

Właściwości betonu z cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II/C-M (S-LL)

Perspective of concrete with portland composite cement CEM II/C-M (S-LL)

Lukáš Húlek¹, Michal Bačuvčík¹, Michal Cápaj¹, Ivan Janotka^{1,*}

¹ Building Testing and Research Institute, Studená 3, 821 04, Bratislava, Slovakia

*Corresponding author: I. Janotka, e-mail: janotka@tsus.sk

Streszczenie

W 2021 roku cementownie na Słowacji rozpoczęły produkcję cementu portlandzkiego wieloskładnikowego typu CEM II/C-M zgodnie z normą STN EN 197-5. Głównym celem jest zmniejszenie śladu węglowego przez produkcję cementu o mniejszej zawartości klinkieru. Zastosowanie tego cementu jest obecnie ograniczone, ponieważ normy dotyczące wyrobów budowlanych dopuszczają stosowanie wyłącznie rodzajów cementu zgodnych z normą STN EN 197-1. Dla rodzajów cementów spełniających wymagania STN EN 197-5 nie jest wskazana ogólna przydatność ich stosowania w betonie zgodnie z STN EN 206+A2. Możliwość stosowania poszczególnych rodzajów cementu wyłącznie zgodnie z normą STN EN 197-1 dla klas ekspozycji XC, XF, XD i XA jest określona w Załączniku krajowym STN EN 206+A2/NA. Należy zatem wykazać przydatność zastosowania nowego betonu cementowego. Celem przeprowadzonych badań było wyjaśnienie możliwości wykorzystania CEM II/C-M (S-LL) w praktyce. W artykule przedstawiono wyniki projektu badawczego, którego celem było sprawdzenie przydatności CEM II/C-M (S-LL) do stosowania w betonie zgodnie z wymaganiami normy STN EN 206+A2.

Słowa kluczowe: cement, nieklinkierowe składniki cementu, cementy mieszane, środowisko, beton zwykły

Summary

In 2021, cement plants in Slovakia started production of Portland composite cement of CEM II/C-M type according to STN EN 197-5. The main objective is to reduce the carbon footprint in the production of types of cement characterized by lower clinker content. The application of this cement is currently limited because the construction product standards only accept the use of types of cement according to STN EN 197-1. For types of cement meeting the STN EN 197-5 requirements, the general suitability of their use in concrete according to STN EN 206+A2 is not indicated. The applicability of individual types of cement only according to STN EN 197-1 for exposure classes XC, XF, XD, and XA is specified in the National Annex (STN EN 206+A2/NA). The suitability of the use of new cement concrete must therefore be demonstrated. The aim of the research carried out was to clarify the potential of using CEM II/C-M (S-LL) in practice. This article presents the results of a research project aimed at verifying the suitability of CEM II/CM (S-LL) for use in concrete following the requirements of STN EN 206+A2.

Keywords: cement, supplementary cementitious materials, blended cements, environment, plain concrete

1. Wprowadzenie

Norma europejska STN EN 206+A2 (1) definiuje wymagania dotyczące elementów betonowych i cementu w następujący sposób: należy stosować wyłącznie te składniki betonu, np. cement, o udowodnionej przydatności do zamierzonego zastosowania betonu, zgodne z niniejszą normą. Nie mogą zawierać substancji szkodliwych w ilościach pogarszających trwałość betonu lub powodujących korozję zbrojenia. Jeżeli nie istnieje norma europejska

1. Introduction

European standard STN EN 206+A2 (1) defines the requirements for concrete components and cement as follows: only those concrete constituents, e.g. cement, with proven suitability for the intended use of the concrete complying with this standard shall be used. They shall not contain harmful substances in such quantities as to decrease the durability of concrete or to cause corrosion of the reinforcement. If there is no European standard for the specific

dotycząca konkretnego składnika stosowanego do produkcji betonu zgodnie z STN EN 206+A2 lub istnieje norma europejska, ale nie obejmuje ona w pełni tego konkretnego składnika lub składnik betonu znacznie różni się od normy europejskiej, wówczas przydatność można wykazać poprzez:

- Europejską Ocenę Techniczną [ETA], która wyraźnie stwierdza zastosowanie tego składnika, np. nowego rodzaju cementu, do betonu zgodnego z niniejszą normą (1).
- Przepisy obowiązujące w miejscu stosowania betonu, które określają zastosowanie tego składnika do betonu spełniającego wymagania niniejszej normy (1).

ETA dotycząca składników wykazuje ich ogólną przydatność do stosowania w betonach zgodnie z wymaganiami normy EN 206+A2, która nie jest zharmonizowaną normą europejską. Dlatego też zastosowanie przepisów krajowych dotyczących betonu jest przedstawione w przepisach mających zastosowanie w miejscu stosowania, np. w załączniku krajowym.

Ogólną przydatność wykazano dla cementu spełniającego normę STN EN 197-1 (2). Dla typów cementu zgodnych z STN EN 197-5 (3) nie jest wskazana ogólna przydatność do betonu zgodnie z STN EN 206+A2. STN EN 206/NA [Załącznik krajowy] (4) określa w tabeli F.3 możliwość stosowania poszczególnych rodzajów cementu wyłącznie według STN EN 197-1 dla klas ekspozycji [XC, XD, XF i XA]. Obecnie norma ta nie omawia nowych typów cementu EN 197-5. Żadna norma (1,4) nie określa procedur weryfikacji przydatności typów cementu STN EN 197-5 w betonach lub ich przydatności dla różnych klas ekspozycji. Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/C-M według STN EN 197-5 różni się od cementów portlandzkich wieloskładnikowych według STN EN 197-1 procentowym udziałem głównych składników (3,5). Różnice przedstawiono w tabeli 1.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pierwszej części badań istotnych technicznych właściwości betonu wykonanego z cementu doświadczalnego CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N w porównaniu

constituent to be used for the production of concrete according to STN EN 206+A2, or a European standard exists but does not fully cover this specific constituent, or the concrete constituent differs significantly from the European standard, then the suitability can be demonstrated by:

- European Technical Assessment [ETA] that explicitly states the use of this component, e. g. new type of cement, for concrete complying with this standard (1).
- Regulations in force where the concrete is to be applied, which specify the use of this constituent for concrete complying with this standard (1).

The ETA on the constituents demonstrates their general suitability for use in concrete complying with the EN 206+A2 requirements, which is not a harmonized European standard. Therefore, the applicability of the national regulations for concrete is represented in the provisions applicable at the place of use [e.g., as a National Annex].

General suitability is demonstrated for cement complying with STN EN 197-1 [2]. For types of cement complying with STN EN 197-5 [3], general suitability for concrete according to STN EN 206+A2 is not indicated. STN EN 206/NA [National Annex] [4] specifies in Table F.3 the applicability of individual types of cement only according to STN EN 197-1 for exposure classes (XC, XD, XF, and XA). Currently, this standard does not discuss new EN 197-5 cement types. No standard [1, 4] defines procedures for verifying the applicability of STN EN 197-5 types of cement in concretes or their suitability for different exposure classes. Portland composite cement CEM II/C-M according to STN EN 197-5 differs from Portland blended types of cement according to STN EN 197-1 by the percentage share of the main components [3, 5]. The differences are presented in Table 1.

