

## Wpływ domieszki redukującej skurcz oraz włókien polipropylenowych na skurcz betonu przy wysychaniu

### The effect of shrinkage reducing admixture and polypropylene fibers on drying shrinkage behaviour of concrete

**Słowa kluczowe:** skurcz przy wysychaniu mieszanki betonowej, domieszka redukująca skurcz, włókno polipropylenowe, przepuszczalność.

**Keywords:** drying shrinkage behavior of concrete, shrinkage reducing admixture, polypropylene fiber, permeability

#### 1. Wstęp

Wiadomo, że rysy, które powstają z różnych powodów, w betonie zmniejszają jego trwałość. Generalnie pęknięcia powstają, gdy siły rozciągające w dowolnym obszarze przekraczają wytrzymałość betonu na rozciąganie (1). Pęknięcia te powodują wzrost przepuszczalności wody oraz korozję betonu, na przykład agresję siarczanową lub chlorkową. W obu przypadkach wystąpi również korozja zbrojenia. Wszystkie te uszkodzenia korozyjne zmniejszają trwałość betonu i skracają czas eksploatacji wykonanych z niego konstrukcji (2). Jedną z najważniejszych przyczyn powstawania pęknięć w stwardniałym betonie jest skurcz przy wysychaniu. Skurcz przy wysychaniu jest nazywany skurczem, ponieważ zmniejszenie objętości betonu, spowodowane zmniejszeniem jego wilgotności może wystąpić przy stałej wilgotności względnej i temperaturze otoczenia (3).

Na skurcz betonu wpływają właściwości betonu, przede wszystkim zawartość makroporów w zaczynie cementowym, stopień hydratacji cementu, stosunek w/c, temperatura dojrzewania, właściwości cementu, właściwości domieszek chemicznych lub dodatków mineralnych, porowatość i zawartość kruszywa, oraz stosunki wymiarowe elementu betonowego, przede wszystkim powierzchni do grubości. Ponadto warunki panujące w środowisku, głównie wilgotność względna i stopień nasłonecznienia mają duży wpływ na skurcz (4).

Wiadomo, że skurcz przy wysychaniu elementów betonowych jest ich niekorzystną właściwością. Brak uwzględniania skurczu przy wysychaniu przy projektowaniu konstrukcji, może powodować powstanie szkodliwych pęknięć, które mogą prowadzić do koro-

#### 1. Introduction

It is well known that the cracks, which are formed for various reasons are decreasing the durability of concrete. In principle, cracks are formed if the tensile forces are at any points exceeding the strain capacity of the concrete (1). These cracks will cause the increase of water permeability and the concrete corrosion, for example sulphate or chloride attacks. In the last case the reinforcement corrosion will also occur. All these corrosion damage will reduce the durability of the concrete and shorten the service life of the structures made of it (2).

One of the most important causes of cracks formation in hardened concrete is drying shrinkage. Drying shrinkage is called the form of a shrinkage as time-dependent volume reduction due to water loss in a specimen allowed to dry under a constant relative humidity and temperature (3).

Shrinkage of concrete is affected by concrete properties such as void ratio of cement paste, cement hydration degree, water/cement ratio, curing temperature, properties of cement, properties of admixtures and additions, aggregate content and rigidity, volume-to-surface ratio and thickness of elements. In addition, environmental conditions such as relative humidity, drying degree and time also affect the shrinkage (4).

It is well known that the drying shrinkage of concrete elements is their negative property. If the drying shrinkage is not precisely considered in the design of a structure, a number of severe and harmful cracks may be formed, which can lead to the corrosion of reinforcement and reduced service life of concrete elements (5). Reducing the water/cement ratio, utilisation of mineral additives

\*Autor do korespondencji: Süleyman Özen,  
e-mail: suleymanozen44@gmail.com

\*Corresponding author: Süleyman Özen,  
e-mail: suleymanozen44@gmail.com

zji zbrojenia i zmniejszenia żywotności elementów betonowych (5). Obniżenie stosunku w/c, stosowanie dodatków mineralnych i domieszek zmniejszających skurcz [DRS], jak również włókien, należą do metod stosowanych do zapobiegania powstawaniu tych pęknięć (6-7). Zmniejszenie stosunku w/c, stosowanie dodatków mineralnych lub włókien polipropylenowych, tych ostatnich pogarszających urabialność mieszanki betonowej, zapobiegają pękaniu skurczowemu. Inne metody, z wyjątkiem domieszek DRS o niskiej lepkości - tj. obniżenie stosunku wodno-cementowego, dodawanie dodatków mineralnych lub włókien, zmniejsza urabialność, dlatego nieuniknione jest stosowanie domieszki upłynniającej.

Wiadomo, że domieszka DRS lub włókna stalowe, polipropylenowe czy szklane mogą być stosowane w celu zapobiegania pękaniu skurczowemu. Domieszkę DRS po raz pierwszy wyprodukowano w Japonii w 1982 r. Stwierdzono, że następuje zmniejszenie skurczu mieszanek betonowych z wykorzystaniem wspomnianych domieszek. Odnotowano, że zmniejszenie skurczu nastąpiło z powodu zapobiegania skurczowi i pękaniu w wyniku zmniejszenia napięcia powierzchniowego mieszanek z zastosowaniem domieszki DRS (6-8). Niektóre badania związane z tym zagadnieniem podsumowano poniżej.

Folliard i Berke (6) oraz Ruacho i in. (9) zbadali wpływ zastosowania domieszki DRS na przepuszczalność i powstawanie pęknięć w mieszankach betonowych o normalnej i wysokiej wytrzymałości. W badaniach ustalono, że zawartość domieszki powinna wynosić 1,5% masy spoiwa. Stwierdzono, że stosowanie domieszki DRS zmniejsza przepuszczalność mieszanek oraz zapobiega powstawaniu rys.

Rongbing i Jian (10) oraz Quangphu i in. (11) badali skurcz przy wysychaniu oraz właściwości mechaniczne betonu z dodatkiem domieszki DRS, w różnych ilościach. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem dodatku tej domieszki zmniejsza się udział pęknięć w betonie. Ponadto zastosowanie DRS miało negatywny wpływ na właściwości mechaniczne mieszanek betonowych. Autorzy (10, 11) stwierdzili, że negatywny wpływ był bardziej zauważalny wraz ze wzrostem dodatku tej domieszki w mieszankach.

Wpływ dodatku włókien polipropylenowych [PW] na właściwości fizyczne i mechaniczne mieszanek betonowych badali Sun i Xu (12). Przeprowadzono obserwacje mikrostruktury i strefy przejściowej mieszanek betonowych pod skaningowym mikroskopem elektronowym. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że udział mikropęknięć w mieszankach betonowych oraz wielkość i zawartość mikropęknięć w strefie przejściowej zmniejszały się wraz z dodatkiem włókien. Sun i Xu (12) ustalili, że wykorzystanie włókien poprawia przepuszczalność mieszanek betonowych; jednak odporność na ścieranie uległa zmniejszeniu. Ponadto potwierdzono, że optymalny dodatek włókien polipropylenowych do mieszanek betonowych, w tych badaniach, wynosił 0.9 kg/m<sup>3</sup>.

