

Właściwości samozagęszczalnego betonu z popiołem lotnym poddanego wewnętrznej pielęgnacji

Transport properties of internally cured self-compacting concrete with fly ash

J. Shanmugapriya^{1,*}, K. Chinnaraju²

¹ Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala R&D Institute of Science & Technology, Chennai-600 071

² College of Engineering Guindy, Anna University, Chennai-600 025

*Corresponding author: J. Shanmugapriya, e-mail: drpriyaj@veltech.edu.in

Streszczenie

Właściwa pielęgnacja i optymalizacja procesu dojrzewania betonu mają znaczący wpływ na jego właściwości transportowe, co z kolei wpływa na jego właściwości mechaniczne i trwałość. W niniejszym artykule zbadano wpływ popiołu lotnego na wewnętrzną pielęgnację i właściwości mieszanki betonu samozagęszczalnego w różnych warunkach otoczenia. Do badań wybrano dwa materiały do wewnętrznej pielęgnacji: lekkie kruszywo keramzytowe [LECA] oraz polimer superabsorbujący [SAP]. Przedstawiono właściwości takie jak sorpcyjność, odporność na penetrację jonów chlorkowych oraz migrację jonów chlorkowych w próbkach betonów ze zmiennym udziałem procentowym popiołu lotnego w zakresie 30% ÷ 50% w różnych warunkach dojrzewania, mianowicie konwencjonalnym dojrzewaniu w warunkach otoczenia, dojrzewaniu z ograniczonym dostępem powietrza z dodatkami do wewnętrznej pielęgnacji oraz dojrzewaniu w warunkach otoczenia z dodatkami do wewnętrznej pielęgnacji. Wyniki wskazują, że szczelność betonu poprawiła się wraz ze zwiększeniem udziału procentowego popiołu lotnego dzięki obecności wody pochodzącej z wewnętrznej pielęgnacji, wpływającej na proces hydratacji oraz popiołu lotnego, który obniża ciepło hydratacji i skurcz spowodowany wysychaniem. Efektywność wewnętrznej pielęgnacji również poprawiła się wraz ze zwiększeniem udziału popiołu lotnego w próbkach. W warunkach otoczenia, mieszanki z zamianą popiołu lotnego powyżej 45% wykazały najlepsze właściwości mechaniczne, z powodu zmiany struktury porowatości prowadzącej do lepszych właściwości transportowych betonu [mniejszej przepuszczalności].

Słowa kluczowe: wewnętrzna pielęgnacja, beton samozagęszczalny, nasiąkliwość, popiół lotny

Summary

Proper curing of concrete has a major beneficial effect on the transport properties of concrete which in turn influences its durability. This paper attempts to study the effect of fly ash on the transport properties of internally cured Self-Compacting Concrete specimens under ambient conditions. Two internal curing materials, Lightweight Expanded Clay Aggregates [LECA] and Superabsorbent Polymer [SAP] were chosen for the study. Properties such as sorptivity, resistance to chloride ion penetration and chloride ion migration specimens with varying percentages of fly ash replacement from 30% to 50% are presented under different curing conditions namely conventional curing, sealed curing with internal curing materials and ambient curing with internal curing materials. The results showed that the impermeability of concrete improved with an increasing percentage of fly ash replacements owing to the presence of internal curing water to improve hydration along with fly ash that moderates the heat of hydration and drying. The internal curing efficiency also improved with the increase in the percentage of fly ash replacement. Under ambient conditions, the mixes with fly ash above 45% replacement have shown very good mechanical and durability properties indicating a refined pore structure leading to enhanced transport properties.

Keywords: internal curing, self compacting concrete, sorptivity, fly ash, transport properties

1. Wprowadzenie

Pielęgnacja jest kluczowym czynnikiem w trakcie betonowania, ponieważ wpływa na wytrzymałość, trwałość i jakość betonu. Wewnętrzna pielęgnacja to metoda wpływająca na proces dojrzewania betonu od wewnątrz. Polega na wprowadzeniu do betonu dodatków, które służą jako wewnętrzne rezerwuary wody. Materiały te absorbują i zatrzymują wodę, a następnie uwalniają ją podczas procesu hydratacji w kompozycie betonowym. Zwiększa to postęp hydratacji betonu i ma korzystny wpływ na jego wytrzymałość i trwałość. Wewnętrzna pielęgnacja jest korzystna także w kontekście zmniejszenia pęknięć skurczowych (1).

W niniejszym artykule przyjęto koncepcję wewnętrznej pielęgnacji w betonie samozagęszczalnym [SCC] zawierającym popiół lotny jako dodatek mineralny i zbadano właściwości transportowe mieszanki betonowej takie jak sorpcyjność, RCPT [z ang. Rapid Chloride Permeability Test] i RCMT [z ang. Rapid Chloride Migration Test]. Rola popiołu lotnego w poprawie właściwości betonu oraz efektywności wewnętrznej pielęgnacji jest kluczowa, dlatego dokonano porównania mieszanek SCC z różną zawartością popiołu lotnego do 180 dni dojrzewania. Zwiększenie udziału popiołu lotnego w mieszance betonowej zastępującego cement powoduje zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie w czasie dojrzewania do 28 dni (2,3). Zanotowano także wydłużenie czasu wiązania. Ponadto, urabialność mieszanki betonowej poprawia się wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego (4, 5), co ma korzystny wpływ w technologii betonu samozagęszczalnego. Dodatkowo, zwiększa się szczelność betonu z około 70% zamianą popiołu lotnego, co wskazuje na drobniejszą strukturę porów (3). Sorpcyjność i przepuszczalność chlorków również maleją wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego (6). Niniejsze badania wskazują na korzyści płynące z zastosowania popiołu lotnego w SCC w kontekście poprawy urabialności, efektywności utwardzania oraz właściwości mieszanki betonowej w transporcie.

Materiały użyte do wewnętrznej pielęgnacji to lekkie kruszywo keramzytowe oraz polimer superabsorbujący [SAP]. Koncepcja wewnętrznej pielęgnacji polega na wprowadzeniu do wnętrza betonu materiału zawierającego wodę co wpływa na proces hydratacji spoiwa oraz skurcz chemiczny zaczynu. Optymalny udział dodatku do wewnętrznej pielęgnacji zależy od zdolności absorpcji, desorpcji i stopnia nasycenia materiału pielęgnującego (7). Badanie wpływu wewnętrznej pielęgnacji z użyciem lekkich kruszyw keramzytowych na wnikanie chlorków (8) wykazało, że głębokość penetracji chlorków w zaprawach jest mniejsza niż w mieszankach bez dodatku pielęgnującego. Inne badanie dotyczące sorpcyjności i przewodności elektrycznej betonów z użyciem suchych i wstępnie nasączonych lekkich kruszyw wykazało, że zarówno sorpcyjność jak i przewodność elektryczna były mniejsze dla zapraw z wstępnie nasączonymi kruszywami, co stanowi dowód na zwiększoną szczelność i zmniejszoną przepuszczalność (9). Wewnętrzna pielęgnacja z użyciem SAP spowodowała zwiększenie wytrzymałości na ściskanie oraz zmniejszenie przepuszczalności chlorków i absorpcji wody.(10). Tak więc wewnętrzna pielęgnacja pomaga

1. Introduction

Curing is a vital step in concreting as it influences the strength, durability and robustness of concrete system. Internal curing is a method of curing the concrete from the inside with the help of materials that serve as internal reservoirs. These materials absorb and retain the water from the surroundings and release the water as the hydration process proceeds in the concrete system. This enhances the hydration of concrete, thereby providing promising performance in terms of strength and durability. Internal curing is advantageous in terms of increased hydration, reduced shrinkage cracking and increased durability (1).

This paper adopts the concept of internal curing in Self-Compacting Concrete [SCC] with fly ash as mineral admixture and studies the transport properties such as sorptivity, RCPT [Rapid Chloride Permeability Test] and RCMT. The role of fly ash in improving the transport properties of concrete as well as the internal curing efficiency is significant and hence a comparison of SCC mixes with different percentages of fly ash is made at ages up to 180 days. When fly ash is used in concrete, there is an obvious reduction in the strength of concrete at ages up to 28 days, with an increase in the percentage of fly ash replacement (2, 3) and also the setting time increased. Moreover, the workability increases with an increase in the percentage of fly ash (4, 5) which turns out to be a major advantage for self-compacting concrete. Also, the water absorption of concrete with around 70% fly ash replacement, shows a lesser tendency towards water absorption which is an indication of finer pore structure (3). The sorptivity, and chloride permeability also decrease with increasing fly ash percentage (6). This study has attempted to take the benefit of using fly ash in SCC for improving the workability, curing efficiency and transport properties of internally cured SCC under ambient conditions.

