within 42 days then undergo a slight decrease. The 42-day value of the reference concrete increases from 10% to 24% with increasing the curing temperature from 65°C to 85°C, that of the 56-day sample increases by 34%.

At 65°C, the porosity curves of the SCC/blended cements are lower than that of the reference. After 56 days, the SCC/slag cements show an average decrease from the value of the reference



Rys. 3. Całkowita porowatość próbek z SZB twardniejące w 65°C i 85°C w funkcji czasu

Fig. 3. The total porosity of SCC samples cured at 65°C and 85°C with time



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie próbek samozagęszczającego się betonu twardniejącego w 65°C i 85°C, a następnie zanurzonego w roztworze siarczanu sodu na okres 56 dni

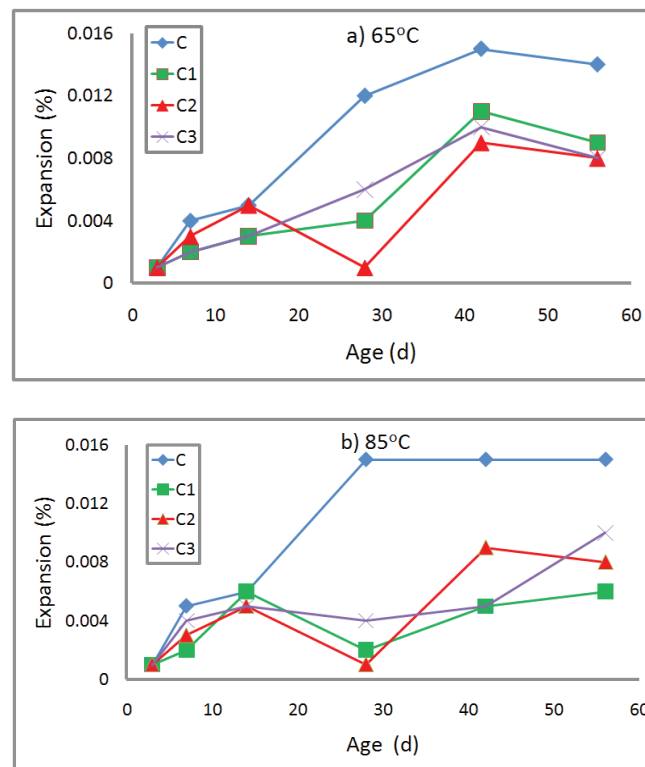
Fig. 4. The compressive strength of self-compacting concrete samples cured at 65°C and 85°C then immersed in sulfate solution for time up to 56 days

SZB/C2 z cementu odpornego na siarczany z dodatkiem żużla wykazał dużą odporność na korozję siarczanową i zmniejszenie wytrzymałości wyniosło w jego przypadku tylko 9%.

Ekspansja próbek betonu odniesienia w roztworze siarczanowym jest największa; trzy rodzaje próbek SZB z żużlem oraz z popiołem lotnym i pyłem krzemionkowym, twardniejące w obu temperaturach, wykazują lepsze właściwości po korozji siarczanowej [rysunek 5]. Ekspansja tych ostatnich jest mniejsza od próbek odniesienia i ich wyniki różnią się mniej niż o 0,1%.

4. Omówienie wyników

Wczesną wytrzymałość na ściskanie SZB można uzyskać stosując wyższą temperaturę twardnienia, w warunkach dużej wilgotności. Jest oczywiste, że w tych badaniach zachowano dużą wilgotność w trakcie twardnienia próbek w gorącej wodzie, co zapewniło dobrą wytrzymałość na ściskanie w badanym okresie. Wystąpiło także szybkie zwiększenie wytrzymałości ze wzrostem temperatury twardnienia z 65°C do 85°C. Wiadomo powszechnie, że proces hydratacji ulega przyspieszeniu ze wzrostem temperatury; znane jest także równanie Arrheniusa opisujące to zjawisko.



Rys. 5. Rozszerzalność próbek samozagęszczającego się betonu twardniejącego w 65°C i 85°C, a następnie zanurzonego w wodnym roztworze siarczanu sodu na 56 dni

Fig. 5. The expansion of self-compacting concrete samples cured at 65°C and 85°C then immersed in sulfate solution for time up to 56 days

of 24%, the SCC/C3 with fly ash and silica fume decreases by an amount of 13.6% only.

At 85°C, the difference between the reference curve and those of the SCC/ blended cements is greater: the porosity of the 56-day SCC/slugs (C1 and C2) samples are lower than the reference by an average of 36.5% and show the best performance. The porosity of the fly ash/silica fume samples (SCC/C3) is lower than the reference by an amount of 30%.

3.2. Sulfate resistance

At a curing temperature of 65°C the SCC/C2 specimens made of sulfate resisting cement and slag show the best resistance to sulfate solution [Fig. 4]; the 28-day and 56-day samples indicate strength of ~70 MPa and 77 MPa respectively. The other two SCC samples made of CEM I/slag (C1), and of CEM I/silica fume-fly ash (C3) overlap and show values of around 60 MPa. The lowest compressive strength is for the reference SCC made of CEM I. Curing at 85°C leads to a clear drop in the compressive strength of the reference SCC/C, as well as of the two concretes made of CEM I/slag (SCC/C1) and of CEM I/SF-FA (SCC/C3). The SCC/C2 made of sulfate resisting cement and slag show the high resistance to sulfate attack and its drop of compressive strength was by 9% only.