Wang i in. (13) oraz Yoo i in. (14) zbadali wpływ zastosowania domieszki DRS na wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i zginanie betonów zbrojonych włóknami, zarówno o normalnej, jak i dużej wytrzymałości. Yoo i in. (14) ustalili, że dodanie tej domieszki

and shrinkage reducing admixtures [SRA] as well as fibers are among the methods used to prevent these cracks formation (6-7). Reducing the water/cement ratio, addition of mineral additives or the application of polypropylene fibers [PF] reduce the workability of the concrete mixture, even if they prevent shrinkage cracking. Other methods, except of SRA with low viscosity – i.e. to decrease water/cement ratio, to add mineral additives or the fibers application, are reducing the workability, so it is inevitable to use high range water reducing admixture.

It is known that SRA or steel, polypropylene, or glass fibers can be used to prevent shrinkage cracking. SRA were firstly produced in Japan in 1982. It was reported that there is a reduction in the shrinkage of concrete mixtures with utilization of the mentioned admixtures. Decrease of shrinkage was reported to occur due to preventing shrinkage and cracking in consequence of the reduction of surface tension of the mixtures with the use of the SRA (6-8). Some studies related to this subject are summarized below.

Folliard and Berke (6) and Ruacho et al. (9) investigated the permeability and cracks formation effects of the SRA utilization in normal and high strength concrete mixtures. In these investigations, the mentioned admixture ratio was determined to be 1.5 % by mass of the binder. It was found that the permeability of the mixtures decreases and cracks formation is prevented by using SRA.

Rongbing and Jian (10) as well as Quangphu et al. (11) studied the drying shrinkage behaviour and mechanical properties of concrete, produced with SRA addition at different ratios. According to the results, it was found that as the ratio of SRA increased, the share of cracks in concrete was decreasing. In addition, the use of SRA negatively affected the mechanical properties of the concrete. These authors (10,11) were stating that this negative effect became more obvious with the increase in the SRA share used in mixes.

The effect of polypropylene fibres [PF] addition on the physical and mechanical properties of concrete mixtures was investigated by Sun and Xu (12). SEM analyses were performed to observe the microstructure and the interfacial transition zone [ITZ] of the concrete mixtures. According to the test results, it was determined that the share of micro cracks in concrete mixtures and the size and content of micro cracks in ITZ decreased with fiber addition. It was reported by the authors (12) that the utilization of fiber improved the permeability properties of concrete mixtures; however, the abrasion resistance decreased. In addition, it was confirmed that optimum PF addition for concrete mixtures in this study was 0.9 kg/m<sup>3</sup>.

Wang et al. (13) and Yoo et al. (14) investigated the effects of SRA application on the mechanical properties i.e. compressive, tensile and flexural strength, of both normal and high strength fiber-reinforced concretes. Yoo et al. (14) determined that addition of SRA reduces the compressive, tensile and flexural strength of concrete. However, opposite of these statements Wang et al. (13) found that the application of SRA increases the compressive and flexural strength of concrete.

zmniejsza wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie i zginanie betonu, jednak w przeciwieństwie do tych obserwacji Wang i in. (13) stwierdzili, że domieszka DRS zwiększa wytrzymałość betonu na ściskanie.

Topçu i Canbaz (4) badali wpływ włókien na właściwości mechaniczne betonu. W tym celu przygotowano mieszanki betonowe z trzema różnymi dodatkami włókien stalowych i polipropylenowych. Uzyskane wyniki wykazały, że różne dodatki włókien stalowych i polipropylenowych poprawiły właściwości mechaniczne betonu - szczególnie wytrzymałość na zginanie, ale negatywnie wpłynęły na urabialność.

Türker (15) zbadał wpływ dodatku włókien polipropylenowych i siatki stalowej na pęknięcia przy rozciąganiu. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zastosowanie siatki stalowej zmniejszyło pęknięcia przy rozciąganiu o 65%, podczas gdy zastosowanie włókien PW zmniejszyło je o 72%.

Wpływ domieszki DRS na moduł sprężystości mieszanek betonowych badał Kadioğlu (7). W tym celu przygotowano mieszanki betonowe o dwóch różnych stosunkach w/c. Zastosowanie domieszki DRS nie miało większego wpływu na moduł sprężystości mieszanek betonowych.

Zmniejszenie skurczu we wczesnym dojrzewaniu betonów żuźlowych badali Aly i in. (16). W tym celu przygotowano mieszanki betonowe zawierające żużel bez i z dodatkiem włókien PW. Autorzy odnotowali, że mieszanki betonowe zawierające te włókna wykazywały większą tendencję do pęknięcia niż bez włókien, ponieważ miały większy współczynnik skurczliwości i moduł sprężystości.

Bloom i Bentur (17) badali skurcz przy wysychaniu mieszanek betonowych, o dużej oraz normalnej wytrzymałości. W tym celu przygotowano 2 serie mieszanek betonowych o niskim i wysokim stosunku w/c. Autorzy stwierdzili, że wewnętrzne naprężenia betonu wzrastały wraz ze wzrostem wytrzymałości mieszanki betonowej.

Wpływ wilgotności kruszywa lekkiego na skurcz przy wysychaniu mieszanek betonowych zbadali Mardani-Aghabaglou i in. (18). Przygotowano mieszanki betonowe z dodatkiem pumeksu o 3 różnych zawartościach wilgoci: całkowicie suchego, suszonego w powietrzu, a także nasyconego wodą powierzchniowo suchego. Opad stożka oraz rozplływ utrzymywano na stałym poziomie we wszystkich mieszankach. Autorzy stwierdzili, że zastosowanie nasyconego i powierzchniowo suchego kruszywa spowodowało zmniejszenie skurczu betonu przy wysychaniu. Wspomniany korzystny efekt wynika z wewnętrznego nasycenia kruszywa wodą. Podobne wyniki uzyskał Aitcin (19).

Jak wynika z przeglądu literatury domieszka DRS i włókna PW odgrywają ważną rolę w ograniczaniu powstawania rys spowodowanych skurczem przy wysychaniu w zaprawach i betonach. Są jednak sprzeczne wyniki niektórych autorów dotyczące wpływu stosowania włókien i domieszki DRS w przypadku świeżych betonów i ich niektórych właściwości mechanicznych. W niniejszej pracy

Topçu and Canbaz (4) investigated the effect of fibers on the mechanical properties of concrete mixtures. For this purpose, concrete mixtures with 3 different additions of steel and polypropylene fibers were prepared. According to the test results, steel and polypropylene fibers added to concrete at different quantities increased the mechanical properties of the concrete – especially flexural strength significantly, but they negatively affected the workability.

Türker (15) investigated the effect of PF and steel mesh addition on tensile cracks. According to the obtained results, it was found that the use of steel mesh reduced the tensile cracks by 65% while the use of PF reduced them by 72%.