The materials used for internal curing in this study are lightweight expanded clay aggregates and superabsorbent polymers [SAP]. The concept of internal curing lies in supplying the required amount of curing water through internal reservoirs which depends on binder content, chemical shrinkage of paste and the expected degree of hydration. The optimal dosage of the internal curing material is dependent on the absorption, desorption capacity and degree of saturation of the curing material (7). A study on the influence of internal curing using lightweight expanded clay aggregates on the chloride ingress (8), has shown that the chloride penetration depth of internally cured mortars is lesser than the mixes without internal curing. Another study on the sorptivity and electrical conductivity of mixes with internal curing using dry and pre-soaked lightweight aggregates has revealed that the sorptivity and electrical conductivity were less for mortar mixes with pre-soaked aggregates which stand as proof of enhanced impermeability (9). Similarly, internal curing with SAP has shown an increase in compressive strength and a reduction in chloride permeability and water absorption in sealed conditions (10). Thus internal curing helps in reducing self-desiccation and improves hydration. Though hydration is enhanced, there are several factors such as the density of the curing material

w zmniejszeniu negatywnego efektu samoosuszenia i wpływa na hydratację spoiwa. Mimo to, że postęp hydratacji jest większy, istnieje kilka czynników, takich jak gęstość dodatku pielęgnującego lub ilość porów powietrznych wywołanych obecnością polimeru superabsorbującego, które z kolei zmniejszają wytrzymałość betonu na ściskanie. Jednakże poprawie ulegają przepuszczalność i penetracja chlorków (11). W betonach zawierających dodatki mineralne wewnętrzna pielęgnacja poprawia wytrzymałość w późniejszych okresach dojrzewania, ponieważ woda wprowadzona przez dodatki pielęgnujące jest dostępna przez dłuższy czas i umożliwia przebieg reakcji pucolanowej i opóźnia powstawanie rys skurczowych (12). Zazwyczaj wewnętrzna pielęgnacja jest stosowana w warunkach gdzie próbki przechowywane są w szczelnych pojemnikach. Jednakże, przeprowadzono również badania dotyczące wpływu niekorzystnych warunków powietrzno-suchych. Gdy mierzono wilgotność względną wewnątrz materiału próbki betonu przechowywane w warunkach naturalnego wysychania miały gwałtowny spadek wewnętrznej wilgotności względnej. Dlatego, gdy stosowany jest zoptymalizowany dodatek do wewnętrznej pielęgnacji efekt ten można zmniejszyć (13). Wewnętrzna pielęgnacja poprawia właściwości mechaniczne, zmniejsza przepuszczalność chlorków i nasiąkliwość (14). Stopień hydratacji również ulega zwiększeniu, gdy stosowano SAP w formie żelu, co zostało badane poprzez wyznaczenie zawartości wody związanej chemicznie (15). Wiele badań dotyczących wpływu materiałów stanowiących wewnętrzną pielęgnację na urabialność wykazało, że urabialność ulega poprawie. Jednakże literatura wskazuje na przypadki, gdzie materiały do pielęgnacji wpływają negatywnie na właściwości reologiczne, ponieważ wprowadzone w stanie suchym absorbowwały wodę z mieszanki betonowej (16, 17).

Niniejszy artykuł dotyczy zbadania efektu zamiany cementu przez popiół lotny i jednocześnie wprowadzenia dodatków do wewnętrznej pielęgnacji na właściwości mieszanki betonowej i betonów w warunkach izolowanych i w warunkach otoczenia. Przeprowadzono badania takie jak sorpcyjność, RCPT i RCMT.

2. Materiały i projekt mieszanki

Do badań wybrano cement portlandzki klasy 53 zgodny z normą IS 269-2015 (18). Jego gęstość wynosiła $3,15 \text{ g/cm}^3$. Wykorzystano popiół lotny klasy F o gęstości $2,2 \text{ g/cm}^3$, który pozyskano z elektrowni ciepłej Ennore w Tamil Nadu w Indiach. Skład chemiczny cementu i popiołu lotnego podano w tablicy 1.

Jako kruszywo drobne użyto piasku rzecznoego, który należy do typu II według normy IS 383-2016 (19). Kruszywo drobne miało gęstość $2,5 \text{ g/cm}^3$, nasiąkliwość $0,7\%$ i miałkość $2,2 \text{ mm}$. Kruszywo grube miało ciężar właściwy $2,8 \text{ g/cm}^3$ i miałkość $5,5 \text{ mm}$, a jego maksymalny wymiar wynosił $12,5 \text{ mm}$. Użyto superplastyfikatora komercyjnego zawierającego eter polikarboksyłowy AURAMIX 400, o gęstości $1,09 \text{ g/cm}^3$.

Do badań wybrano dwa materiały do wewnętrznej pielęgnacji. Pierwszy z nich to lekkie kruszywo keramzytowe o wymiarze zia-

or the air voids induced by the super absorbent polymer which in turn reduces the compressive strength of concrete. However, internal curing reduces permeability and chloride penetration (11). In mixtures with supplementary cementitious materials, internal curing improves the strength at later ages, because the water supplied by the reservoirs is available for a longer duration for pozzolanic reactions to take place and delays the age of cracking (12). Generally, internal curing is adopted for sealed conditions of specimens. However, a few studies on adverse curing conditions such as drying were also studied. When the internal relative humidity was measured, conventionally cured or specimens under sealed conditions did not show a significant difference in the RH, whereas the concrete specimens kept under drying conditions had a steep drop in the internal relative humidity. Hence when internal curing material is optimally selected and designed, the effect can be seen visibly under ambient conditions also (13). Internal curing also improves durability properties such as resistance to chloride permeability and water permeability (14). The degree of hydration also improves with age when SAP was used in the form of gel which was studied using non-evaporable water content (15). Many pieces of research on the effect of internal curing materials on workability have revealed that, when added in pre-soaked form into the concrete, the workability is enhanced. On the other hand, the addition of curing material negatively affected the workability as it absorbed the mixing water in the dry state (16, 17).

This paper attempts to study the combined effect of fly ash replacement and internal curing materials on the transport properties under sealed and ambient curing conditions. Tests such as sorptivity, RCPT and RCMT were conducted and the results were presented.

2. Materials and mix design

An Ordinary Portland Cement of grade 53 has been chosen for the study. Its specific gravity was 3.15 g/cm^3 . Cement met all the specifications of IS 269-2015 (18). A class F fly ash was used whose specific gravity was 2.2 g/cm^3 and was obtained from Ennore thermal power station, Tamil Nadu, India. The chemical composition of cement and fly ash are provided in Table 1.

The fine aggregate used was river sand that belongs to zone II of IS 383-2016 (19). The fine aggregate had a specific gravity of 2.5, water absorption of 0.7% and a fineness modulus of 2.2. The coarse aggregate had a specific gravity of 2.8 and a fineness modulus of 5.5 whose maximum nominal size was 12.5 mm . The superplasticizer used was a polycarboxylic ether-based plasticizer commercially called AURAMIX 400 which had a relative density of 1.09 g/cm^3 .

Two internal curing materials were chosen for the study. A lightweight expanded clay aggregate of size $0-2 \text{ mm}$ was used which had a specific gravity of 1.19 and water absorption capacity which was determined using the paper towel method (20) was found to be 18.75% . Another material that was chosen to be an internal curing material was super absorbent polymer. The type of polymer taken

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU I POPIOŁU LOTNEGO

CHEMICAL COMPOSITION OF OPC AND FLY ASH

Składnik / Compound	Cement	Popiół lotny / Fly ash
	%	
SiO ₂	18.9	48.0
Al ₂ O ₃	4.5	29.0
Fe ₂ O ₃	4.9	12.7
CaO	66.7	9.3
MgO	0.87	-
Na ₂ O	0.12	0.39
K ₂ O	0.43	0.55
SO ₃	2.5	0.5
Straty prażenia Loss on ignition	1.05	1.61

ren 0-2 mm, o gęstości 1,19 g/cm³ i zdolności pochłaniania wody 18,75% oznaczonej metodą opisaną w (20). Innym materiałem wybranym do wewnętrznej pielęgnacji był polimer superabsorbujący [SAP]. Rodzaj polimeru użyty do tych badań to poliakrylan sodu o rozmiarze cząstek od 100 do 150 µm. Zdolność pochłaniania polimeru superabsorbującego wynosiła 125 ml/g i została określona z użyciem metody opisaną w (21-24).

W badaniach projektowano betony samozagęszczalne w których część cementu zastępowano popiołem lotnym w ilości od 30% do 50% masy. Użyto koncepcji współczynnika efektywności popiołu

for this study was a solution-polymerized acrylic salt of sodium ions with a particle size of 100 to 150 microns. The absorption capacity of the superabsorbent polymer was determined by the tea bag test (21-24) and was found to be 125 ml/g.

The mix design consisted of two parts, where the first being a design of fly ash-based self-compacting concrete where the percentage replacement of fly ash varied from 30% to 50% of the mass of cement. The concept of the efficiency factor of fly ash was used, to determine the exact water content for SCC (25-27). After proportioning for cement, fly ash, fine aggregate, coarse aggregate, water and superplasticizer, the optimum dosage of internal curing materials was found based on the chemical shrinkage of the paste (28, 29), absorption capacity and degree of saturation of the internal curing material. The mix proportion has been provided in Table 2.

The number in the prefix indicates the percentage replacement of fly ash and the abbreviation relates to whether the concrete has conventionally cured without any internal curing materials [SCC] or internally cured with SAP [SAP] and internally cured with LECA [LECA]. The specimens with curing materials have been cured under two different regimes namely sealed curing and ambient curing. They are further designated as SSAP and SLECA for sealed conditions and DSAP and DLECA for ambient conditions, which is discussed further elsewhere. The sealed curing regime consists of demoulding the cast specimen after 24 hours and wrapping the specimens with a polyethylene sheet until the day of testing. The ambient curing regime consists of leaving the specimen to cure in laboratory conditions in the open air until the day of testing.