The present work reveals the results of the first part of the research on the technical significant properties of concrete made from the experimental cement CEM II/C-M (S-LL) 42.5 N compared with

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD WYBRANYCH CEMENTÓW ZGODNY Z NORMAMI EN

COMPOSITION OF SELECTED CEMENTS ACCORDING TO EN STANDARDS

Typ cementu / Cement type	Norma / Standard	Składniki główne / Main constituents ¹ , % masy / % mass										
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	STN EN 197-1	95 – 100	-									
CEM II/B-M	STN EN 197-1	65 – 79	21 – 35									
CEM II/C-M ^{2,3}	STN EN 197-5	50 – 64	36 – 50									

¹ K – klinkier / clinker; S – mielony granulowany żużel wielkopiecowy / ground blast furnace slag; D – pył krzemionkowy / silica fume; P – pucolana naturalna / natural pozzolan; Q – pucolana sztuczna / artificial pozzolan; V – popiół lotny krzemionkowy / siliceous fly ash; W – popiół lotny wapienny / calcareous fly ash; T – kalcynowany łupek / calcined shale; L – wapień / limestone [zawartość węgla ograniczonego do 0,5 % / TOC up to 0.5 %]; LL – wapień / limestone [zawartość węgla ograniczonego do 0,2 % / TOC up to 0.2 %]

² Liczba głównych składników innych niż klinkier jest ograniczona do dwóch / The number of major components other than clinker is limited to two.

³ W przypadku stosowania wapienia udział wapienia [L lub LL] jest ograniczony do 6–20% masowych. / When limestone is used, the proportion of limestone [L or LL] is limited to 6–20 % by mass.

z cementem mieszanym CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N oraz CEM I 42,5 R jako odniesienie, zgodnie z STN EN 197-1. W ten sposób wyniki badań umożliwią stosowanie cementu CEM II/C-M (S-LL) w betonie w taki sam sposób, jak cementów mieszanych STN EN 197-1, których stosowanie w betonie jest dozwolone przez STN EN 206 +A2.

2. Materiały i metody

2.1. Metody

Metodologia badań opierała się na porównaniu istotnych technicznie właściwości betonu z cementem doświadczalnym [EXP] CEM II/C-M (S-LL) i obydwojema typami cementu referencyjnego [REF]. Referencyjny cement mieszany portlandzki CEM II/B-M (S-LL) był najbliższy cementowi EXP pod względem zawartości klinkieru i rodzaju głównych składników. Drugim cementem REF był cement portlandzki CEM I, który posłużył do wykazania właściwości betonu z dodatkiem cementu bez innych składników głównych. Żużel wielkopiecowy jako główny składnik cementu posiada utajone właściwości hydrauliczne. Zawartość wapienia w cemencie została ograniczona zgodnie z normą STN EN 206/NA do maksymalnie 20% masowych. Wszystkie cementy miały tą samą klasę wytrzymałości 42,5. Rodzaje cementu wytwarzano w cementowni, podczas której wszystkie główne składniki [klinkier, żużel wielkopiecowy i wapień] były mielone razem. Pełny zakres badań właściwości rodzajów cementu przedstawiono w tabelicy 2.

Kolejnym etapem były badania mające na celu porównanie istotnych technicznie [użytkowych] właściwości betonu wykonanego z cementów EXP i obu REF. Cały zakres badań przedstawiono w tabelicy 3. Betony różnią się jedynie rodzajem cementu [tabela 1]. Ich skład charakteryzuje się tą samą zawartością cementu, takim samym stosunkiem wody do cementu, tym samym rodzajem kruszywa i stosunkiem wagowym kruszywa do cementu oraz dostosowaną dawką superplastyfikatora niezbędnego do uzyskania identycznych właściwości reologicznych mieszanki betonowej. Wszystkie badania, z wyjątkiem skurczu plastycznego, przeprowadzono zgodnie ze normowymi metodami STN EN i STN.

Mrozoodporność betonu określono metodą cykli automatycznych zgodnie z wymaganiami STN 73 1322. Na podstawie współczynnika mrozoodporności obliczonego ze współczynników wytrzymałości na zginanie betonów po 100 cyklach zamrażania-rozmrażania i tych samych betonów, ale traktowanych przez 28 dni w wodzie o temperaturze 20°C. Beton uznaje się za odporny na działanie zamrażania i rozmrażania, jeżeli współczynnik mrozoodporności jest nie mniejszy niż 0,85. Według STN 73 1326 powierzchnia betonu jest odporna na działanie wody i chemicznych soli odładzających, gdy przy danej liczbie cykli osiągnięty zostanie maksymalny stopień zniszczenia, co wynika z stopnia 2 klasy ekspozycji XF – lekko zakłócony.

Skurcz plastyczny występuje wtedy, gdy mieszanka betonowa jest jeszcze w stanie plastycznym i dającym się formować, lecz nie jest już w stanie płynąć. Badanie skurczu plastycznego skupiające się

the blended cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N as well as CEM I 42,5 R as reference, according to STN EN 197-1. In this way, the results of the research will enable CEM II/C-M (S-LL) application in concrete in the same way as those blended types of cement of STN EN 197-1, whose use in concrete is permitted by STN EN 206+A2.

2. Materials and methods

2.1. Methods applied

The research methodology was based on the comparison of technically significant properties of concrete with experimental cement [EXP] CEM II/C-M (S-LL) and both reference types of cement [REF]. The reference Portland blended cement CEM II/B-M (S-LL) was the closest in clinker content and types of main constituents to the EXP cement. The second REF cement was the CEM I Portland cement, which was used to demonstrate the properties of concrete with cement without other main constituents. The blast-furnace slag as the main constituent in cement is characterized by the latent hydraulic property. The limestone content of the cement was limited according to STN EN 206/NA to a maximum of 20 % by mass. All cements were characterized by the same strength class 42.5. The types of cement were produced in a cement plant, whereby all the main constituents [clinker, blast-furnace slag, and limestone] were ground together. The full range of tests on the properties of types of cement is presented in Table 2.

The next stage of the research included tests to compare the technically significant [utility] properties of concrete made from EXP and both REF cements. The whole scope of the tests is listed in Table 3. The concretes differ only in the cement types [Table 1]. Their composition is characterized by the same cement content, the same water-to-cement ratio, the same type of aggregates and mass ratio of aggregate to cement, and an adapted dosage of superplasticizer necessary to achieve identical rheological properties of fresh concrete mix. All tests, except plastic shrinkage, were carried out according to the STN EN and STN standard procedures.