The effect of the SRA on the elastic modulus of concrete mixtures was investigated by Kadioğlu (7). For this purpose, concrete mixtures containing two different water/cement ratios were prepared. According to the results, the use of SRA did not significantly affect the elasticity modulus of concrete mixtures.

Early-age restricted shrinkage was investigated in slag concretes by Aly et al. (16). For this purpose, concrete mixtures containing slag were prepared in the absence and presence of PF. It was reported by the authors that concrete mixtures containing PF showed higher tendency to cracks formation than those without PF, because they have higher shrinkage and elasticity modulus.

In another study, Bloom and Bentur (17) studied the drying-shrinkage behaviour of high and normal strength concrete mixtures. For this purpose, 2 series of concrete mixtures were prepared with low and high water/cement ratio. The authors stated that the internal stress of the concrete was increasing along with the increasing strength of the concrete mixture.

The effect of the lightweight aggregate moisture condition on the drying shrinkage of the concrete mixtures were investigated by Mardani-Aghabaglou et al. (18). For this purpose, concrete mixtures were prepared by using light pumice aggregates with 3 different moisture contents as completely dry, air-dried and saturated surface dry (SSD). Slump and flow values were kept constant in all mixtures. The authors stated that in the case of a SSD use, the aggregate was causing the reduction of drying shrinkage of the concrete. The mentioned positive effect is due to the internal curing of SSD aggregates. Similar results were obtained by Aitcin (19).

As it is understood from the literature, SRA and PF play an important role in decreasing the cracks caused by drying shrinkage in mortars and concretes. However, there are contradictory results of some authors about the effect of the use of fibers and SRA on the cementitious systems in the fresh state and on some mechanical properties. In this study, the effect of utilization of SRA and PF on the fresh state properties, as well as compressive strength, water absorption capacity and drying shrinkage of the concrete mixtures were investigated comparatively. Moreover, the effects of the application of both SRA and the PF simultaneously in concrete mixtures on the properties mentioned above were investigated.

Tablica 1 / Table 1

## SKŁAD CHEMICZNY ORAZ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTU

## CHEMICAL COMPOSITION AND MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT

Tlenek / Oxide	%	Właściwości fizyczne / Physical properties	
SiO <sub>2</sub>	18.86	Ciężar względny / Specific gravity	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.71	Właściwości mechaniczne / Mechanical properties	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.09	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	1 dzień / day
CaO	62.70		2 dni / days
MgO	1.16		7 dni / days
SO <sub>3</sub>	2.39		28 dni / days
Na <sub>2</sub> O+0.658 K <sub>2</sub> O	0.92	Stopień rozdrobnienia / Fineness	
Cl <sup>-</sup>	0.01	Powierzchnia właściwa Blaine'a / Blaine's specific Surface, cm <sup>2</sup> /g	3500
Pozostałość nierozpuszczalna / Insoluble residual	0.32	Pozostałość na sicie / Residue on sieve 0.045 mm, %	
Strata prażenia / Loss on ignition	3.20		
Wolne / Free CaO	1.26		

porównano wpływ domieszki DRS i włókien PW na właściwości świeżego betonu, a także na wytrzymałość na ściskanie, absorpcję wody i skurcz przy wysychaniu betonów dojrzałych. Ponadto zbadano wpływ jednoczesnego zastosowania domieszki DRS i włókien PW w mieszankach betonowych na wyżej wymienione właściwości.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Materiały

W pracy jako spoiwo zastosowano cement CEM I 42.5R według normy TS EN 197-1 (20). Właściwości fizyczne oraz skład chemiczny tego cementu, dostarczone przez producenta, przedstawiono w tablicy 1.

W pracy zastosowano kruszywo wapienne. Gęstość właściwą i nasiąkliwość kruszywa, oznaczone zgodnie z TS EN 1097-6 (21), podano w tablicy 2. Ponadto wykonano analizę sitową kruszyw zgodnie z TS EN 206 (22), którą zestawiono w tablicy 3. W mieszankach betonowych stosowano kruszywo wapienne, 50% o uziarnieniu 0-5 mm, 20% o uziarnieniu 5-15 mm i 30% o uziarnieniu 15-25 mm.

Krzywa uziarnienia kruszywa oraz krzywe graniczne według TS EN 206 (22) są pokazane na rysunku 1. Jak widać, krzywa uziarnienia kruszywa jest bliska idealnej krzywej pomiędzy normowymi krzywymi granicznymi. W mieszankach zawierających włókno zastosowano włókno polipropylenowe 0.5x1.15x5 mm. Gęstość i wytrzymałość na rozciąganie włókien, podane przez producenta, wynoszą odpowiednio 0.92 g/cm<sup>3</sup> i 400-600 N/mm<sup>2</sup>. W celu uzyskania założonego opadu stożka mieszanek betonowych, zastosowano w różnych proporcjach domieszkę upłynniającą na bazie eteru polikarboksylogowego. Niektóre właściwości tej domieszki, podane przez producenta, zamieszczono w tablicy 4. Handlowa, jednoskładnikowa domieszka DRS została wykorzystana do zbadania wpływu jej stosowania na skurcz mieszanek betonowych. Niektóre właściwości domieszki DRS, podane przez producenta,

## 2. Materials, mix preparation and test methods

### 2.1. Materials

In this study, CEM I 42.5R cement in accordance with TS EN 197-1 (20) standard was used as binder. The physical and mechanical properties and chemical composition of this cement, provided by the manufacturer are given in Table 1.

Crushed limestone aggregate was used in this study. The specific gravity and water absorption capacity of the aggregates determined in accordance with TS EN 1097-6 (21) are shown in Table 2. In addition, sieve analysis of the aggregates was also carried out in accordance with TS EN 206 (22) and is given in Table 3. In concrete mixtures, crushed limestone aggregates were used, grading of 0-5 mm as 50%, 5-15 mm as 20% and 15-25 mm as 30% by total aggregate volume.

The grading curve of combined aggregate and TS EN 206 (22) standard limits are shown in Fig. 1. As it can be seen, the grading curve of the combined aggregate is close to the ideal curve between the relevant standard limits. 0.5x1.15x5 mm prismatic polypropylene fiber was used in the mixtures containing fiber. The density and tensile strength of the fiber were determined by the manufacturer as 0.92 g/cm<sup>3</sup> and 400-600 N/mm<sup>2</sup>, respectively. In order to provide the target slump value of concrete mixtures,

Tablica 2 / Table 2

## WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE KRUSZYW

## PHYSICAL PROPERTIES OF AGGREGATES

Kruszywo / Aggregate		Gęstość właściwa Bulk Specific gravity	Nasiąkliwość Absorption capacity %
Rodzaj Type	Frakcja Fraction mm		
Wapień Limestone	0-5	2.68	1.0
	5-15	2.69	0.31
	15-25	2.69	0.35