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH

MIX PROPORTIONING OF SCC WITH DIFFERENT CURING MATERIALS

Oznaczenie Designation	Zawartość popiołu lotnego Fly ash content	Cement	Popiół lotny Fly ash	Woda Water	Kruszywo drobne Fine aggregate	Kruszywo grube Coarse aggregate	SP	SAP	LECA
	%								
30 SCC	30	350	150	194.26	801.82	800	0.89	-	-
35 SCC	35	325	175	193.09	796.18	800	0.9	-	-
40 SCC	40	300	200	189.96	795.44	800	0.94	-	-
45 SCC	45	275	225	185.23	798.68	800	0.96	-	-
50 SCC	50	250	250	175.78	813.74	800	1.1	-	-
30 SAP	30	350	150	238.76	801.82	800	0.89	0.356	-
35 SAP	35	325	175	239.59	796.18	800	0.9	0.372	-
40 SAP	40	300	200	238.46	795.44	800	0.94	0.388	-
45 SAP	45	275	225	234.73	798.68	800	0.96	0.396	-
50 SAP	50	250	250	226.87	813.74	800	1.1	0.41	-
30 LECA	30	350	150	238.76	282.4	800	0.89	-	247.22
35 LECA	35	325	175	239.59	253.46	800	0.9	-	258.33
40 LECA	40	300	200	238.46	229.38	800	0.94	-	269.44
45 LECA	45	275	225	234.73	220.94	800	0.96	-	275.04
50 LECA	50	250	250	226.87	217.41	800	1.1	-	283.84

lotnego, aby określić dokładną zawartość wody dla SCC (25-27). W następnej kolejności, biorąc pod uwagę zawartość cementu, popiołu lotnego, kruszywa drobnego i grubego, wody oraz superplastyfikatora, wprowadzono optymalną ilość materiałów do wewnętrznej pielęgnacji. Udział tych materiałów zależał od wyników badań skurczu chemicznego zaczynu (28, 29), zdolności pochłaniania i stopnia nasycenia materiałów pielęgnacyjnych. Skład mieszanek podano w tablicy 2.

Numer w przedrostku wskazuje procent zamiany cementu popiołem lotnym, a skrót odnosi się do metody pielęgnacji: konwencjonalnie bez żadnych materiałów do wewnętrznego utwardzania [SCC], pielęgnacja z SAP [SAP] lub pielęgnacja z LECA [LECA]. Próbki z wewnętrzną pielęgnacją dojrzewały w dwóch różnych warunkach: w zamkniętym pojemniku, zabezpieczone przed powierzchniowym wysychaniem oraz w warunkach otoczenia [powietrzno-suchych]. Próbki zaizolowane od otoczenia [warunki zamknięte] oznaczono jako serie SSAP i SLECA natomiast warunki powietrzno-suche dojrzewania oznaczono jako DSAP i DLECA. W przypadku warunków zamkniętych próbki rozformowano po 24 godzinach i owinięto folią polietylenową aż do dnia, w którym wykonywano badanie. Próbki dojrzewające w warunkach otoczenia pozostawiono z dostępem powietrza w warunkach laboratoryjnych aż do dnia wykonania badań. Wszystkie próbki, dojrzewające zarówno w warunkach zamkniętych, jak i otoczenia były przechowywane w pomieszczeniu w temperaturze $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej $60\pm 5\%$ RH.

3. Metody

Właściwości betonów SCC były badane do 180 dni dojrzewania. Wykonano badania sorpcyjności betonu, przyspieszonej penetracji chlorków [RCPT] i oznaczono współczynnik migracji chlorków metodą przyspieszoną [RCMT].

3.1. Sorpcyjność

Szybkość wnikania wody w beton wynika z absorpcji kapilarnej przez pory. W przypadku betonu z wewnętrzną pielęgnacją określenie szybkości absorpcji jest uznawane za niezbędne dla lepszego zrozumienia tworzenia się produktów hydratacji i systemu porów. Cylindryczne krążki o średnicy 100 mm i grubości 50 mm wycinano z wewnętrznych części walców, odrzucając części zewnętrzne. Dla każdego rodzaju betonu badano dwie próbki a wynik stanowi wartość średnią z dwóch pomiarów. Po odpowiednim wstępnym kondycjonowaniu próbki były ważone a następnie uszczelniono boki walców żywicą epoksydową i pozostawiono do wyschnięcia na 10 minut, po czym próbki ponownie ważono i umieszczano w naczyniu z wodą za pomocą dwóch wsporników. Zadbano o to, aby poziom wody nad wspornikami wynosił 1-3 mm przez cały czas trwania testu. Po umieszczeniu próbek w wodzie uruchamiano czasomierz. Próbki wyjmowano z wody i mierzono ich masę w określonych odstępach czasowych zgodnie z procedurą zawartą w ASTM C 1585 (30). Przy każdym pomiarze masy próbki wyjmowano z wody, zatrzymywano czasomierz, osuszano nadmiar wody

The specimens maintained in both sealed and ambient conditions were kept in a closed room at a temperature of $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ and relative humidity of $60\pm 5\%$ RH throughout the test period.

3. Test methods

Transport properties of SCC specimens under different curing conditions up to the age of 180 days by conducting tests such as Sorptivity, Rapid Chloride Penetration Test and Rapid Chloride Migration Test.

3.1. Sorptivity

The rate of ingress of water in unsaturated concrete occurs due to absorption by capillary action through the pore system in the concrete. In internally cured concrete the determination of the rate of absorption is considered necessary for a better understanding of the formation of hydration products and the pore system. Cylindrical discs of 100 mm diameter and 50 mm thickness were cut from the interior portions of cylinders by discarding the exterior parts. Two test specimens for each mix of concrete were considered for the study and the average values were taken. After proper pre-conditioning, the specimens were weighed before sealing the sides. The sides of the specimens were sealed with epoxy paint and allowed to dry for a period of 10 minutes after which the specimens were weighed again and placed in a pan having water with the help of two supporting rods. It was ensured that the level of water above the supporting rods was 1-3 mm throughout the duration of the test. Once the specimens were placed in water the timing device was started. The specimens were taken out of the water and the mass was measured at specified time intervals as per ASTM C 1585 (30). It was ensured that for each measurement of mass, the specimens were taken out of the water, the timing device stopped and the excess water was blotted off from the surface and the weight measurement was done within 15 seconds as soon as they were removed from the pan. After weight measurements, the specimen was again placed on the supporting rods and the clock restarted to continue the test. Fig. 1 shows the pre-conditioning and experimental setup for sorptivity test. The absorption value of the specimen was determined from the equation [1],

$$I = m/(a \cdot d) \quad [1]$$

where: I is the absorption in mm, m is the change in mass of the specimen at the specified time interval in grams, a is the exposed surface area in mm^2 , d is the density of water in g/mm^3

From the values obtained using the equation, the initial and secondary rate of water absorption was determined.

3.2. Rapid chloride penetration test

This test method is an indication of the concrete specimen to resist the penetration of chloride ions through electrical conductance. The test was conducted in accordance with ASTM C 1202 (31). The quality of curing concrete has a major effect on the permeability and properly cured concrete becomes progressively less perme-



Rys. 1. Przygotowanie próbek i badanie sorpcyjności

Fig. 1. Pre-conditioning and experimental set up of sorptivity test

z powierzchni i dokonywano pomiaru masy w ciągu 15 sekund od wyjęcia z naczynia. Po pomiarze masy próbka była ponownie umieszczana na wspornikach i ponownie uruchamiano zegar, aby kontynuować badanie. Rys. 1 przedstawia sposób wstępnego kondycjonowania próbek i zestaw pomiarowy do badania sorpcyjności. Wartość absorpcji próbki była określana za pomocą równania [1]:

$$I = m/(a \cdot d) \quad [1]$$

gdzie: I - absorpcja w mm, m - zmiana masy próbki w określonym czasie w gramach, a - powierzchnia eksponowana w mm², d - gęstość wody w g/mm³

Na podstawie uzyskanych wartości za pomocą równania, określano początkową i wtórną szybkość absorpcji wody.

3.2. Szybki test penetracji chlorków [RCPT]

Metoda polega na ocenie przenikalności jonów chlorkowych przez próbkę betonową poprzez pomiar ładunku elektrycznego przepływającego przez próbkę. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C 1202 (31). Pielęgnacja betonu ma duży wpływ na jego przepuszczalność, która maleje z czasem. Dlatego badanie przeprowadzono w celu określenia skuteczności wewnętrznej pielęgnacji przy użyciu SAP i LECA. Wstępne kondycjonowanie próbek przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy.

Próbki nasycano wodą a następnie umieszczano w komorze między dwiema elektrodami miedzianymi. Aby zabezpieczyć próbkę zastosowano uszczelkę gumową o zewnętrznej średnicy 100 mm i wewnętrznej średnicy 75 mm oraz grubości 6 mm Elektroda połączona z ujemnym biegunem źródła prądu umieszczona była w części komory wypełnionej 3% NaCl a druga elektroda połączona z dodatnim biegunem umiejscowiona była w części komory wypełnionej roztworem NaOH o stężeniu 0,3 mol/dm³. Zasilanie było włączane a wartość napięcia wynosiła 60 V. Temperaturę próbek w trakcie pomiaru utrzymywano na poziomie 25°C. Odczyty prądu były dokonywane co 30 minut, a badanie trwało 6 godzin. Rys. 2 przedstawia zestaw pomiarowy dla testu RCPT. Całkowity ładunek był obliczany za pomocą wzoru [2]:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad [2]$$

gdzie Q to ładunek w kulombach, I to natężenie prądu w amperach, w funkcji czasu.