The frost resistance of concrete by periodical automatic cycling following the STN 73 1322 requirements is determined by the frost resistance coefficient calculated from the flexural strength ratios of the concretes after 100 freezing-thawing cycles and the same concretes, but treated for 28 days in water at 20°C. Concrete is declared resistant to the effects of alternate freezing and thawing if the coefficient of frost resistance is not less than 0.85. According to STN 73 1326, the concrete surface is resistant to water and chemical defrosting salts when the maximum degree of failure is reached at a given number of cycles, which is based on the degree of the XF exposure class 2 - slightly disturbed.

Plastic shrinkage occurs at the time when the fresh concrete mixture is still in a plastic, i.e. ductile and formable state, but no longer able to flow. The plastic shrinkage test focusing on the assessment of shrinkage cracking during concrete setting was, in principle, carried out according to ASTM C 1579-06 with our modification of the mould shape. The fresh concrete was placed in the modified

Tablica 2 / Table 2

ZAKRES BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW

SCOPE OF TESTS ON THE PROPERTIES OF CEMENTS

Badana właściwość / Property tested	Norma / Standard reflected	
Wytrzymałość na zginanie i ściskanie – wstępna [2 dni] / Flexural and compressive strength – initial [2 days]	STN EN 196-1	[6]
Wytrzymałość na zginanie i ściskanie – 28 dni [normowa] / Flexural and compressive strength – 28 days [standardized]	STN EN 196-1	
Czas początku wiązania / Initial setting time	STN EN 196-3	[7]
Stołość objętości / Soundness	STN EN 196-3	
Zawartość siarczanów [jako SO ₄]/ Sulfate content [as SO ₃]	STN EN 196-2	[8]
Zawartość chlorków / Chloride content	STN EN 196-2	
Zawartość składników głównych / Content of main constituents	TP CEN/TR 196-4 STN EN 196-2	[9]
Straty prażenia / Ignition loss	STN EN 196-2	
Gęstość / Density	STN 72 2113	[10]
Stopień zmielenia wg. Blaine'a / Fineness - Blaine method	STN EN 196-6	[11]
Zawartość alkaliów / Content of alkalis	STN EN 196-2	[8]

na ocenie pęknięcia skurczowego podczas wiązania betonu zostało w zasadzie przeprowadzone zgodnie z normą ASTM C 1579-06 z naszą modyfikacją kształtu formy. Mieszanekę betonową umieszczono w zmodyfikowanej formie, która kieruje i koncentruje naprężenia od zmian objętości do jej środka [rys. 1]. Kształt i wymiary formy odpowiadają ogólnym zasadom kształtu i wymiarów form, gdzie wybrany wymiar nominalny d jest co najmniej trzy i pół razy większy od maksymalnego nominalnego rozmiaru frakcji kruszywa użytego w betonie.

Mieszanekę betonową pozostawiono w formie na 24 ± 2 godziny w klimatyzowanym pomieszczeniu w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i przy przepływie powietrza nad powierzchnią betonu z prędkością 16 ± 2 km/h. Następnie rejestrowano parametry powstałego pęknięcia, oceniając cyfrowe obrazy powierzchni betonu odwzorowujące obszar nad „induktorem naprężeń” za pomocą kamery o wysokiej rozdzielczości i mikroskopu optycznego o wysokiej rozdzielczości VHX-950F [Keyence Japan, rys. 2].

W wyniku analizy określono powierzchnię całkowitą, długość, średnią i maksymalną szerokość powstałego pęknięcia. Na podstawie analizy pęknięć plastycznych oceniono podatność betonu na skurcz plastyczny.

2.2. Materiały, przygotowanie i pielęgnacja próbek

Do produkcji betonów stosowano trzy rodzaje cementów według tablicy 1 oraz kruszywo rzeczne o frakcjach 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm, wodę i superplastyfikator. W celu sprawdzenia wpływu cementów na istotne technicznie właściwości betonów zastosowano dwie receptury, zgodnie z tablicą 4.

Tablica 3 / Table 3

BADANIA ISTOTNYCH TECHNICZNIE WŁAŚCIWOŚCI BETONU

TESTS OF TECHNICALLY SIGNIFICANT PROPERTIES OF THE CONCRETE

Właściwość / Property	Norma / Standard reflected	
Konsystencja świeżej mieszanki betonowej metodą opadu stożka / Consistency of fresh concrete mix by slump test	STN EN 12350-2	[12]
Zawartość powietrza / Air content of fresh concrete	STN EN 12350-7	[13]
Gęstość mieszanki betonowej / Density of fresh concrete	STN EN 12350-6	[14]
Wydzielanie wody przez mieszanekę / Bleeding of fresh concrete	STN EN 480-4	[15]
Wytrzymałość betonu na ściskanie po 2, 7, 28 i 90 dniach / Compressive strength of the concrete after 2, 7, 28 and 90 days	STN EN 12390-3	[16]
Wytrzymałość betonu na zginanie po 2, 7, 28 i 90 dniach / Flexural strength of the concrete after 28 and 90 days	STN EN 12390-5	[17]
Wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 i 90 dniach / Tensile splitting strength of the concrete after 28 and 90 days	STN EN 12390-6	[18]
Nasiąkliwość betonu po 28 i 90 dniach / Absorptivity of the concrete after 28 and 90 days	STN 73 1316	[19]
Głębokość wnikania wody pod ciśnieniem po 28 i 90 dniach / Depth of water penetration under pressure after 28 and 90 days	STN EN 12390-8	[20]
Zmiany objętości betonu do 90 dni utwardzania [20°C i 70% R.H.] / Volume changes of the concrete up to 90-day curing [20 °C a 70 % R.H.]	STN 73 1320	[21]
Skurcz plastyczny / Plastic shrinkage	ASTM C 1579-06	[22]
Sieczny moduł sprężystości betonu po 28 i 90 dniach / Secant modulus of elasticity of the concrete after 28 and 90 days	STN EN 12390-13	[23]
Dynamiczny moduł sprężystości betonu po 28 i 90 dniach / Dynamic modulus of elasticity of the concrete after 28 and 90 days	STN 73 1371	[24]
Mrozoodporność betonu po 28 i 90 dniach - 50 cykli / Frost resistance of the concrete at 28 and 90 days - 50 cycles	STN 73 1322	[25]
Odporność powierzchni betonu cementowego na działanie wody i rozmrażającej soli chemicznej po 28 i 90 dniach - 50 cykli / Resistance of cement concrete surface to water and defrosting chemical salt at 28 and 90 days - 50 cycles	STN 73 1326	[26]

mould, which directs and concentrates the stresses from the volume changes to its centre [Fig. 1]. The shape and dimension of the mould respect the general principles for the shape and dimension of

Betony wykonane według każdej z receptur uważa się za identyczne pod względem stosunku wody do cementu $w/c = 0,45$, cementu i zawartości kruszywa. Do produkcji betonów do badań istotnych technicznie właściwości w stanie stwardniałym wykorzystano Recepturę A. Betony różniły się rodzajem użytego cementu oraz ilością superplastyfikatora.