Tablica 3 / Table 3

UZIARNIENIE KRUSZYW

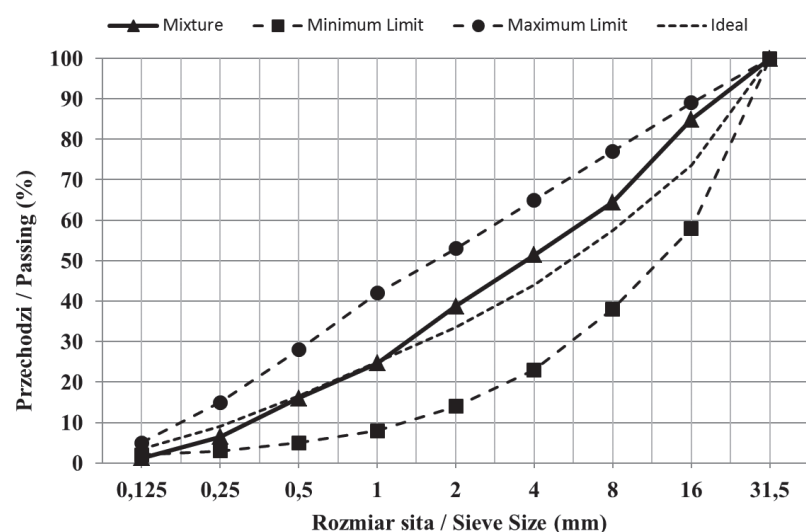
PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS OF AGGREGATES

Rozmiar sita Sieve size, mm	Procent przechodzących ziaren / Percent passing		
	0-5 mm	5-15 mm	15-25 mm
31.5	100	100	100
16	100	100	49.7
8	100	72.2	0.1
4	100	7	0
2	77.5	0	0
1	49.3	0	0
0.5	32	0	0
0.25	12.9	0	0
0.125	2.5	0	0

przedstawiono w tablicy 4.

2.2. Przygotowanie mieszanki

W pracy zbadano wpływ domieszki DRS i włókien polipropylenowych na skurcz mieszanek betonowych. W tym celu, oprócz mieszanki kontrolnej bez domieszki DRS i włókien polipropylenowych, przygotowano trzy serie mieszanek betonowych. W pierwszej serii



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa oraz krzywe graniczne według TS EN 206 (22)

Fig. 1. Gradation curve of combined aggregate and TS EN 206 (22) standard limits

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI DOMIESZEK

PROPERTIES OF ADMIXTURES

Rodzaj / Type	Gęstość Density g/cm <sup>3</sup>	Sucha masa Solid Content %	pH Value	Zawartość chlorków Chloride content %	Zawartość alkaliów Alkali Content [Na <sub>2</sub> O] %
Domieszka upłynniająca [eter polikarboksylowy] Polycarboxylate-ether based high range water reducing admixture	1.097	36.4	3.8	<0.1	<10
Domieszka redukująca skurcz Shrinkage reducing admixture	1.01	95	4.0–8.0	<0.1	<10

a type of polycarboxylate-ether based water reducing admixture was used in different proportions. Some properties of the water reducing admixture given by the manufacturer are shown in Table 4. Monotype commercial SRA was used to investigate the effect of the use of SRA on shrinkage behaviour of concrete mixtures. Some characteristics of the SRA given by the manufacturer are shown in Table 4.

2.2. Mixture preparation

In this study, as mentioned earlier, the effect of SRA and polypropylene fiber on the shrinkage behaviour of concrete mixtures was investigated. For this purpose, three series of concrete mixtures were prepared, in addition to the control mixture without SRA and polypropylene fiber.

In the first concrete mixture series, the amount of used SRA was 2% of cement by mass. In the second series, polypropylene fiber was added equal 1% of the total volume. In the last series, SRA up to 2% by mass of the cement and polypropylene fiber as 1% by volume were added together. In all concrete mixtures, the water/cement ratio, cement dosage and slump values were kept constant as 0.40, 450 kg/m<sup>3</sup> and 210±20 mm, respectively. Theoretical and corrected concrete mix proportions for 1 m<sup>3</sup> of concrete mixture are given in Table 5 and Table 6, respectively. As it can be seen

from Table 5, 50% more water-reducing admixture was used in concrete mixtures, for providing desired slump value in the mixture with polypropylene fiber, compared to those without fiber.

2.3. Test methods

The slump values and fresh state unit weights of the concrete mixtures were determined in accordance with TS EN 12350-2 (23) and TS EN 12350-6 (24) standards, respectively. Hardened state properties of concrete mixtures such as compressive strength, water absorption capacity and drying shrinkage behaviour were also investigated. 18 concrete specimens, 15 cubes and 3 prismatic beams were produced from each mixture. The samples were cured in water in standard conditions until the testing day.

Tablica 5 / Table 5

TEORETYCZNE SKŁADY W 1 m<sup>3</sup> MIESZANKI BETONOWEJ ORAZ WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEGO BETONUTHEORETICAL MIX PROPORTION FOR 1 m<sup>3</sup> CONCRETE MIXTURE AND SOME FRESH PROPERTIES

Mieszanka Mix	Cement kg	Woda Water kg	Kruszywo / Aggregate (mm)			Włókno Fiber kg	HRWRA* kg	SRA** kg	Opad stożka Slump mm	Gęstość / Unit Weight kg/m <sup>3</sup>	
			0-5 kg	5-15 kg	15-25 kg					Teoretyczna Theoretical	Oznaczona Measured
C	450	180	882	354	531	0	2.4	0	210	2399	2360
SRA	450	180	870	349	524	0	2.4	9	200	2384	2445
PF	450	180	867	348	522	10.4	3.6	0	210	2381	2325
SRA+PF	450	180	855	343	515	10.4	3.6	9	220	2366	2390

\* Domieszka znacznie redukująca ilość wody / High range water-reducing admixture

\*\* Domieszka redukująca skurcz / Shrinkage reducing admixture

Tablica 6 / Table 6

SKORYGOWANE SKŁADY MIESZANEK BETONOWYCH

CORRECTED MIX PROPORTIONS OF THE CONCRETE MIXTURES

Mieszanka Mix	Cement (kg)	Woda Water (kg)	Kruszywo / Aggregate (mm)			Włókno Fiber (kg)	HRWRA* (kg)	SRA** (kg)
			0-5 (kg)	5-15 (kg)	15-25 (kg)			
C	443	177	868	348	522	0	2.36	0
SRA	461	185	892	358	537	0	2	9
PF	439	176	847	340	510	10.2	3.52	0
SRA+PF	455	182	864	346	520	10.5	3.64	9.09

\* Domieszka znacznie redukująca ilość wody / High range water-reducing admixture

\*\* Domieszka redukująca skurcz / Shrinkage reducing admixture

dodatek domieszki DRS wynosił 2% masy cementu. W drugiej serii dodano włókien polipropylenowych, których zawartość wynosiła 1% całkowitej objętości. W ostatniej serii dodatek domieszki DRS wyniósł 2% masy cementu, a włókna polipropylenowego 1% całkowitej objętości. We wszystkich mieszankach betonowych stosunek w/c, zawartość cementu i opad stożka utrzymywano na stałym poziomie, odpowiednio 0.40, 450 kg/m<sup>3</sup> i 210 ± 20 mm. Teoretyczny oraz skorygowany skład w 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej przedstawiono odpowiednio w tablicach 5 i 6. Jak podano w tablicy 5, dla uzyskania założonego opadu stożka, w mieszankach betonowych z włóknami polipropylenowymi, zastosowano 50% więcej domieszki upłynniającej, w porównaniu z mieszankami bez włókien.