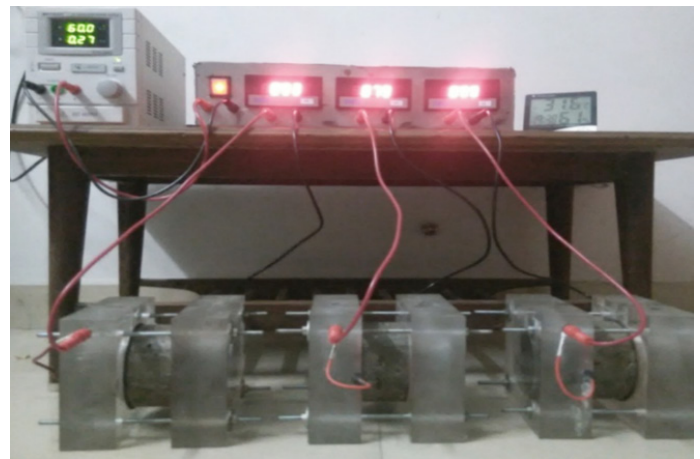
able over time. Hence this test was conducted to determine the efficacy of internal curing with SAP and LECA. Proper pre-conditioning was done according to the guidelines.

The conditioned specimens were removed from the water and blotted off to remove the surface moisture and placed in a sealed container. A rubber gasket whose outside diameter was 100 mm and inside diameter was 75 mm with a thickness of 6 mm was placed in each half of the test cell. Now the specimen was inserted and two halves of the cells were clamped together. Then the side of the cell containing the top surface of the specimen was filled with 3% NaCl solution and was connected to the negative terminal of the power supply and the other half of the cell was filled with 0.3 N NaOH solution and was connected to the positive terminal of the power supply. Electrical connections to the voltage application and data reading apparatus were made. The power supply was switched on and set to 60 V to record the initial current reading. The temperature of the specimens, voltage cell and the solutions were maintained at 25°C when the power supply was turned on. The current readings were taken for every 30 minutes and the test was terminated after 6 hours. Fig. 2 shows the experimental setup for the RCPT test. The total charge passed was calculated using the trapezoidal formula given in the equation [2].

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad [2]$$

where: Q is the charge passed in Coulombs

I is the current in amperes with respect to time.



Rys. 2. Stanowisko do badania przyspieszonej dyfuzji jonów chlorkowych

Fig. 2. Experimental setup of rapid chloride penetration test

3.3. Rapid Chloride Migration Test

This test method is used to determine the chloride migration coefficient of hardened concrete based on Nord test NT Build 492 (32). The coefficient thus obtained is a measure of the resistance offered by the concrete to chloride penetration. The major advantage of this method is the direct observation of the movement of chloride

3.3. Szybki test migracji chlorków [RCMT]

Metoda ta jest stosowana do określenia współczynnika migracji jonów chlorkowych w stwardniałym betonie na podstawie Nord test NT Build 492 (32). Uzyskany w ten sposób współczynnik jest miarą odporności betonu na penetrację chlorków. Główną zaletą tej metody jest bezpośrednia ocena ruchu jonów chlorkowych w betonie po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego, a głębokość penetracji określa się za pomocą spryskania świeżo odkrytej powierzchni betonu roztworem azotanu srebra. W badaniach wykorzystano cylindryczne plastry o średnicy 100 mm i grubości 50 mm, które umieszczano w eksykatorze próżniowym.

Rys. 3 pokazuje zestaw pomiarowy dla testu RCMT, a rys. 4 pokazuje próbkę przeciętą osiowo po teście, aby określić głębokość penetracji chlorków. Katoda zanurzona była w 10% roztworze NaCl, a anoda w roztworze NaOH o stężeniu 0,3 mol/dm³. Próbkę była montowana umieszczana w gumowym rękawie, zabezpieczana klamrami i wspierana na wsporniku umieszczonym w roztworze. Pomiar był dokonywany przy ustalonym napięciu wynoszącym 30V. Dodatkowo mierzono temperaturę na początku i na końcu pomiaru. W następnej kolejności próbkę ostrożnie wyjęto z gumowego rękawa, płukano wodą po czym usuwano jej nadmiar z powierzchni. W celu zmierzenia głębokości penetracji chlorków próbkę przecinano osiowo na dwie części, i spryskiwano roztworem azotanu srebra o stężeniu 0,1M i oceniano obecność osadu [rys. 4]. Jeśli osad nie był wyraźnie widoczny, pomiarów dokonywano w miejscu gdzie obserwowano różnicę kolorów. Głębokość penetracji była mierzona za pomocą linijki z dokładnością do 0,1 mm.

Uprozczone równanie do obliczania współczynnika migracji jonów chlorkowych [3] ma postać:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left\{ X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lxd}{(U - 2)}} \right\} \quad [3]$$

gdzie: D_{nssm} – współczynnik migracji w stanie nieustalonym [$10^{-12}m^2/s$]

U – wartość zastosowanego napięcia, V,

T – średnia wartość początkowej i końcowej temperatury roztworu anodowego, °C,

L – grubość próbki, mm,

X_d – średnia głębokość penetracji, mm,

t - czas trwania testu, godziny.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Urabialność i wytrzymałość na ściskanie

W celu oceny właściwości betonu wykonano badanie konsystencji mieszanki i wytrzymałości na ściskanie próbek dojrzewających w różnych warunkach oraz określono związek między wytrzymałością a trwałością. Wartości opadu stożka i wytrzymałości na ściskanie podano w tablicy 3.

ions in the concrete by applying an external electrical field and the penetration depth is measured by splitting the concrete specimen and spraying silver nitrate solution. Cylindrical slices of 100 mm diameter and 50 mm thickness were taken for the test and placed in a vacuum desiccator and conditioned.

Fig. 3 shows the experimental setup for the RCMT test and Fig. 4 shows an axially cut specimen after the test to determine the depth of chloride penetration. The catholyte reservoir was filled with a catholyte solution of 10% NaCl and the anolyte reservoir was filled with 0.3N NaOH solution. The specimen is fitted onto the rubber sleeve and is secured with clamps and supported on the support provided in the catholyte solution. Around 300 ml of sodium hydroxide solution was filled in the anolyte reservoir and the cathode and anode were connected to the corresponding terminals and switched on. The initial current was measured with the voltage preset to 30V. The initial temperature of the anolyte solution was measured and the test duration was chosen with reference to the initial current. At the end of the test duration, the final current and the temperature were also measured. Now the specimen is removed carefully from the rubber sleeve, the specimen was washed and the surface moisture was removed. The specimen was cut into 2 pieces axially and 0.1 M silver nitrate solution was sprayed on the split portion of the specimen and checked for white precipitation as shown in Fig. 4. As the precipitation was not clearly visible a white demarcation was marked on the line where the colour difference was observed. The depth of penetration is measured with the help of a ruler to an accuracy of 0.1 mm.

The simplified equation [3] for calculating the migration coefficient is given as:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left\{ X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lxd}{(U - 2)}} \right\} \quad [3]$$

where: D_{nssm} is non steady state migration coefficient [$10^{-12}m^2/s$],

U is the value of applied voltage, V,

T is the average value of initial and final temperature of the anolyte solution, °C,

L is the thickness of the specimen, mm,

X_d is the average penetration depth, mm,

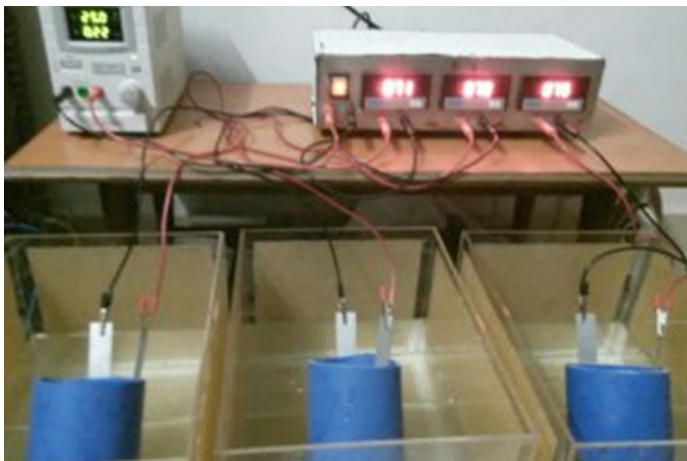
t is the test duration, (hours).

4. Results and discussions

4.1. Workability and compressive strength

Though the paper mainly focuses on transport properties, it is necessary to look at the workability and compressive strength of the specimens under different curing conditions to ascertain the relationship between strength and durability. The slump cone values and the compressive strength values have been provided in Table 3.

SCC refers to conventionally cured self-compacting concrete mixes without any internal curing agents. SSAP and SLECA refer



Rys. 3. Stanowisko do badań współczynnika migracji jonów chlorkowych metodą przyspieszoną

Fig. 3. Experimental Setup of Rapid Chloride Migration Test



Rys. 4. Fragment próbki poddanej ocenie głębokości penetracji jonów chlorkowych,

Fig. 4. Axially cut specimen to determine the chloride penetration

Tablica 3 / Table 3

KONSYSTENCJA I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONÓW SCC DOJRZEWAJĄCYCH W RÓŻNYCH WARUNKACH.

WORKABILITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF SCC UNDER DIFFERENT CURING CONDITIONS

% popiołu lotnego % of Fly ash	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength at 28 days, N/mm ²			Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength at 90 days (N/mm ²)			Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength at 180 days (N/mm ²)			Opad stożka/ Slump flow (mm)		
	SCC	SSAP DSAP	SLECA DLECA	SCC	SSAP DSAP	SLECA DLECA	SCC	SSAP DSAP	SLECA DLECA	SCC	SAP	LECA
30	37.28	35.29	34.72	52.34	44.36	42.44	53.69	45.65	47.38	663	710	694
		34.89	34.39		45.49	41.28		46.29	46.34			
35	36.70	35.12	34.16	47.35	42.65	40.65	47.66	43.46	44.46	669	715	701
		34.75	33.12		44.87	40.23		45.34	44.24			
40	35.09	34.68	33.57	44.19	39.63	39.64	44.83	40.24	42.36	675	721	709
		34.38	32.73		42.38	39.88		44.59	43.12			
45	34.30	33.52	32.91	42.24	37.57	36.77	42.22	39.43	40.65	680	723	713
		33.8	32.52		42.15	38.54		43.37	42.29			
50	32.60	31.73	32.39	39.78	36.72	34.87	39.64	38.91	39.24	684	738	728
		31.98	31.68		40.31	37.23		42.81	41.78			

SCC odnosi się do konwencjonalnie dojrzewających betonów bez wewnętrznych środków pielęgnacyjnych. SSAP i SLECA odnoszą się do próbek przechowywanych w warunkach zamkniętych z odpowiednio SAP i LECA. DSAP i DLECA odnoszą się do próbek przechowywanych w warunkach otoczenia z odpowiednio SAP i LECA jako dodatkami pielęgnacyjnymi.

Wyniki pokazały, że konsystencja mieszanki betonowej wyrażana jako wartość opadu stożka zwiększa się wraz z wprowadzeniem dodatków pielęgnacyjnych. SAP stosowany w formie wcześniej nasączonego żelu zwiększa mobilność mieszanki betonowej, a zatem konsystencja jest lepsza w porównaniu do mieszanek z LECA. Mieszanka betonowa zawierająca SAP ma większą płynność niż beton referencyjny i beton z LECA. Ze względu na to, że SAP był dodawany w formie wcześniej nasączonego żelu, zmniejsza się tarcie między cząstkami, co sprawia, że mieszanina

to specimens stored in sealed conditions with SAP and LECA as internal curing materials respectively. DSAP and DLECA refer to specimens stored in ambient conditions with SAP and LECA as internal curing materials respectively.

From the results, it is obvious that the workability in terms of slump flow increases with the inclusion of internal curing materials. SAP is in the form of pre-soaked gel, which induces mobility to the concrete mix and hence the workability is better than both the concrete without curing material as well as the mixes with LECA. Internally cured concrete with SAP has higher flowability than the reference concrete and the concrete with LECA. Since SAP was added in the form of pre-soaked gel, the friction gets reduced between the molecules and spreads more evenly. When LECA is added as a replacement for fine aggregate the flowability increases compared to conventional concrete due to the size and shape factor of the artificially manufactured aggregates.

rozprowadza się bardziej równomiernie. Gdy LECA jest dodawany jako zamiennik kruszywa drobnego, konsystencja mieszanki i jej płynność zwiększa się w porównaniu do betonu referencyjnego ze względu na rozmiar i kształt sztucznie produkowanych kruszyw.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie pokazują, że niezależnie od warunków dojrzewania, wytrzymałość maleje wraz ze wzrostem procentowego udziału popiołu lotnego. Wśród wewnętrznie pielęgnowanych próbek, najlepiej na wytrzymałość wpłynęła obecność SAP w całym badaniu. Porównanie między warunkami dojrzewania w układzie zamkniętym a warunkami powietrzno-suchymi pokazuje, że w układzie zamkniętym wytrzymałość próbek zawierających do 40% popiołu lotnego jest większa w porównaniu do próbek referencyjnych. Po przekroczeniu tego poziomu, beton dojrzewający w układzie otwartym, w którym zastosowano pielęgnację wewnętrzną ma większą wytrzymałość w porównaniu do próbek dojrzewających w układzie zamkniętym. Jest to związane z większym stopniem hydratacji wynikającym z obecności wody z dodatku pielęgnującego. Dodatkowo obecność popiołu lotnego, zmniejsza ciepło hydratacji betonu przez co łagodniejszy jest proces samoosuszenia w betonie. Gdy próbki betonu były przechowywane w warunkach zamkniętych, spadek wewnętrznej wilgotności względnej jest nieznaczny, ponieważ nie dochodzi do utraty wilgoci na skutek szybkiego parowania. Natomiast próbki pozostawione do wysychania na powietrzu wykazywały znaczący spadek wewnętrznej wilgotności względnej, co zwiększa skuteczność pielęgnacji materiałów. Zjawisko to zostało również wyjaśnione przez Goliasa i in. (33), gdzie autorzy porównali wilgotność względną w warunkach zamkniętych z pielęgnacją wewnętrzną i wilgotność w przypadku dojrzewania w warunkach otoczenia. Na podstawie tych badań stwierdzono, że różnica w wilgotności względnej jest największa, gdy próbki były pozostawione do wysychania w warunkach otwartych. Ponadto, zaobserwowano, że po 90 i 180 dniach wytrzymałość na ściskanie próbek DSAP była lepsza niż w przypadku konwencjonalnie dojrzewającego betonu.

4.2. Sorpcyjność

Liniowość zmierzonych wartości dla początkowego i wtórnego współczynnika absorpcji miała wartość R-kwadrat równą 0,98. Uzyskano zależność liniową współczynników w stosunku do pierwiastka kwadratowego z czasu. Rys. 5 pokazuje liniowość absorpcji dla konwencjonalnie dojrzewających próbek.

Rys. 6(a) i 6(b) przedstawiają początkowe wartości współczynników absorpcji próbek SCC dojrzewających w różnych warunkach po 28 i 180 dniach dojrzewania.

Wyniki pokazują, że początkowa absorpcja jonów chlorkowych zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego. Ponadto stwierdzono, że współczynniki absorpcji były znacznie mniejsze po 180 dniach dla wszystkich próbek w porównaniu do próbek dojrzewających 28 dni, co wynika ze zmniejszenia porowatości na skutek reakcji popiołu lotnego(33). Po 28 dniach próbki z SAP jako wewnętrznym materiałem pielęgnacyjnym wykazały lepsze wyniki niż konwencjonalnie dojrzewający beton. Próbki serii SLECA miały większe absorpcje chlorków nawet w układzie zamkniętym,

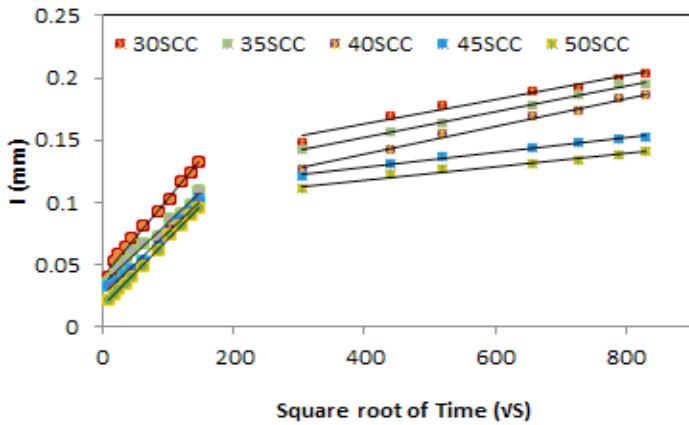
The compressive strength results show that, regardless of the curing condition, the strength decreases with an increase in the percentage of fly ash replacement. Among the internally cured specimens, SAP performed better in improving the compressive strength at all ages. A comparison between the sealed curing condition and the ambient condition shows that sealed curing performed better up to 40% fly ash replacement and beyond that, concrete left under drying conditions with internal curing has outperformed the sealed specimens due to enhanced hydration and reduction in unhydrated cement particles. This is attributed to the presence of fly ash which moderates the heat of hydration in concrete. When the concrete specimens were kept in sealed conditions, the drop in the internal relative humidity is insignificant as there is no moisture loss due to evaporation. Whereas the specimens left to drying conditions in the air, the drop in the internal relative humidity is significant which increases the curing efficiency of the materials. This phenomenon is also explained by Golias et al, in 2013 (33), where the author compared the relative humidities of sealed curing with that of water curing, moist curing and ambient curing and found that the difference in RH is highest when the samples were allowed to dry. Also, it was observed that at 90 and 180 days the compressive strength of DSAP specimens was even better than the conventionally cured concrete.

4.2. Sorptivity

The linearity of the observed values for initial and secondary absorption had an R-squared value of 0.98 for all the specimens and the coefficients were obtained as the slope of the best-fit line for the initial absorption as well as the secondary absorption against the square root of time in seconds and the coefficients were calculated as the slope of the line that is best fit to sorptivity against the square root of time. Fig. 5 shows the rate of absorption in terms of the best-fit line for conventionally cured specimens only.