Skuteczność superplastyfikatora różniła się nieznacznie w zależności od rodzaju cementu, dlatego dostosowano dawkę superplastyfikatora, aby uzyskać tę samą konsystencję betonu przy tym samym stosunku wody do cementu $w/c = 0,45$. Do wykonania badań wydzielenia wody i skurczu plastycznego wykorzystano recepturę B. Miała ona stosunek wody do cementu $w/c = 0,53$ i do jej przygotowania nie użyto superplastyfikatora, aby uzyskać wystarczająco duże wartości wydzielenia wody i skurczu plastycznego, aby porównać betony doświadczalne i referencyjne.

3. Wyniki

3.1. Właściwości cementów

Rodzaj cementu ma decydujący wpływ na właściwości betonu, ponieważ w niniejszym badaniu cement jest jedynym składnikiem, który zmienia skład mieszanki betonowej. Właściwości rodzajów cementu podsumowano w tabelicy 5. Wszystkie referencyjne typy cementów spełniały wymagania dotyczące składu i właściwości według STN EN 197-1, a badany cement według STN EN 197-5. Obydwa cementy mieszane różniły się właściwościami od cementu portlandzkiego CEM I CEM I, w szczególności:

- większe straty prażenia - ze względu na mniejszą zawartość klinkieru częściowo zastąpionego dodatkiem żużla wielkopiecowego i kamienia wapiennego;
- większa powierzchnia właściwa - dzięki większemu rozdrobieniu cementu;
- wydłużony czas początku wiązania i zmniejszona wytrzymałość - ze względu na niższą zawartość klinkieru.



Rys. 2. Pęknięcia powstałe w wyniku skurczu plastycznego betonu

Fig. 2. Evidence of cracking by plastic shrinkage of concrete



Rys. 1. Badanie skurczu plastycznego betonu

Fig. 1. Concrete plastic shrinkage test

moulds for body production, where the chosen nominal dimension d is at least three and half times larger than the maximum nominal size of the aggregate fraction used in the concrete.

The fresh concrete was left in the mould for 24 ± 2 hours in an air-conditioned room at 20 ± 2 °C and with airflow over the concrete surface at 16 ± 2 km/h. Subsequently, the parameters of the resulting crack were recorded by evaluating digital images of the concrete surface mapping the area above the “stress inducer” with a high-resolution camera and a high-resolution optical microscope VHX-950F [Keyence Japan, Fig. 2].

The analysis resulted in the total surface area, length, average and maximum width of the arisen crack. From the comparison of the plastic crack analyses, the susceptibility of the concrete to plastic shrinkage was assessed.

2.2. Materials, mixing and curing

Three types of cements according to Table 1 and river aggregate with fractions of 0/4 mm, 4/8 mm and 8/16 mm, water, and superplasticizer were used for the production of concretes. To verify the influence of cements on the technically significant properties of the concretes, two recipes were used according to Table 4.

The concretes within each recipe are considered to be identical in terms of the same water-to-cement ratio $w/c = 0.45$, cement, and aggregate content. Recipe A was used to produce the concretes for the tests of technically significant properties in the hardened state. The concretes differed in the type of cement used and the amount of superplasticizer.

The effectiveness of the superplasticizer varied slightly with the different cement types, so an adjustment of the superplasticizer dosage was performed to achieve the same consistency of concrete at the same water-to-cement ratio $w/c = 0.45$. Recipe B was used to perform the water separation and plastic shrinkage tests. The concrete recipe was characterized by a water-to-cement ratio $w/c = 0.53$ without the use of a superplasticizer to achieve sufficiently significant water sepa-

Tablica 4 / Table 4

SKŁADY BETONÓW

CONCRETE MIXTURE PROPORTIONS

Recepta Recipe	Oznaczenie betonu Marking of concrete	Typ cementu Type of cement	Składniki / Components, kg					
			Cement	Woda / Water	Superplastyfikator Super-plasticizer	Kruszywo / Aggregates		
						0/4 mm	4/8 mm	8/16 mm
A	EXP-C-M	CEM II/C-M (S-LL) 42.5 N	380	170	2.00	890	230	678
	REF-B-M	CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N	380	170	2.00	890	230	678
	REF-CEM I	CEM I 42.5 R	380	170	1.65	890	230	678
B	EXP-C-M	CEM II/C-M (S-LL) 42.5 N	360	189	-	890	-	890
	REF-B-M	CEM II/B-M (S-LL) 42.5 N	360	189	-	890	-	890
	REF-CEM I	CEM I 42.5 R	360	189	-	890	-	890

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI BADANYCH CEMENTÓW

PROPERTIES OF THE TESTED CEMENTS

Property	Unit	Type of cement		
		CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	CEM I 42,5 R
Zawartość SO ₃ / Content of SO ₃	[% mass]	2.54	2.92	2.68
Zawartość chlorków / Content of chlorides	[% mass]	0.066	0.070	0.061
Straty prażenia / Ignition loss	[% mass]	7.01	5.73	1.91
Zawartość alkaliów jako Na ₂ O _{eq.} / Content of alkalis as Na ₂ O equivalent	[% mass]	0.95	0.97	0.59
Nieklinkierowe składniki główne / Non-clinker main constituents	[% mass]	36.8	29.0	-
Zawartość klinkieru / Clinker content	[% mass]	60.2	71.0	97.8
Powierzchnia właściwa / Specific surface area [Blaine]	[m ² /kg]	516	501	376
Gęstość / Density	[kg/m ³]	2 940	2 960	3 080
Konsystencja normowa / Normal consistency	[% mass]	29.0	32.5	33.0
Początek czasu wiązania / Initial setting time	[min]	190	195	125
Stołość objętości / Soundness	[mm]	0	0	0
2-dniowa wytrzymałość na zginanie / 2-day flexural strength	[MPa]	4.0	4.3	6.1
2-dniowa wytrzymałość na ściskanie / 2-day compressive strength	[MPa]	18.7	19.7	28.6
28-dniowa wytrzymałość na zginanie / 28-day flexural strength	[MPa]	8.7	8.7	9.1
28-dniowa wytrzymałość na ściskanie / 28-day compressive strength	[MPa]	52.1	50.6	59.5

Stosunkowo wysoką wytrzymałość na ściskanie 28-dniową cementów wieloskładnikowych, pomimo mniejszej zawartości klinkieru, przypisano większej powierzchni właściwej, zwiększającej w ten sposób reaktywność cementu i reakcję żużla wielkopieczowego występującego jako jeden ze składników głównych. Obydwa cementy wieloskładnikowe mają większą powierzchnię właściwą, co umożliwia w tym samym czasie utwardzania wzrost wytrzymałości do poziomu zbliżonego do referencyjnego CEM I. Natomiast drobniejsze mielenie wskazuje na większą wodożądność cementu oraz zwiększoną podatność betonu na propagację pęknięć w stanie plastycznym i na skurcz po stwardnieniu.

3.2. Badania mieszanki betonowej

Właściwości mieszanki betonowej według receptury A [tablica 4] przedstawiono na rys. 3. W betonie zmieniono jedynie rodzaj

and plastic shrinkage results to compare the experimental and reference concretes.