### 2.3. Metody badań

Opad stożka oraz gęstość świeżego betonu określono odpowiednio według norm TS EN 12350-2 (23) i TS EN 12350-6 (24). Badano również właściwości stwardniałych betonów, a mianowicie wytrzymałość na ściskanie, absorpcję wody i skurcz przy wysychaniu. Z każdej mieszanki przygotowano 18 próbek betonu: 15 kostek i 3 belki. Próbkę przechowywano w wodzie w warunkach normowych, do dnia badania.

#### 2.3.1. Compressive strength

1, 3, 7 and 28-day compressive strength of concrete were determined on 100 mm cube specimens in accordance with TS EN 12390-3 (23).

#### 2.3.2. Water absorption capacity

The water absorption capacities of the 28-day hardened concrete specimens were determined on 100 mm cube specimens in accordance with ASTM 642-97 standard (26). The water absorption ratios of the mixtures are calculated according to the Eq. 1.

$$m_1 = \frac{b - a}{a} \cdot 100 \quad [1]$$

where; "a" is the oven dry mass of specimens, "b" is the saturated surface dry mass.

#### 2.3.3. Drying-shrinkage

In order to investigate the drying shrinkage behaviour of concrete mixtures, three prism specimens as 75 mm x 75 mm x 285 mm were produced per series in accordance with ASTM C157 (27). Specimens were removed from the mold after 24 hours and stored at 20°C for 48 hours, in lime-saturated water. Afterwards, the specimens were removed from the water and stored in the laboratory at 20°C and a relative humidity of 55%. Lengths of the prisms were measured after chosen days as well as their length changes – shrinkage % were calculated as shown in Eq. 2.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \cdot 100 \quad [2]$$

Where: L<sub>1</sub> is the initial length measured after the specimens removing from the curing pool, L is the measured length after chosen days and L<sub>0</sub> is the actual measured length.

### 2.3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałości betonu na ściskanie po 1, 3, 7 i 28 dniach zmierzono na kostkach o boku 100 mm zgodnie z TS EN 12390-3 (23).

### 2.3.2. Absorpcja wody

Absorpcję wody przez beton po 28 dniach oznaczono zgodnie z normą ASTM 642-97 (26) na kostkach o boku 100 mm. Absorpcję wody obliczono według równania 1.

$$m_1 = \frac{b - a}{a} \cdot 100 \quad [1]$$

gdzie; „a” to masa próbek wysuszonych, „b” to masa po nasyceniu wodą.

### 2.3.3. Skurcz wysychania

W celu zbadania skurczu wysychania betonu przygotowano po trzy próbki o wymiarach: 75 mm x 75 mm x 285 mm, zgodnie z ASTM C157 (27). Próbki wyjmowano z form po 24 godzinach i przechowywano w 20°C przez 48 godzin w wodzie nasyconej wodorotlenkiem wapnia. Następnie próbki wyjmowano z wody i przechowywano w laboratorium w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 55%. Po określonych dniach mierzono długość próbek oraz obliczano zmiany długości – skurcz %, według równania 2.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \cdot 100 \quad [2]$$

gdzie:  $L_1$  jest początkową długością zmierzoną po usunięciu próbek z wanny,  $L$  długością zmierzoną po określonych dniach, a  $L_0$  zmierzoną długością początkową.

## 3. Wyniki badań i dyskusja

### 3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość betonu na ściskanie pokazano na rysunku 2. Każdą wielkość wyznaczono obliczając średnią z 3 próbek. W porównaniu z mieszanką kontrolną wytrzymałość betonu na ściskanie nie uległa niekorzystnemu wpływowi zastosowania domieszki DRS. Jednakże wytrzymałość po 1 dniu mieszanki zawierającej domieszkę DRS uległa nieznacznemu zmniejszeniu. Stwierdzono, że zastosowanie domieszki DRS w mieszance betonowej wydłużyło czas wiązania. Spadek wytrzymałości po 1 dniu był spowodowany efektem opóźniającym wiązanie przez domieszkę DRS.

Wytrzymałość betonów na ściskanie po 1, 3, 7 i 28 dniach, zawierających dodatek włókien zwiększyła się odpowiednio o 7%, 25%, 15% i 16%. Wzrost wytrzymałości na ściskanie spowodowany dodatkiem włókien do mieszanek może być równocześnie dowodem na równomierne rozproszenie włókien. Według Mardani-Aghabaglou i in. (28), w mieszance betonowej, w której włókna są równomiernie rozproszone, wytrzymałość mieszanki na ściskanie wzrasta z powodu blokowania poprzecznego odkształce-

## 3. Test results and discussion

### 3.1. Compressive strength

The compressive strength of concrete is shown in Fig. 2. Each value was determined by calculating the average of 3 different specimens. As seen from the results, the compressive strength of the concrete were not adversely affected by the use of SRA, compared to the control mixture. However, 1-day strength of mixture containing SRA decreased slightly. It was observed that the use of SRA in concrete mixture increased the setting time. The decrease of 1-day strength was due to set-retarding effect of SRA.

Compared to the control mixture 1, 3, 7 and 28-days compressive strengths of the concrete, containing fibers addition increased by 7%, 25%, 15%, 16%, respectively. The increase of compressive strength by fibers addition to the mixtures may be a proof that the fibers were distributed homogeneously. According to Mardani-Aghabaglou et al. (28), in the concrete mixture in which the fiber is homogeneously dispersed, the compressive strength of the mixture increases because of blocking the lateral deformation of the specimen through fibers. The SRA+PF mixtures containing PF and SRA showed the highest compressive strength.

### 3.2. Water absorption capacity

The water absorption capacity of concrete after 28 days is shown in Fig. 3. Each value represents the average of 3 measurements. As it can be seen from the obtained results, the water absorption capacity of all concrete samples was lower than 3%, even without the use of SRA and PF. In this regard, according to the classification recommended by CEB-FIB (29), the properties of produced concrete mixtures can be considered as good, taking into account the water absorption capacity. By using SRA and PF, the water absorption ratios of concrete decreased in comparison with the control mixture.

The relationship between the 28-day water absorption capacity of concrete and the 28-day compressive strength is shown in Fig. 4. Increase of void ratio in the mixtures, as known, raises the water absorption ratio while compressive strength decreases (30). However, as it is shown in Fig. 4, there is a weak relationship between the water absorption ratio and the compressive strength of the mixtures.