At both temperatures, the expansion of the reference sample in sulfate solution is the highest, the three other SCC with slag, si-

Uzyskane wyniki wykazały najlepsze właściwości próbek SZB z hutniczego cementu. Jak można było oczekiwać także właściwości przemysłowego cementu hutniczego uzyskanego z odpornego na siarczany klinkieru były lepsze od klasycznego cementu hutniczego. Mała przepuszczalność betonu z cementu hutniczego, wynikająca z jego mniejszej porowatości, spowodowała jego lepsze zachowanie w badaniach od SZB z cementu zawierającego równoczesny dodatek pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego. Zgodnie z pracą (3) beton z cementu odpornego na siarczany wykazał dużą zdolność do zwiększania wytrzymałości z temperaturą twardnienia, a jego mała zawartość C_3A była także korzystna z punktu widzenia zjawiska opóźnionego powstawania ettringitu i związanej z tym mniejszym zwiększeniem porowatości próbek. Wyniki związane z absorpcją wody i porowatością pozwalają na stwierdzenie, że pył krzemionkowy i popiół lotny nie są najlepszymi dodatkami mineralnymi w przypadku stosowania obróbki cieplnej betonu, w której przypada ona w początkowym okresie twardnienia betonu. Znacznie lepszym dodatkiem jest żużel.

5. Wnioski

Samozagęszczający się beton poddany przyspieszonemu twardnieniu, przy czym wykonany z cementu z dodatkami mineralnymi zastępującymi część CEM I, zapewnia lepsze właściwości tego kompozytu w porównaniu do betonu z klasycznego CEM I.

Podwyższenie temperatury twardnienia w jego początkowym okresie zwiększa wytrzymałość na ściskanie próbek dojrzewających następnie w powietrzu, jednak zmniejsza odporność tych próbek na korozję siarczanową.

Zwiększenie temperatury twardnienia próbek SZB z cementu odpornego na siarczany z dodatkiem żużla powoduje ich najlepsze właściwości z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie, absorpcję wody, porowatość i odporność na siarczany. Korzystne właściwości wykazują także próbki z SZB z cementu hutniczego, lepsze od próbek z cementu z równoczesnym dodatkiem pyłu krzemionkowego i popiołu lotnego

Literatura / References

1. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, May 2005
2. V V, Arora, S., Kumar, M.K., Mandre, Development of accelerated mix design method for concrete using PPC or OPC with fly ash. National Council for Cement and Building Materials www.ncbindia.com
3. G. M., Habeeb, M.M. Kadhum, E.K., Harith, The effect of accelerated curing on some mechanical properties of self compacting concrete containing reactive metakaolin. Journal of League of Arab Universities for Studies and Engineering Research, **22 (1)**, 2015.

silica fume and fly ash indicate a better performance with age and temperature [Fig. 5]: their expansion values are lower than that of the reference and all values lay less than 0.1%.

4. Discussion

High early concrete compressive strength is most efficiently produced by increasing the heat of hydration of cement used while maintaining a high moisture content in the curing environment. In this research, the moisture used was enough during the heat curing with hot water and the SCC developed acceptable compressive strength with time. The chemical reactions involved in hardening was accelerated and the hydration process hastened. There was a rapid gain of strength with increasing the curing temperature from 65°C to 85°C. Hydration, comprises several exothermal reactions with heat evolution; simultaneously it is well known that hydration is accelerated by temperature – the most popular description of this influence is the Arrhenius' equation.

The results show the best performance for the SCC made of slag cements. The performance of the slag cement mixed with sulfate resisting cement is more superior than the cement composed of a mixture of slag and CEM I. The low permeability of concrete with slag because of its low porosity makes it more advantageous compared to SCC with silica fume and fly ash. In accordance to the literature (3), the sulfate resisting cement shows a good capacity of gaining strength with temperature, its low C_3A content makes it easier in avoiding the delayed ettringite formation and the respective change in the porosity of the sample. The water absorption behavior and the porosity results indicate that the silica fume and fly ash are not suitable mineral additives if heat treatment is applied during hardening at early age of concrete. Much better additive is slag.

5. Conclusions

Self-compacting concrete subjected to accelerated curing and made of supplementary cementitious materials replacing partially CEM I 42.5 N, improve the performance of the concrete made of CEM I only.

Increasing the temperature of the accelerated curing at very early age lead to an increased compressive strength for the samples stored in air but decreases that of the samples exposed to sulfate solution.

Heat cured SCC specimens made of sulfate resisting cement and slag show the best performance with respect to compressive strength, water absorption, porosity, and sulfate resistance. It is followed by the SCC specimens made of slag and CEM I then the SCC prepared from CEM I, silica fume and fly ash.