3. Results

3.1. Properties of the cements

The type of cement has a decisive influence on the properties of concrete because cement is the only component that varies in the mixture composition of concrete. The properties of the types of cement are summarized in Table 5.

All reference types of cement met the requirements for composition and properties according to STN EN 197-1 and experimental cement according to STN EN 197-5. Both blended cements dif-

cementu i dawkę superplastyfikatora [tablica 4]. Pozostałe składniki pozostały takie same. Dozowanie superplastyfikatora służyło do uzyskania w przybliżeniu tej samej konsystencji mieszanki.

Właściwości mieszanek betonowych były w przybliżeniu takie same: konsystencja określona w badaniu opadu stożka wynosiła 90 ± 10 mm, zawartość powietrza od 2,5% do 3,1% obj. i gęstość od 2330 do 2350 kg/m³. Betony wydają się być porównywalne pod względem właściwości reologicznych mieszanki.

3.3. Badania betonu stwardniałego

Gęstość

Gęstość próbek betonu przedstawiono na rys. 4.

Gęstość betonu z dodatkiem CEM II/C-M po 28 dniach dojrzewania była taka sama jak betonu wykonanego z cementu CEM II/B-M (S-LL) i była niższa o 0,4% w porównaniu z betonem z cementu CEM I. Po 90 dniach dojrzewania była ona o 0,4% niższa w porównaniu do obu betonów referencyjnych.

Wytrzymałość na ściskanie

Zmiany wytrzymałości na ściskanie w czasie ilustruje rys. 5. Na kształtowanie się początkowej wytrzymałości betonów na ściskanie po 2 i 7 dniach miała wpływ mniejsza zawartość klinkieru w cementach typu CEM II. Betony w wieku 28 i 90 dni wykazywały zbliżone wytrzymałości. Efekt ten przypisano większemu rozdrobnieniu obu cementów typu CEM II, co znalazło również odzwierciedlenie w późniejszej reakcji żużla wielkopieczowego w CEM II/C-M (S-LL) oraz CEM II/B-M(S-LL).

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

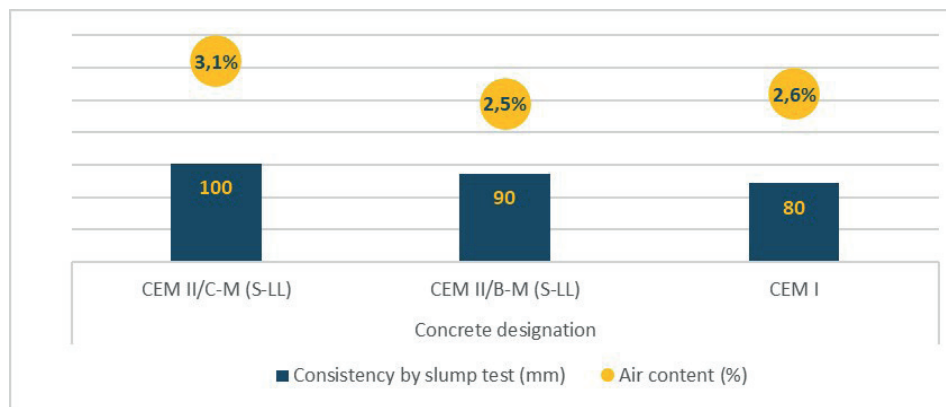
Wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu pokazano na rys. 6. Wszystkie betony są zbliżone pod względem wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 i 90 dniach.

Wytrzymałość na zginanie

Różnice pomiędzy wytrzymałościami na zginanie podsumowano na rys. 7. Wszystkie betony są do siebie bardzo zbliżone pod względem wytrzymałości na zginanie po 28 i 90 dniach.

Sieczny moduł sprężystości

Różnice pomiędzy siecznym modułem sprężystości przy ściskaniu pokazano na rys. 8. Sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu betonu o CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu do betonu z CEM II/B-M (S-LL) był o 3,3% wyższy po 28 dniach i 1,4% wyższy po 90 dniach oraz był o 3,9% wyższy po 28 dniach i 2,9% wyższy po 90 dniach od betonu z - CEM I. Wszystkie betony są identyczne pod względem 28- i 90-dniowych wartości modułu siecznego.



Rys. 3. Porównanie właściwości badanych mieszanek betonowych

Fig. 3. Comparison of the properties of fresh concrete

ferred in their properties from the CEM I Portland cement CEM I, in particular in:

- higher loss on ignition - due to the lower clinker content partly substituted by added blast furnace slag and limestone;
- higher specific surface area - due to the finer grinding of the cement;
- later beginning of setting and reduced strengths - due to lower clinker content.

The relatively high 28-day compressive strengths of the blended types of cement, despite the lower clinker content, were attributed to the higher specific surface area enhancing thus the reactivity of cement and the reaction of the blast furnace slag present as one main constituent. Both blended cements are characterized by a higher specific surface area, what enables thus strength to increase to the level close to the reference CEM I at the same time of curing. On the other hand, more intensive grinding indicates higher water content for achieving the cement paste standard and increased susceptibility to crack propagation of the concrete when in a plastic state and to shrinkage after hardening.

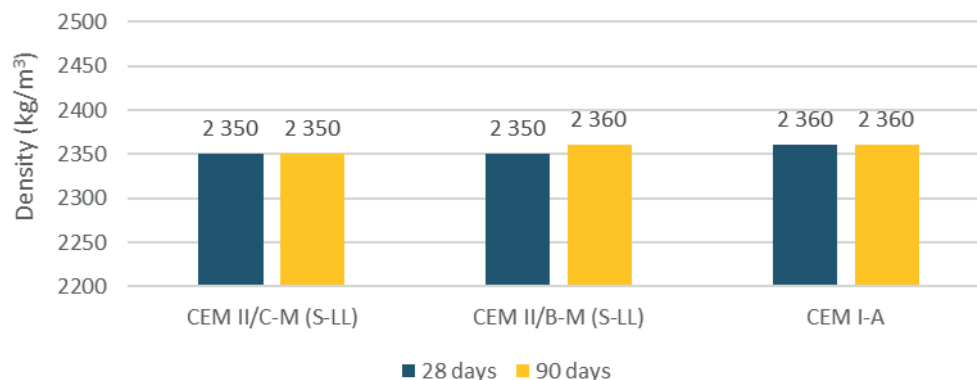
3.2. Tests of fresh concrete mixes

The properties of fresh concrete according to recipe A [Table 4] are reported in Fig. 3. In concrete, only the types of cement and the dosage of superplasticizer were changed (Table 4); the other constituents remained the same. The superplasticizer dosage served to set the fresh concrete to approximately the same consistency.

The properties of the fresh concrete were approximately the same: consistency, as determined by slump test [90 ± 10] mm, air content from 2.5 % to 3.1 % vol., and density from 2 330 to 2 350 kg/m³. The concretes appear to be comparable in rheological properties.