### 3.3. Drying shrinkage

The drying shrinkage measurement results and relative shrinkage values of the concrete mixtures are shown in Figs. 5 and 6, respectively. Each value was determined by calculating the average of 3 different specimens. As expected, irrespective of SRA and PF use, the intensity of shrinkage increase was decreasing with time while it was higher during the first days. The drying shrinkage values of the mixtures was decreasing with the addition of SRA and PF, compared to the control mixture. This mentioned shrinkage difference became more obvious with time. When the water in the capillary voids evaporates, the tensile stresses on the microstructure of

nia próbek przez włókna. Mieszanki DRS + PW, a więc zawierające włókna PW i domieszkę DRS osiągnęły największą wytrzymałość na ściskanie.

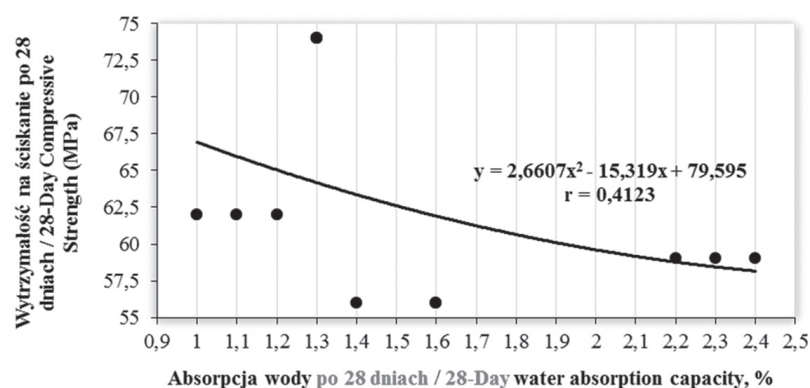
### 3.2. Absorpcja wody

Absorpcję wody betonu dojrzewającego przez 28 dni przedstawiono na rysunku 3. Każda wielkość przedstawia średnią z 3 pomiarów. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że absorpcja wody we wszystkich próbkach betonu nie przekroczyła 3%, nawet bez zastosowania domieszki DRS i włókien PW. W związku z tym, zgodnie z klasyfikacją zalecaną przez CEB-FIB (29), właściwości mieszanek betonowych można uznać za dobre, biorąc pod uwagę absorpcję wody. Stosując domieszkę DRS i włókna PW, absorpcja wody w betonie uległa zmniejszeniu, w porównaniu z mieszanką kontrolną.

Zależność pomiędzy absorpcją wody betonu dojrzewającego 28 dni, a wytrzymałością na ściskanie po tym samym okresie przedstawiono na rysunku 4. Jak wiadomo wzrost zawartości porów w mieszankach zwiększa absorpcję wody, podczas gdy wytrzymałość na ściskanie ulega zmniejszeniu (30). Natomiast, jak pokazano na rysunku 4, korelacja pomiędzy absorpcją wody a wytrzymałością mieszanek na ściskanie jest słaba.

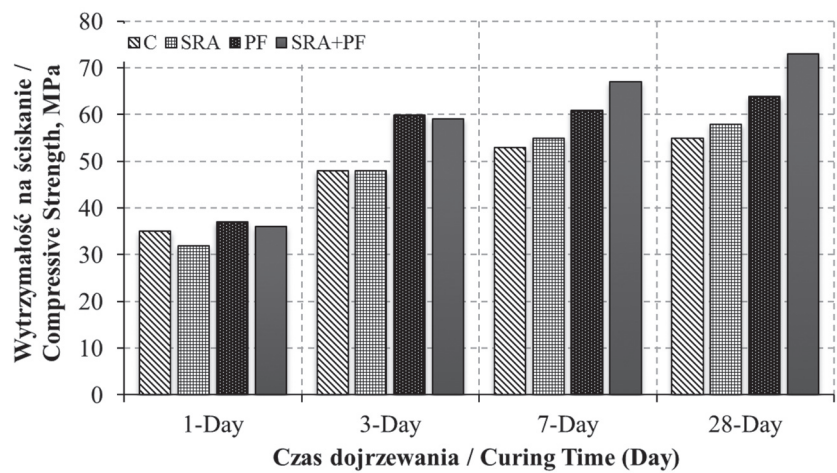
### 3.3. Skurcz wysychania

Wyniki pomiarów skurczu wysychania oraz względną wielkość skurczu mieszanek betonowych przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5 i 6. Każda wielkość została wyznaczona jako średnia obliczona dla 3 próbek. Zgodnie z oczekiwaniami, niezależnie od zastosowania domieszki DRS i włókien PW, wzrostu skurczu zmniejszał się wraz z upływem czasu dojrzewania betonu i był duży w pierwszych dniach. W porównaniu do mieszanki kontrolnej skurcz wysychania próbek betonu malał wraz ze wzrostem dodatku domieszki DRS i włókien PW. Z upływem czasu wspomniana różnica skurczu stała się bardziej zauważalna. Gdy woda w porach kapilarnych ulega wyparowaniu, naprężenia rozciągające



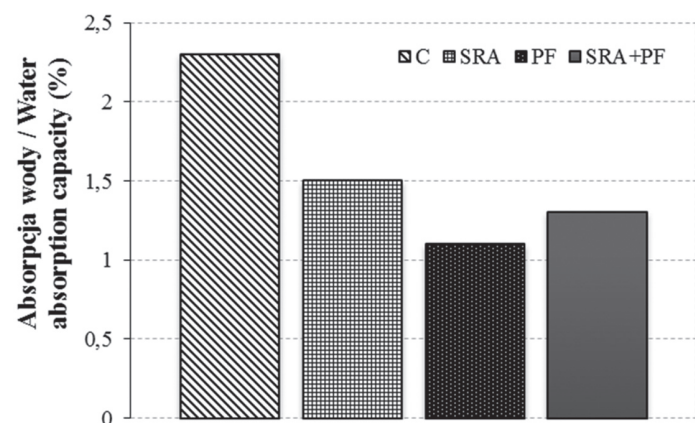
Rys. 4. Brak zależności pomiędzy absorpcją wody a wytrzymałością na ściskanie betonu po 28 dniach

Fig. 4. Lack of relationship between water absorption and compressive strength of concrete after 28-day



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie betonów, MPa

Fig. 2. Compressive strength of concretes, MPa



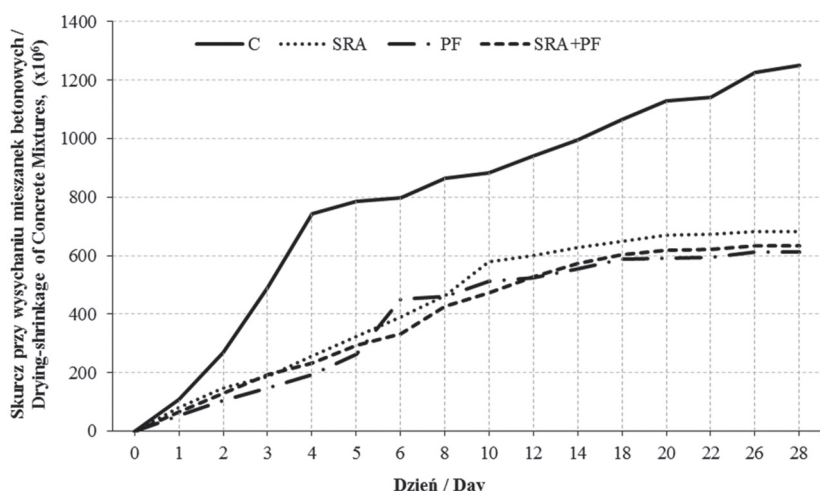
Rys. 3. Absorpcja wody betonów dojrzewających przez 28 dni