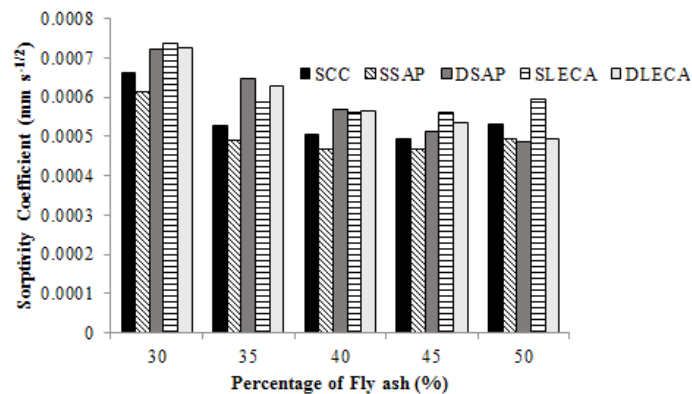
Figure 6(a) and 6(b) show the initial sorptivity values of SCC specimens cured under different conditions at 28 and 180 days calculated as the rate of absorption in the first 6 hours.

The figures show that the rate of initial absorption decreases with an increase in the percentage of fly ash replacement. Also, it was found that the initial absorption was much lesser at 180 days for all the specimens than at 28 days pertaining to the refinement in pore structure owing to the presence of fly ash (33). At 28 days, the sealed specimens with SAP as internal curing material performed even better in terms of absorption than the conventionally cured concrete. However, the SLECA specimens had a higher absorption rate even under sealed conditions owing to the presence of porous aggregates. When allowed to cure under ambient conditions, the specimens with a fly ash percentage of 50% performed better than all the specimens both at 28 and 180 days. This stands as proof that, when the fly ash percentage was increased, the internal curing efficiency increased and lead to a better pore structure thereby enhancing the capillary porosity refinement (34). Since the absorption occurs through capillary suction of the unsaturated concrete during the first 6 hours, the initial absorption was concentrated and



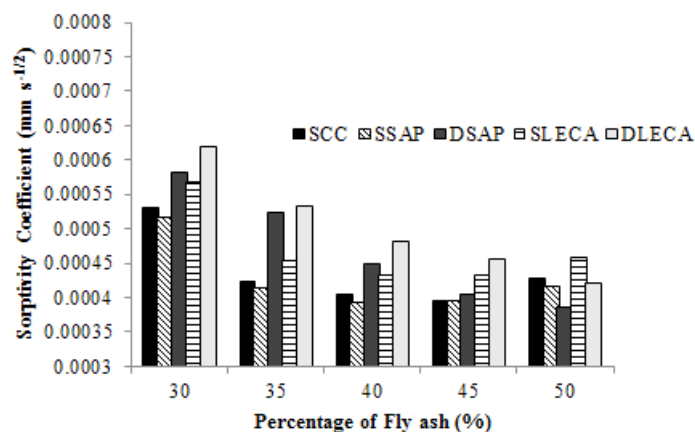
Rys. 5. Zależność sorpcyjności w czasie dla betonów SCC

Fig. 5. Sorptivity trendline for SCC



Rys. 6a. Początkowy współczynnik absorpcji po 28 dniach dojrzewania

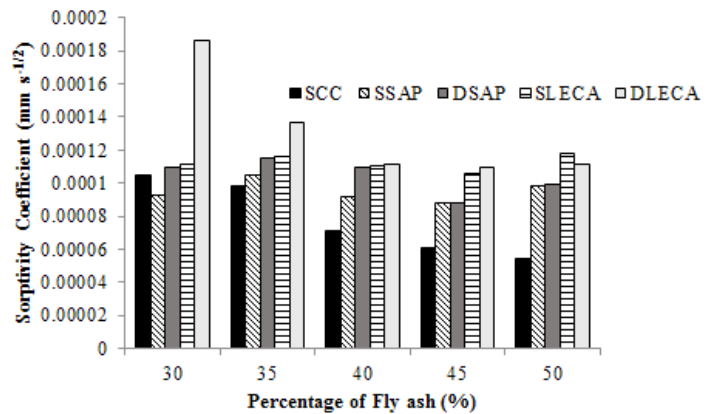
Fig. 6a. Initial Sorptivity at 28 days



Rys. 6b. Początkowy współczynnik absorpcji po 180 dniach dojrzewania

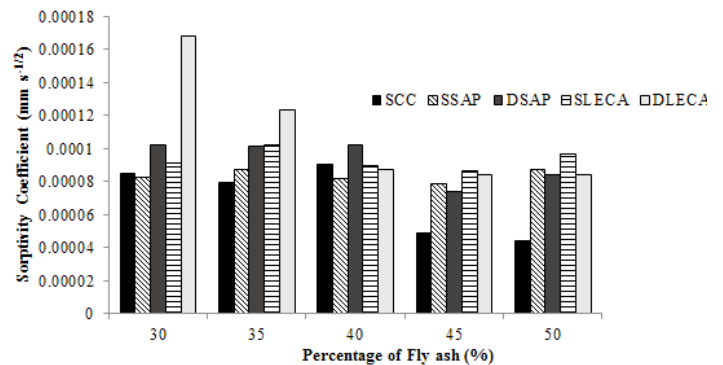
Fig. 6b. Initial Sorptivity at 180 days

co wynika z obecności porowatego kruszywa. Próbkę dojrzewającą w warunkach powietrzno-suchych z 50% zawartością popiołu lotnego miały mniejsze współczynniki absorpcji w porównaniu do pozostałych zarówno po 28, jak i 180 dniach. Stanowi to dowód na to, że wraz ze zwiększeniem zawartości popiołu lotnego, poprawia się skuteczność wewnętrznej pielęgnacji, dzięki zmniejszeniu po-



Rys. 7a. Wtórny współczynnik absorpcji po 28 dniach dojrzewania

Fig. 7a. Secondary sorptivity at 28 days



Rys. 7b. Wtórny współczynnik absorpcji po 180 dniach dojrzewania

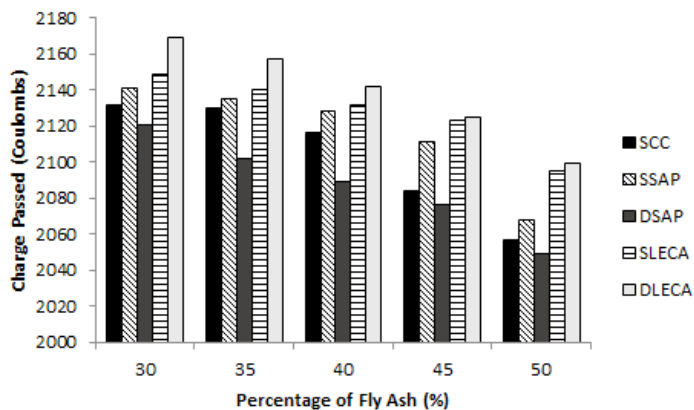
Fig. 7b. Secondary sorptivity at 180 days

the Figure 7(a) and 7(b) shows the trends of the secondary rate of absorption from 24 hours to 7 days of the test at 28 and 180-day sample age respectively.

The secondary absorption generally takes place through diffusion and hence the rate of absorption is always lesser than the initial absorption. The secondary absorption also decreases with an increase in the percentage of fly ash replacement regardless of age. However, the absorption of sealed specimens seemed to be a little higher than the conventionally cured specimens, unlike initial absorption. The secondary absorption values of 45% and 50% fly ash mixes were almost similar to that of the sealed specimens when SAP was used as a curing material under drying conditions at 28 days. When LECA was used as a curing material, the absorption was higher at early ages and at 180 days, it was found to be equivalent to that of DSAP specimens when 50% fly ash was used. However, the secondary absorption is much lesser when compared to the initial absorption that occurs through capillary suction in which internally cured specimens performed better than the conventionally cured concrete.

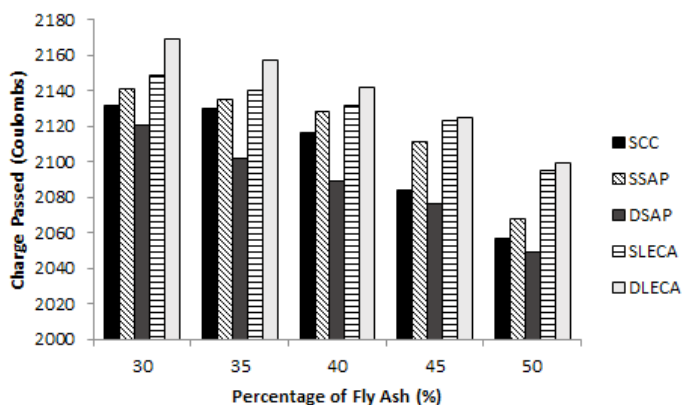
4.3. Rapid chloride penetration test

Figures 8(a) and 8(b) show the resistivity of concrete specimens under different curing conditions at 28 and 180 days. As expected, the inclusion of fly ash has improved the resistance to chloride ion penetration regardless of the curing condition and age. Also,



Rys. 8a. Ładunek elektryczny w teście penetracji chlorków po 28 dniach

Fig. 8a. Resistance to Chloride ion penetration at 28 days



Rys. 8b. Ładunek elektryczny w teście penetracji chlorków po 180 dniach

Fig. 8b. Resistance to Chloride ion penetration at 180 days

rowatości kapilarnej (34). Ze względu na to, że absorpcja wynika z obecności zjawiska podciągania kapilarnego w ciągu pierwszych 6 godzin, początkowe wchłanianie było większe, a rys. 7(a) i 7(b) pokazują trendy wtórnej absorpcji od 24 godzin do 7 dni trwania testu dla próbek dojrzewających odpowiednio 28 i 180 dni.