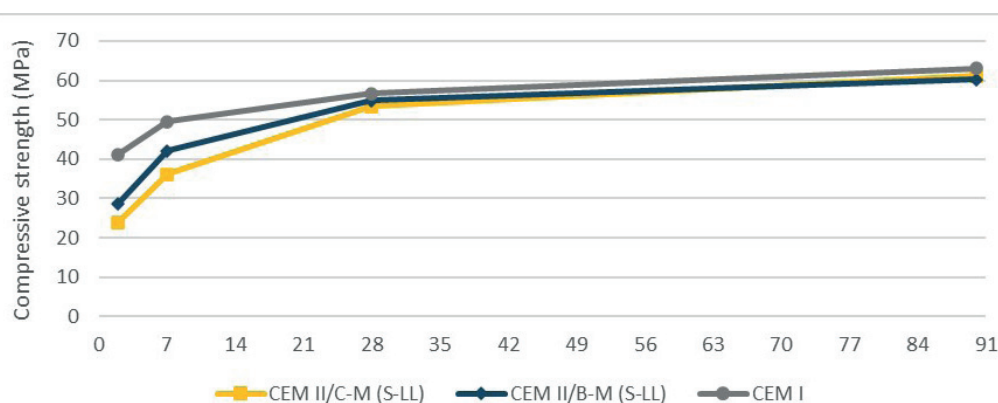
3.3. Tests of hardened concretes

The results of the tests of technically significant properties of hardened concrete according to concrete recipe A (Table 4) at the age of 28 days and 90 days, and at the age of 2, 7, 28 and 90 days for compressive strength, are reported in Figures 4 to 14 and Table



Rys. 4. Porównanie gęstości betonów

Fig. 4. Comparison of the concrete density



Rys. 5. Porównanie wytrzymałości na ściskanie

Fig. 5. Comparison of the compressive strengths

Dynamiczny moduł sztywności

Różnice pomiędzy dynamicznym modułem sprężystości przedstawiono na rysunku 9.

Dynamiczny moduł sprężystości betonu z cementu CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu do betonu z cementu CEM II/B-M (S-LL) był o 0,2% wyższy po 28 dniach i o 0,9% wyższy po 90 dniach, zaś z cementu CEM I był o 3,5% wyższy po 28 dniach i o 0,9% wyższy po 90 dniach. Wszystkie betony są identyczne pod względem wartości modułu dynamicznego 28 i 90 dni.

Nasiąkliwość

Różnice pomiędzy nasiąkliwością przedstawiono na rysunku 10. Nasiąkliwość betonu z cementu CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu z betonem z:

- CEM II/B-M (S-LL) była o 0,2% mniejsza po 28 dniach i 0,1 % większa po 90 dniach;
- CEM I była o 0,4% większa po 28 dniach i 0,9% większa po 90 dniach. Wszystkie betony są identyczne pod względem nasiąkliwości 28- i 90-dniowej.

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Różnice w głębokości wnikania wody pod ciśnieniem ilustruje rysunek 11.

6. The results show the average property values from the three determinations at different concrete ages.

Density

The density of concrete specimens is presented in Fig. 4.

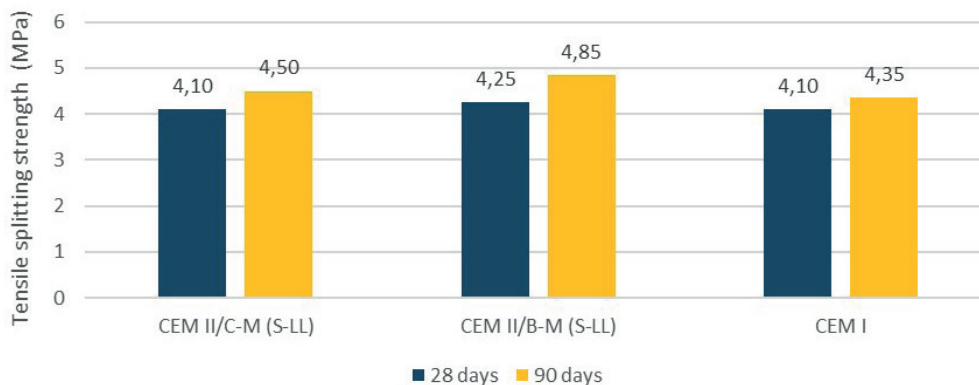
The density of concrete with CEM II/C-M after 28 days of curing was the same as concrete made of CEM II/B-M (S-LL) cement and lower by 0.4% in respect to CEM I concrete. After 90 days of curing, it was 0.4 % lower compared to both reference concretes.

Compressive strength

The changes in compressive strength over time are illustrated in Figure 5. The development of the initial compressive strengths of the concretes, after 2 and 7 days was affected by the lower clinker content of the CEM II-type cements. Concretes at 28- and 90-day ages exhibited already more equilibrated strength properties. The observed effect was attributed to the higher fineness of both CEM II-type cement, which was also reflected in the subsequent reaction of the blast furnace slag present either with CEM II/C-M (S-LL) or CEM II/B-M(S-LL).

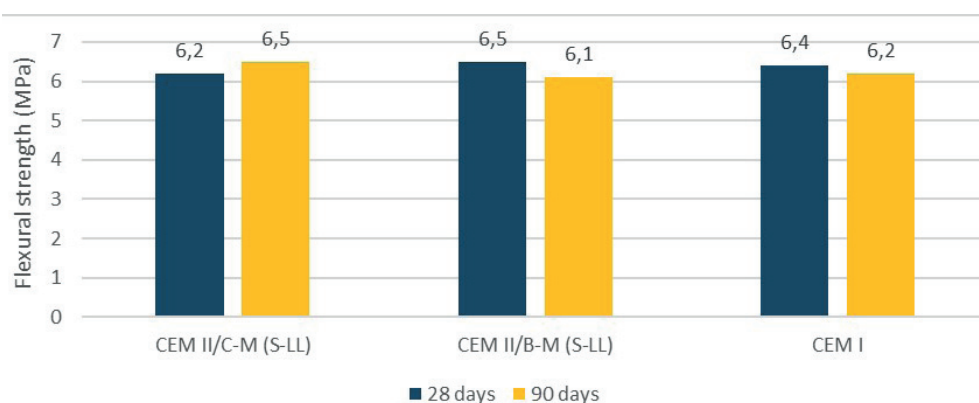
Splitting tensile strength

The values of the tensile splitting strength are given in Figure 6. All concretes are similar to each other in terms of 28- and 90-days splitting tensile strength.



Rys. 6. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Fig. 6. Comparison of the tensile splitting strengths



Rys. 7. Porównanie wytrzymałości na zginanie

Fig. 7. Comparison of the flexural strengths

Głębokość wnikania wody pod ciśnieniem dla betonu z cementu CEM II/C-M (S-LL), w odniesieniu do kryterium (1) w porównaniu do betonu z:

- CEM II/B-M (S-LL) była o 2 mm większa po 28 dniach i o 1 mm większa po 90 dniach;
- CEM I był taki sam po 28 dniach i 2 mm mniejszy po 90 dniach.