Fig. 3. Water absorption capacity of concretes after 28 days of curing

the concrete cause shrinkage cracking. Since the SRA reduces concrete surface stresses, it also reduces the shrinkage cracks on the concrete surface (31). Polypropylene fibers in the mixture act as a bridge between the cracks and prevent cracks propagation (32). As it can be seen from Fig. 6, after 28 days, the concrete with PF addition was showing off about 51% lower drying shrinkage than the control concrete. This concrete is considered as the most successful mixture in terms of shrinkage behaviour. Other SRA and SRA + PF concretes are showing shrinkage lower by 45% and 50%, respectively, than that of the control sample, and the PF concrete is showing the similar behaviour.

The relationship between the 28-day water absorption capacity and drying shrinkage values of concrete specimens is shown in Fig. 7. It seems that there is a very strong polynomial relationship between water absorption and shrinkage values of concrete. It is known that drying shrinkage is directly related to the void ratio and microstructure of concrete. Within this context, the high water absorption ratio of the concrete





Rys. 5. Skurcz wysychania betonu po 28 dniach twardnienia

Fig. 5. Drying shrinkage of concrete after 28 days of hardening

w betonie powodują powstawanie rys skurczowych. Ponieważ domieszka DRS zmniejsza naprężenia powierzchniowe w betonie, zmniejsza również powstawanie rys skurczowych na powierzchni betonu (31). Włókna polipropylenowe w mieszance działają jako złącza pomiędzy pęknięciami i zapobiegają ich propagacji (32). Jak można zauważyć na rysunku 6, po 28 dniach beton z dodatkiem włókien PW wykazał około 51% mniejszy skurcz wysychania niż beton kontrolny. Beton ten jest uważany za najbardziej udaną mieszankę pod względem skurczu wysychania. Inne betony, DRS i DRS + PW, wykazują mniejszy skurcz odpowiednio o 45% i 50% niż próbka kontrolna, a beton PW wykazuje podobne zachowanie.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność pomiędzy absorpcją wody po 28 dniach, a skurczem wysychania próbek betonowych. Wydaje się, że istnieje bardzo silna wielomianowa zależność pomiędzy absorpcją wody a skurczem betonu. Wiadomo, że skurcz wysychania jest bezpośrednio związany z zawartością makroporów i mikrostrukturą betonu. W tym kontekście duża absorpcja wody w betonie wykazuje, że zawartość porów kapilarnych jest również duża. Wraz ze wzrostem zawartości makroporów w betonie, ubytek wody w przestrzeniach kapilarnych przyspiesza i niekorzystnie wpływa na skurcz wysychania betonu.

#### 4. Wnioski

Na podstawie wyników doświadczalnych dotyczących wpływu handlowej, jednoskładnikowej domieszki redukującej skurcz oraz włókien polipropylenowych na właściwości świeżego betonu, absorpcję wody, skurcz wysychania i wytrzymałość na ściskanie stwardniałych betonów można wyciągnąć następujące wnioski:

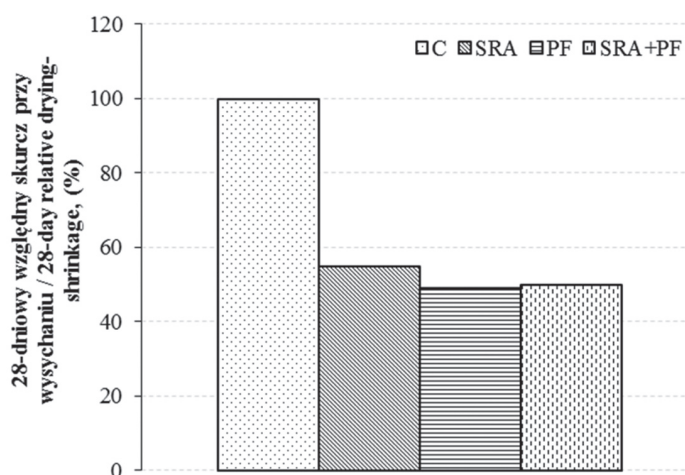
- Dodatek włókien zwiększa potrzebę stosowania domieszki upłynniającej w celu uzyskania założonego opadu stożka.

is indicating that the capillary voids content are also high. As the void ratio of the concrete is increasing, the loss of water in the capillary voids is accelerating and the drying shrinkage behaviour of the concrete is affected adversely.

#### 4. Conclusions

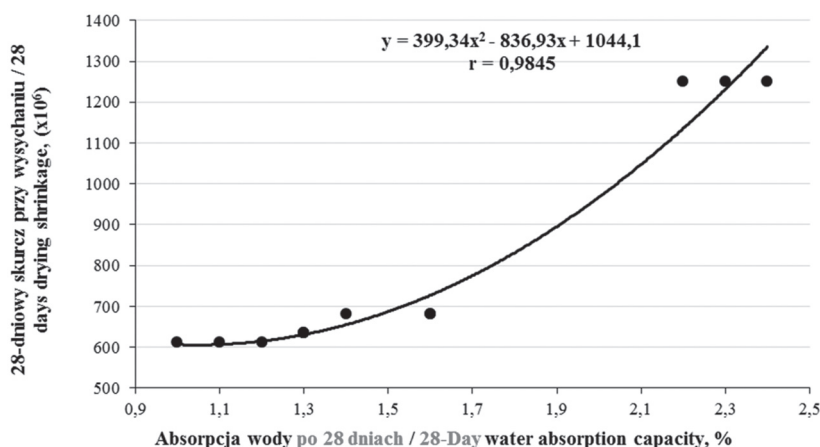
The following conclusions can be drawn regarding the results of the experiments, concerning the effect of a monotype commercial shrinkage reducing admixture and polypropylene fibers on the fresh concrete properties, water absorption capacity, drying shrinkage and compressive strength of the hardened concretes.

- Fibers addition were increasing the necessity of water reducing admixture application to provide the target slump value.