Wtórna absorpcja zazwyczaj następuje przez dyfuzję, a zatem tempo wchłaniania jest zawsze mniejsze niż w przypadku początkowej absorpcji. Wtórna absorpcja również zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego niezależnie od wieku. Zauważono, że współczynniki absorpcji próbek dojrzewających w warunkach zamkniętych były nieco większe niż próbek dojrzewających w warunkach otwartych, w przeciwieństwie do wyników dotyczących początkowej sorpcji jonów. Po 28 dniach wartości współczynnika absorpcji wtórnej próbek z 45% i 50% udziałem popiołu lotnego dojrzewających w warunkach powietrzno-suchych były prawie takie same jak dla próbek dojrzewających w układzie zamkniętym gdy SAP był używany jako dodatek pielęgnujący. W przypadku stosowania LECA współczynniki absorpcji były wyższe dla 28 dni, natomiast po 180 dniach wartości były zbliżone do próbek z serii DSAP, szczególnie, gdy zastosowano 50% popiołu lotnego.

4.3. Szybki test penetracji chlorków [RCPT]

Na rysunkach 8(a) i 8(b) przedstawiono wartości ładunków elektrycznych dla próbek betonów dojrzewających w różnych

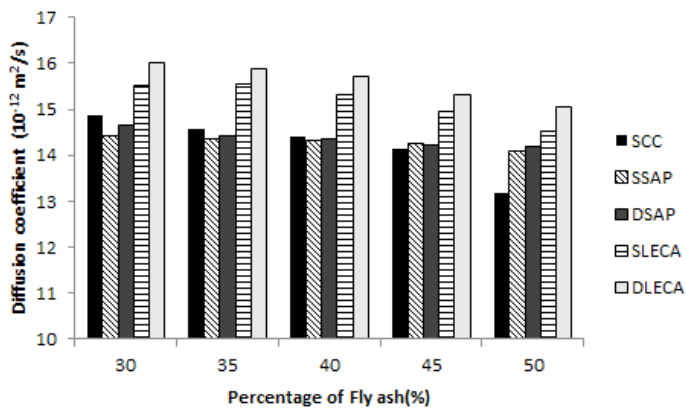


Fig. 9a. Współczynnik dyfuzji chlorków po 28 dniach

Fig. 9a. Diffusion coefficient at 28 days

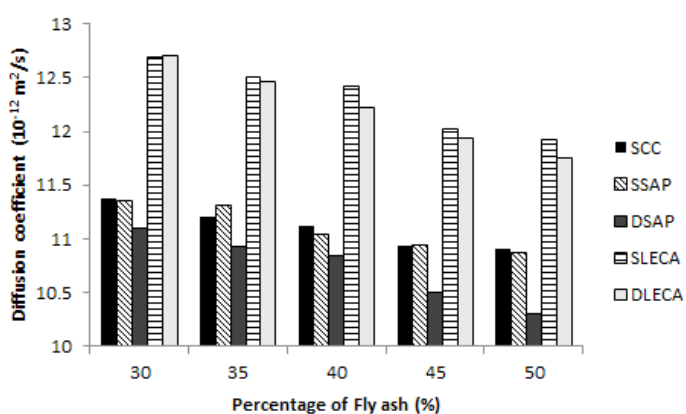


Fig. 9b. Współczynnik dyfuzji chlorków po 180 dniach

Fig. 9b. Diffusion Coefficient at 180 days

all the specimens fall under the medium resistance category of ASTM C 1202. However, there is a very slight variation in charge passed under different curing conditions indicating that the influence of internal curing is very little in resisting chloride ion penetration. A significant inference made from the study was the DSAP specimens performed better than all other curing conditions both at 28 and 180 days. Along with the inclusion of fly ash, the improvement in chloride resistance of internally cured specimens increased. Previous studies on the influence of SAP on chloride ingress have shown similar results where the internal curing helps with finer particles such as SAP, which helps in the attainment of denser microstructure that leads to less chloride permeability even under drying conditions (8,9).

4.4. Rapid Chloride Migration Test

It is known that, though RCPT measures the resistivity of concrete to chloride penetration, it should be noted that the use of supplementary cementitious material may modify the pore structure during the passing of charges and hence may lead to misleading values. Hence it is better to measure the diffusion coefficient values in the non-steady state. However, in this study, the diffusion coefficients determined through RCMT coordinated well with the RCPT values. Figs. 9(a) and 9(b) show the diffusion coefficient of SCC specimens cured under different curing conditions at 28 and 180 days. The

warunkach po 28 i 180 dniach. Zgodnie z oczekiwaniami, dodanie popiołu lotnego poprawiło odporność na penetrację jonów chlorkowych niezależnie od warunków utwardzania i wieku. Ponadto wszystkie próbki zaliczały się do kategorii średniej odporności zgodnie z ASTM C 1202. Jednakże, zauważono niewielkie różnice w przenoszonym ładunku dla różnych warunków kondycjonowania, co wskazuje, że wpływ wewnętrznej pielęgnacji jest niewielki, jeśli rozważany jest przyspieszony test penetracji chlorków. Znaczącym wnioskiem z badań był fakt, że próbki z serii DSAP wykazały lepsze wyniki i mniejszą penetrację jonów chlorkowych w porównaniu do pozostałych warunków dojrzewania zarówno po 28, jak i 180 dniach. Wraz z wprowadzeniem popiołu lotnego, zwiększyła się odporność na wnikanie chlorków w próbkach betonów pielęgnowanych wewnętrznie. Wcześniejsze badania na temat wpływu SAP na wnikanie chlorków wykazały podobne zależności, gdzie wykazano, że przy użyciu drobnych cząstek polimerów superabsorbujących otrzymywana jest bardziej szczelna mikrostruktura, co prowadzi do mniejszej przepuszczalności chlorków, nawet w warunkach wysychania na powietrzu (8,9).

4.4. Szybki test migracji chlorków (RCMT)

Powszechnie wiadomo, że w teście RCPT mierzony jest opór betonu świadczący o wnikaniu chlorków do matrycy betonowej, należy jednak podkreślić, że stosowanie dodatków mineralnych może modyfikować strukturę porowatości i co za tym idzie modyfikować przepływ ładunku, co może prowadzić do mylących wyników. Dlatego postanowiono zmierzyć współczynniki dyfuzji chlorków. W tym badaniu zauważono korelację między współczynnikami dyfuzji określonymi przez RCMT a wartościami otrzymanymi z badania RCPT. Rys. 9(a) i 9(b) pokazują współczynnik dyfuzji próbek SCC dojrzewających 28 i 180 dni w różnych warunkach. Wartości współczynnika dyfuzji zmniejszały się wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego, niezależnie od wieku próbek. Jednakże zaobserwowano, że próbki z serii DSAP wykazywały wyższe wartości współczynnika dyfuzji niż ich odpowiedniki dojrzewające w warunkach konwencjonalnych. Odwrotne zależności otrzymano w teście RCPT po 28 dniach. Po 180 dniach wartości współczynnika dyfuzji DSAP były mniejsze w porównaniu do pozostałych próbek. Oznacza to, że przy zwiększonym udziale popiołu lotnego, wewnętrzna pielęgnacja jest bardziej skuteczna, nawet w niekorzystnych warunkach dojrzewania [układ otwarty].

5. Wnioski

- Wszystkie mieszanki wykazywały wartości opadu stożka w zakresie 660-750 mm. Wprowadzenie dodatków stanowiących wewnętrzną pielęgnację poprawiło konsystencję mieszanki betonowej, szczególnie w przypadku wprowadzenia SAP w formie nasączonego żelu (35). Zastosowanie LECA, również poprawiło konsystencję i wpłynęły korzystnie na urabialność w porównaniu z betonem referencyjnym, jednak poprawa była mniejsza niż w mieszance z SAP.
- Przy konwencjonalnym dojrzewaniu betonu uzyskano lepsze wytrzymałości na ściskanie. Betony SCC z popiołem lotnym

diffusion coefficient values reduced with an increase in the percentage of fly ash regardless of the age of the specimens. However, it was observed that DSAP specimens showed higher values of diffusion coefficient than their conventionally cured counterparts unlike the RCPT values at 28 days. At 180 days, the diffusion coefficient values of DSAP were lesser than the specimens under all curing conditions. This indicates that with an increased percentage of fly ash, internal curing performs better even under adverse curing conditions than sealed curing conditions.

5. Conclusions

- All the mixes had a slump flow in the prescribed range of 660-750 mm. The addition of internal curing material has improved the overall workability and when SAP was added in the pre-soaked gel form, the slump flow improved indicating a more uniform flow (35). Similarly, when LECA was used, the flow properties improved than the conventional concrete however the improvement was lesser than the mix with SAP.
- Under conventional curing, better compressive strengths were achieved and increased with age. Concrete mixes with fly ash had lesser strengths and consistent improvement in age was seen. The internally cured mixes with 45% and 50% fly ash replacement had strengths better than conventionally cured concrete at 180 days under ambient drying conditions.
- The introduction of SAP in the form of pre-soaked gel under drying conditions improved the initial sorptivity at 180 days for mixes with 45% and 50% of fly ash replacement and was better than the conventionally cured concrete. LECA under drying conditions, improved the sorptivity performance but remained higher than that of SAP.
- The resistance to chloride penetration was found to be moderate under all curing conditions at 28 and 180 days. A significant improvement in the resistance was found for the DSAP mixes and the mix with 50% fly ash replacement had the highest resistance at 180 days. The mixes with LECA under drying conditions improved at 180 days for mixes with 45% and 50% replacement.