Wszystkie betony są identyczne pod względem 28- i 90-dniowych wartości głębokości wnikania wody.

Mrozoodporność

Współczynnik mrozoodporności wyraża się stopniem mrozoodporności betonu i oblicza się ze stosunku wytrzymałości na zginanie próbek 100 mm × 100 mm × 400 mm po cyklach zamrażania i rozmrażania do wytrzymałości próbek niepoddawanych działaniu mrozu. Różnice pomiędzy współczynnikami mrozoodporności po 100 okresowych cyklach mrozu -20°C i wody +20°C przedstawiono na rys. 12.

Współczynnik mrozoodporności CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu do betonu z:

- CEM II/B-M (S-LL) był taki sam po 28 dniach i mniejszy o 0,05 po 90 dniach;
- CEM I był o 0,06 mniejszy po 28 dniach i o 0,06 większy po 90 dniach.

Flexural strength

The differences between the flexural strengths are summarized in Fig. 7. All concretes are very close to each other in terms of 28- and 90-days flexural strengths.

Secant modulus of elasticity

The differences between the secant modulus of elasticity in compression are shown in Figure 8.

The secant modulus of elasticity in compression of concrete with CEM II/C-M (S-LL) compared to that of concrete with:

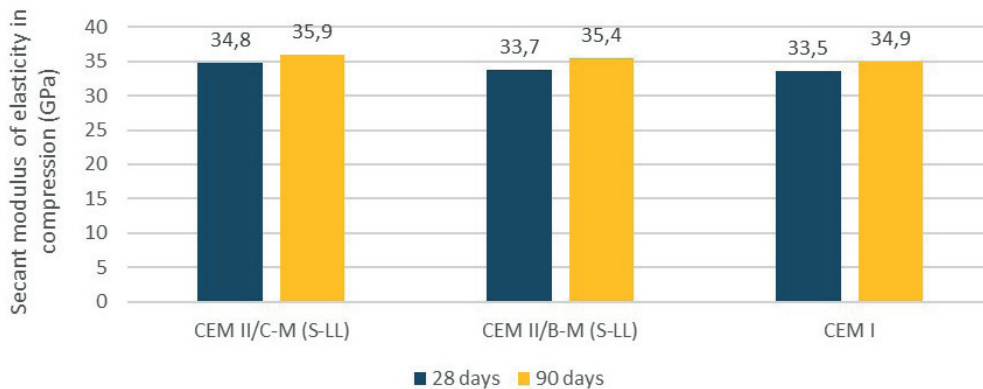
- CEM II/B-M (S-LL) was 3.3 % higher at 28 days and 1.4 % higher at 90 days;
- CEM I was 3.9 % higher at 28 days and 2.9 % higher at 90 days.

All concretes are identical to each other in terms of the 28- and 90-day values of secant modulus values.

Dynamic modulus of elasticity

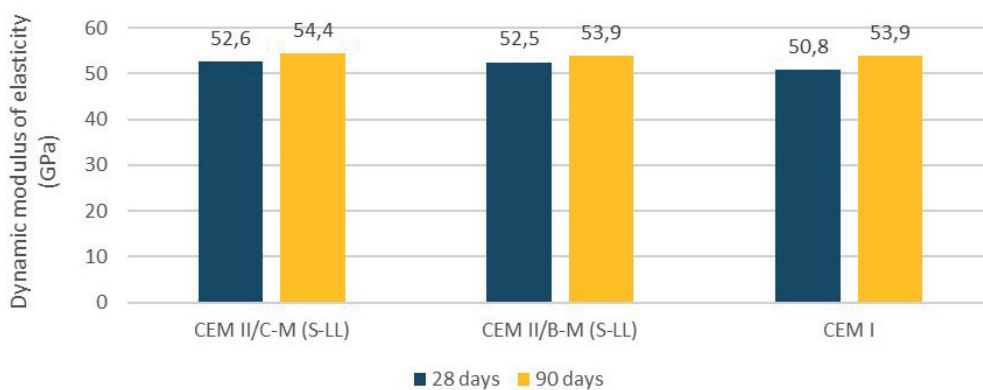
The differences between the dynamic modulus of elasticity are introduced in Figure 9.

The dynamic modulus of elasticity of concrete with CEM II/C-M (S-LL) cement compared to that of concrete with:



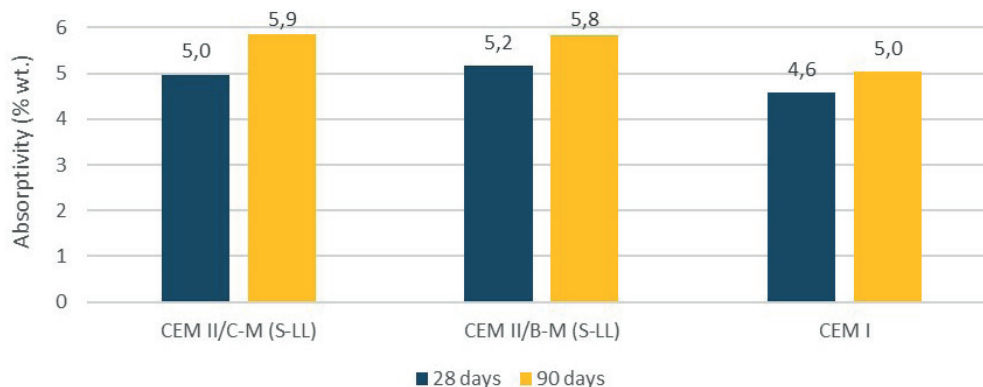
Rys. 8. Porównanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu

Fig. 8. Comparison of secant modulus of elasticity in compression



Rys. 9. Porównanie dynamicznego modułu sprężystości

Fig. 9. Comparison of dynamic modulus of elasticity



Rys. 10. Porównanie nasiąkliwości

Fig. 10. Comparison of absorptivity

Wszystkie betony identyczne pod względem współczynników mrozoodporności 28- i 90-dniowej.

Odporność na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odłóżających

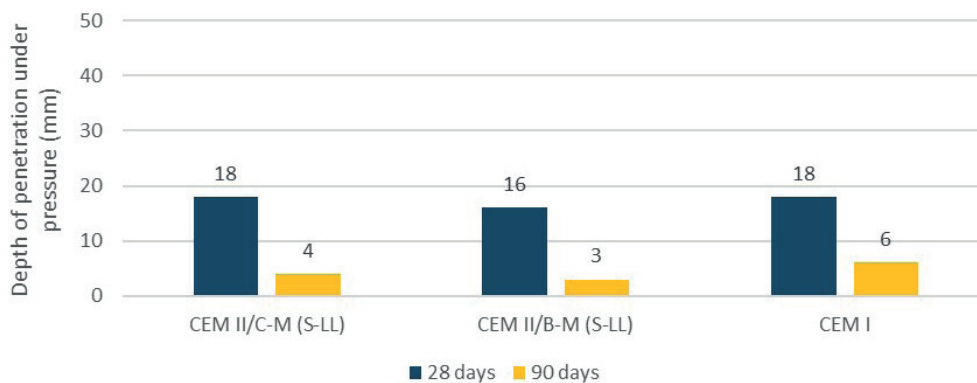
Odporność betonu na działanie wody i soli rozmrażających określana jest na podstawie masy betonu złuszczonego z powierzchni betonu po badaniu. Im niższe wartości wskaźnika, tym większa odporność betonu. Ocenę odporności na 3% NaCl po 25 lub 50 cyklach przedstawiono na rys. 13.