Rys. 6. Względny skurcz wysychania betonów po 28 dniach

Fig. 6. 28-day Relative drying shrinkage of concretes after 28 days



Rys. 7. Korelacja skurczu wysychania z absorpcją wody po 28 dniach

Fig. 7. Relationship between 28-day drying shrinkage and water absorption capacity of concrete

- Zastosowanie domieszki redukującej skurcz oraz włókien polipropylenowych pozytywnie wpływa na wytrzymałość na ściskanie i przepuszczalność betonu.
- Zastosowanie domieszki redukującej skurcz wysychania spowodowało zmniejszenie skurczu betonu, który był mniejszy niż w przypadku mieszanki kontrolnej. Wpływ włókien na skurcz był większy niż domieszki DRS.
- Jest bardzo silna korelacja pomiędzy absorpcją wody a skurczem próbek betonowych. Ustalono jednak, że pomiędzy absorpcją wody a wytrzymałością betonów brak jest korelacji.
- Odnosnie skurczu wysychania wyniki doświadczeń wykazały, że równoczesny dodatek do betonów domieszki DRS i włókien polipropylenowych nie wykazał korzystnego wpływu, wręcz przeciwnie, spowodował jedynie wzrost kosztów.
- Compressive strength and permeability of concrete are affected positively in general as a result of the shrinkage reducing admixture and fiber application.
- Shrinkage values of the concrete were lower than that of the control mixture when the drying shrinkage reducing admixture was applied. Fibers addition influence on shrinkage was more effective than that of SRA.
- There is a very strong relationship between the water absorption ratio and shrinkage values of the concrete samples. However, it was determined that there is a very weak relationship between water absorption ratios and strength values of the concretes.
- The results of the experiments have shown that the combined addition of SRA and polypropylene fibers to concretes provided no additional advantage as far as the drying shrinkage behaviour are concerned, on the contrary, it caused only a cost increase.

## Podziękowania

Autorzy pragną podziękować Bursa Concrete Inc., Polisan Construction Chemicals Company i władzom BASF Chemicals Company za pomoc w dostarczeniu cementu, domieszki redukującej ilość wody, domieszki redukującej skurcz i włókien polipropylenowych, a także za oznaczenie składu chemicznego, właściwości fizycznych i mechanicznych tych produktów.

Poza tym autorzy dziękują za wsparcie Centrum Badań Naukowych Uniwersytetu Bursa Uludag (BAP) w ramach grantu numer AYP (MH) -2016/16. Ponadto trzeci autor pragnie podziękować za stypendium Radzie Naukowo-Technicznej Turcji (TUBITAK) w ramach grantów 217M408 podczas jego studiów doktoranckich.

## Literatura / References

1. B. Baradan, H. Yazıcı, S. Aydın, Concrete. Izmir: Dokuz Eylul University Engineering Faculty Publications, 2015, (in Turkish).
2. N. Hearn, Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete, *ACI Mater. J.* 96, 234-241 (1999).
3. B. Baradan, H. Yazıcı, H. Ün, Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Turkey Ready Mixed Concrete Association, 2010, (in Turkish).
4. İ. B. Topçu, M. Canbaz, Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash, *Constr. Build. Mater.* 21, 1486–1491 (2007).
5. J. A. Almudaiheem, W. Hansen, Effect of specimen size and shape on drying shrinkage of concrete, *Mater. J.* 84, 130-135 (1987).
6. K. J. Folliard, N. S. Berke, Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture, *Cem. Concr. Res.* 27, 1357-1364 (1997).
7. T. Kadioğlu, Shrinkage reducing admixtures, Master Thesis, Istanbul Technical University Institute of Science. Istanbul, Turkey, 2006, (in Turkish).
8. F. Rajabipour, G. Sant, J. Weiss, Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution, *Cem. Concr. Res.* 38, 606-615 (2008).
9. J. M. Ruacho, R. Gettu, A. Aguado, Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete, *Cem. Concr. Res.* 39, 141-146 (2009).

## Acknowledgment

The authors would like to thank Bursa Concrete Inc., Polisan Construction Chemicals Company and BASF Chemicals Company authorities for their kind assistance in providing the cement, water reducing admixture, shrinkage reducing admixture and polypropylene fibers as well as determining the chemical composition, physical and mechanical properties of these products.

In addition, the authors thank for the support of the Center for Scientific Research of the University of Bursa Uludag [BAP] under the grant number AYP (MH) -2016/16. In addition, the third author would like to thank for the scholarship of the Turkish Technical and Technical Council [TUBITAK] under grants 217M408 during his doctoral studies.

10. B. Rongbing, S. Jian, Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 35, 445-448 (2005).
11. N. Quangphu, J. Linhua, L. Jiaping, T. Qian, D. Tienquan, Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete, *Water Sci. Eng.* 1, 67-74 (2008).
12. Z. Sun, Q. Xu, Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete, *Mater. Sci. Eng. A*, 527, 198-204 (2009).
13. J. Y. Wang, N. Banthia, M. H. Zhang, Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviors of fiber reinforced cementitious composites, *Cem. Concr. Comp.* 34, 443-450 (2012).
14. D. Y. Yoo, S. T. Kang, J. H. Lee, Y. S. Yoon, Effect of shrinkage reducing admixture on tensile and flexural behaviors of UHPFRC considering fiber distribution characteristics, *Cem. Concr. Res.* 54, 180-190 (2013).
15. T. Türker, Real precaution against internal stresses in concrete, *Structure and Material*, 150, 24-25 (2000), (in Turkish).
16. T. Aly, J. G. Sanjayan, F. Collins, Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes, *Mater. Struct.* 41, 1741 (2008).
17. R. Bloom, A. Bentur, Free and restrained shrinkage of normal and high strength concretes, *ACI Mater. J.* 92, 211-217 (1992).
18. A. Mardani-Aghabaglou, E. Yoğurtcu, Ö. Andiç-Çakır, Water transport of lightweight concrete with different aggregate saturation levels, *ACI Mater. J.* 112, 681-691, (2015).
19. P. C. Aitcin, *High Performance Concrete*, New York, E&FN SPON, (2004).
20. TS EN 197-1. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Ankara, Institute of Turkish Standards, (2012), (in Turkish).
21. TS EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. Ankara, Institute of Turkish Standards, (2013), (in Turkish).
22. TS EN 206. Concrete - Specification, performance, production and conformity. Ankara, Institute of Turkish Standards, (2013), (in Turkish).
23. TS EN 12350-2. Testing fresh concrete - Part 2: Slump-test. Ankara, Institute of Turkish Standards, (2010), (in Turkish).
24. TS EN 12350-6. Testing fresh concrete - Part 6: Density. Ankara, Institute of Turkish Standards, (2010), (in Turkish).
25. TS EN 12390-3. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Ankara, Institute of Turkish Standards, (2010), (in Turkish).
26. ASTM C642-97. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, (1997).
27. ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, (2017).
28. A. Mardani-Aghabaglou, C. Yüksel, H. Hosseinezhad, K. Ramyar, Performance of steel micro fiber reinforced mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems, *J. Green Build.* 11, 4, 109-130 (2016).
29. Code, CEB-FIB Model. CEB information report no. 213/214. Comite Euro-International DuBeton, Lausanne, (1993).
30. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, (2006).
31. A. B. Eberhardt, R. J. Flatt, Working mechanisms of shrinkage reducing admixtures, *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 305-320 (2016).
32. N. Yousefieh, A. Joshaghani, E. Hajibandeh, M. Shekarchi, Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete, *Constr. Build. Mater.* 148, 833-845 (2017).