To conclude, internal curing is generally used to enhance the hydration of dense concretes with a low w/c ratio, under sealed conditions. This research has attempted to incorporate the concept of internal curing to SCC under ambient conditions. When used optimally, the internal curing materials could obtain the required strength and when the heat of hydration is reduced, using fly ash, the required compressive strength could be achieved even under ambient curing conditions. The improvement in the sorptivity is multifaceted owing to the presence of fly ash which refines the pore structure as well as the internal curing material that improves the hydration reaction. Internal curing did not have a significant impact on the chloride ion resistance of mixes with fly ash at 28 days but improved at 180 days when SAP is used.

miały mniejsze wytrzymałości wczesne, ale widoczny był wzrost wytrzymałości w funkcji czasu. Betony z pielęgnacją wewnętrzną zawierające 45% i 50% popiołu lotnego miały większe wytrzymałości niż beton referencyjny po 180 dniach dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych.

- Wprowadzenie SAP w formie nasączonego żelu w betonach z 45% i 50% udziałem popiołu lotnego dojrzewających w warunkach powietrzno-suchych poprawiło współczynniki absorpcji jonów chlorkowych po 180 dniach dojrzewania i były lepsze w porównaniu do betonów dojrzewających konwencjonalnie. Obecność kruszywa LECA w warunkach powietrznego wysychania zmniejszyły sorpcję próbek, ale nie tak efektywnie jak SAP.

Współczynniki dyfuzji chlorków były umiarkowane dla wszystkich warunków dojrzewania po 28 i 180 dniach. Znaczną poprawę zanotowano w mieszankach DSAP, a mieszanka z 50% udziałem popiołu lotnego miała najwyższą odporność na działanie chlorków po 180 dniach. Mieszanki z LECA w warunkach powietrzno-suchych miały mniejsze współczynniki dyfuzji po 180 dniach dla próbek z 45 i 50% udziałem popiołu. Podsumowując, wewnętrzna pielęgnacja jest zazwyczaj stosowana w celu modyfikacji procesu hydratacji betonów o niskim wskaźniku wodno-cementowym. Niniejsze badania pokazały, że stosowanie koncepcji wewnętrznej pielęgnacji jest korzystne dla betonów SCC dojrzewających w warunkach otoczenia. Przy optymalnym użyciu, materiały do wewnętrznej pielęgnacji mogą umożliwić uzyskanie wymaganej wytrzymałości, a gdy zmniejszone jest ciepło hydratacji na skutek stosowania popiołu lotnego, wymagana wytrzymałość na ściskanie może być osiągnięta nawet w warunkach otoczenia. Poprawa odporności betonu na działanie chlorków jest wielowątkowa. Współczynniki ulegają poprawie ze względu na obecność popiołu lotnego, który zmienia strukturę porowatości, oraz z powodu stosowania dodatków do wewnętrznej pielęgnacji, co modyfikuje proces hydratacji cementu. Wewnętrzna pielęgnacja zastosowana w badaniach nie miała znaczącego wpływu na odporność na wnikanie jonów chlorkowych w betonach z popiołem lotnym po 28 dniach dojrzewania, ale po 180 dniach uległa poprawie, gdy w betonie zastosowano SAP.

Literatura/ References

1. D.P. Bentz, P.R. Lura, Mixture Proportioning for Internal Curing. *Concr. Int.* **27**(2), 35–40 (2005).
2. C.H. Huang, S.K. Lin, C.S. Chen, H.J. Chang, Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Constr. Build. Mater.* **46**, 71-78 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.016>.
3. B.H. Nagaratnam, A. Faheem, M.E. Rahman, M.A. Mannan, M. Lebluba, Mechanical and durability properties of medium strength self-compacting concrete with high-volume fly ash and blended aggregates. *Period. Polytech. Civ. Eng.* **59**(2), 155–164, (2015).
4. S.A. Kristiawan, M.T.M. Aditya, Effect of high volume fly ash on shrinkage of self-compacting concrete. *Procedia Eng.* **125**, 705–712, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.110>.

5. S. Iqbal, A. Ali, K. Holschemacher, Y. Ribakov, T.A. Bier, Effect of fly ash on properties of self-compacting high strength lightweight concrete. *Period. Polytech. Civ. Eng.* **61**(1), 81–87, (2017).
6. A.K. Saha, Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete, *Sustain. Environ. Res.* **28**(1), 25–31, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>.
7. D.P. Bentz, K. Snyder, Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate. *Cem. Concr. Res.* **29**(11), 1863-1867, (1999).
8. DP. Bentz, 'Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars', *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 5, pp. 285-289 (2009). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00178-7)
9. A. Elsharief, M.D. Cohen, J. Olek, Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar. *Cem. Concr. Res.* **35**(7) 1368–1376 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.011>
10. S. Iffat, T. Manzur, M.A. Noor, Super Absorbent Polymer in Concrete As Internal Curing Material : Bangladesh Context', UKIERI Concrete Congress - Concrete Research Driving Profit and Sustainability, 1631-1643 (2015).
11. H.G. Espinoza, M. Lopez, Extending internal curing to concrete mixtures with W/C higher than 0.42. *Constr. Build. Mater.* **25**(3), 1236–1242, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.031>
12. D.P. Bentz, W.J. Weiss, Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, (2011).
13. M. Goliias, J. Weiss, D.P. Bentz, Influence of Exposure Conditions on the Efficiency of Internal Curing in Concrete. *Adv. Civ. Eng. Mater.* **2**(1), 522-533 (2013).
14. S. Iffat, T. Manzur, M.A. Noor, Super Absorbent Polymer in Concrete As Internal Curing Material : Bangladesh Context, UKIERI Concrete Congress - Concrete Research Driving Profit and Sustainability, 1631-1643, (2015).
15. K. Farzarian, Y. Wehbe, M.A. Ghahremaninezhad, The Effect of Super-absorbent Polymers (SAP) on the Performance of Cementitious Materials. *Procc. Fourth Int. Conf. Sust. Constr. Mater. Techn.* (2016).
16. J. Dang, J. Zhao, Z. Du, Effect of superabsorbent polymer on the properties of concrete. *Polymers*, **9**(12), 1–17, (2017). <https://doi.org/10.3390/polym9120672>
17. S. Hubboubi, T. Attar, H. Badry, S. Abood, Mohammed, R. Haddhood, Performance of super-absorbent polymer as an internal curing agent for self-compacting concrete. *MATEC Web of Conferences*, **162**(5), 3–7, (2018).
18. IS: 269-, Ordinary Portland Cement-Specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, (2015).
19. IS: 383-, Coarse and Fine aggregate for Concrete-Specification, Bureau of Indian Standards, New Delhi, (2016).
20. J. Castro, L. Keiser, M. Goliias, J. Weiss, Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. *Cem. Concr. Compos.* **33**(10), 1001–1008, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.006>
21. V. Mechtcherine, D. Snoeck, C. Schröfl et al., Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test. *Mater. Struct.* **51**, 28 (2018). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1149-4>
22. C. Schröfl, V. Mechtcherine, M. Gorges, Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. *Cem. Concr. Res.* **42**(6), 865–873, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.03.011>

23. A.E. Miller, T.J. Barrett, W.J. Weiss, Evaluation of superabsorbent polymers for use in cementitious systems for the purpose of mitigating autogenous shrinkage. *Procc. Int. RILEM Conf. on Application of Superabsorbent Polymers and Other New Admixtures in Concrete Construction*, 201–210, (2014).
24. B.J. Olawuyi, The Mechanical Behaviour of High-Performance Concrete with Superabsorbent Polymers (SAP). *Mater. Sci.* (2016).
25. K.G. Babu, G.S. Nageswara Rao, Efficiency of fly ash in concrete with age. *Cem. Concr. Res.* **26**(3), 465-474, (1996). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85034-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85034-4)
26. K.G. Babu, G.S. Nageswara Rao, Efficiency of fly ash in concrete. *Cem. Concr. Compos.* **15**(4), 223–229, (1993). [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(93\)90025-5](https://doi.org/10.1016/0958-9465(93)90025-5)
27. P. Dinakar, Design of self-compacting concrete with fly ash. *Mag. Concr. Res.* **64**(5), 401-409, (2012).
28. ASTM C 1608-06, Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement Paste, ASTM International, United States.
29. S. Sarkar, H. Aritra, B. Shashank, Shrinkage in Concretes Containing Fly Ash, UKIERI Concrete Congress, India, (2013).
30. ASTM C 1585-04, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes, ASTM International, United States.
31. ASTM C 1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, United States.
32. NT Build 492, 1999, Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.
33. M. Goliias, D. Bentz, J. Weiss, Influence of Exposure Conditions on the Efficiency of Internal Curing in Concrete. *Adv. Civ. Eng. Mater.* **2**(1) 522-533 (2013). <https://doi.org/10.1520/ACEM20120023>.
34. I. Varga, R. Spragg, C. di Bella, J. Castro, D. Bentz, J. Weiss, Fluid Transport in High-Volume Fly Ash Mixtures with and without internal curing. *Cem. Concr. Compos.* **45**, 102-110 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.017>
35. J. Shanmugapriya, K. Chinnaraju, & V. Jaganathan, Behaviour of Internally Cured Self Compacting Concrete with Fly ash under ambient curing conditions, *Romanian J. Mater.* **51**(3), 464-471, (2021).