- CEM II/B-M (S-LL) was 0.2 % higher at 28 days and 0.9 % higher at 90 days;
- CEM I was 3.5 % higher at 28 days and 0.9 % higher at 90 days.

All concretes are identical to each other in terms of 28- and 90-day dynamic modulus values.

Absorptivity

The differences between the absorptivity are given in Figure 10. The absorptivity [water absorption] of concrete with CEM II/C-M (S-LL) cement compared with that of concrete with:



Rys. 11. Porównanie głębokości wnikania wody pod ciśnieniem

Fig. 11. Comparison of the depth of water penetration under pressure

Ilość odpadów po badaniu betonu CEM II/C-M (S-LL), w odniesieniu do kryterium normowego (1) w porównaniu do betonu z:

- CEM II/B-M (S-LL) była po 28 dniach dojrzewania mniejsza o 45 g/m² po 25 cyklach i o 131 g/m² mniejsza po 50 cyklach;
- CEM II/B-M (S-LL) była po 90 dniach dojrzewania mniejsza o 72 g/m² po 25 cyklach i o 177 g/m² mniejsza po 50 cyklach;
- CEM I w wieku 28 dni był o 304 g/m² większy po 25 cyklach i 938 g/m² większy po 50 cyklach;
- CEM I w wieku 90 dni był o 8 g/m² większy po 25 cyklach i o 122 g/m² niższy po 50 cyklach.

Beton z cementu CEM II/C-M (S-LL) miał większą odporność na mróz w obecności soli odladzających w porównaniu do betonu z CEM II/B-M (S-LL) zarówno w 28, jak i 90 dni hydratacji oraz większą odporność w porównaniu z betonem z CEM I w wieku 90 dni. Obydwa betony z dodatkami cementów CEM II wykazywały w wieku 28 dni istotnie niższe wytrzymałości w porównaniu do betonu z dodatkami CEM I. Późniejsza reakcja żużla wielkopiecowego z cementem w istotny sposób przyczyniła się do wzrostu odporności na działanie soli betonów wykonanych z cementów CEM II w wieku 90 dni. Ustalenie to oraz wcześniejsze wyniki wskazują na konieczność rozważenia konieczności oceny istotnych technicznie właściwości betonu wykonanego z cementów wieloskładnikowych nie tylko w wieku 28 dni, ale także po 90 dniach układania.

- CEM II/B-M (S-LL) was 0.2 wt. % lower at 28 days and 0.1 % wt. higher at 90 days;
- CEM I was 0.4 % wt. higher at 28 days and 0.9 % wt. higher at the 90-day time limit.

All concretes are identical to each other in terms of the 28- and 90-day absorptivity values.

Depth of water penetration under pressure

The differences between the depths of water penetration under pressure are illustrated in Figure 11.

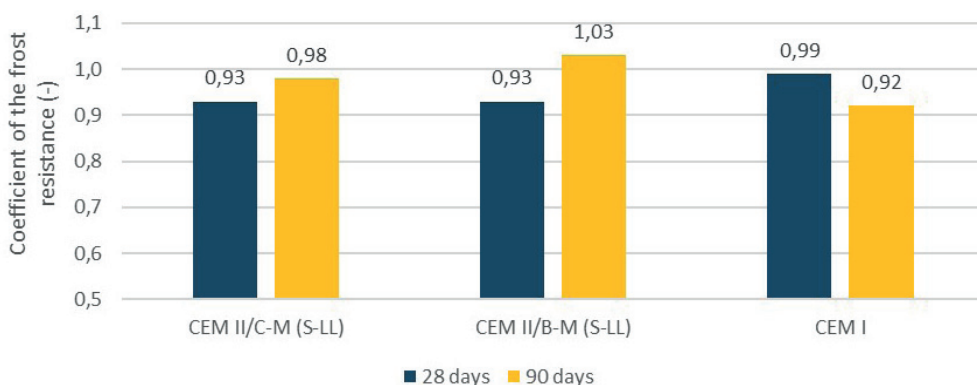
The depth of water penetration under the pressure of concrete made of CEM II/C-M (S-LL), related to criterion (1) compared to that of concrete with:

- CEM II/B-M (S-LL) was 2 mm higher at 28 days and 1 mm higher at 90 days;
- CEM I was the same at 28 days and 2 mm lower at the 90 days.

All concretes are identical to each other in terms of the 28- and 90-day values of the water penetration depth.

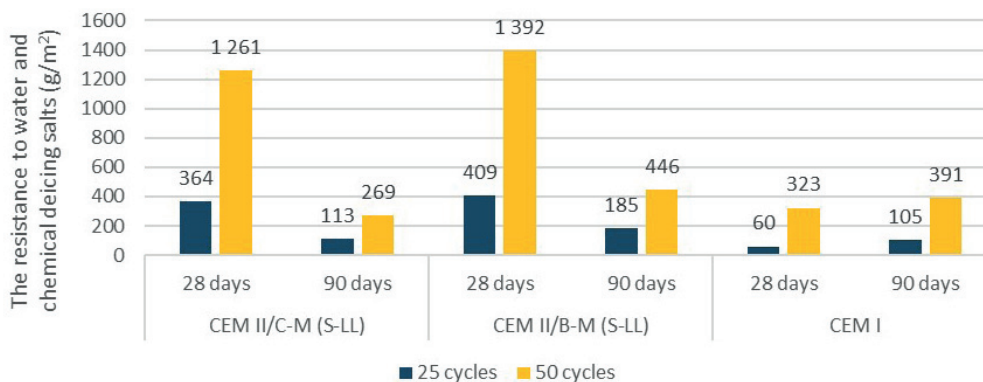
Frost resistance

The coefficient of frost resistance is expressed by the degree of frost resistance of concrete and is calculated from the ratio of



Rys. 12. Porównanie współczynników mrozooporności

Fig. 12. Comparison of frost resistance coefficients



Rys. 13. Porównanie mrozoodporności w obecności soli odladzających

Fig. 13. Comparison of the resistance to freeze and thaw in the presence of de-icing salts

Skurcz plastyczny

Celem pracy było porównanie parametrów pęknięć wywołanych w betonach przy tym samym sposobie umieszczania w specjalnej formie w ciągu pierwszych 24 godzin po wymieszaniu. Inicjacja pęknięć została celowo spowodowana efektem skurczu plastycznego świeżego betonu, działaniem wiatru i induktora naprężeń. Wyniki badania pęknięć wywołanych skurczem plastycznym betonu o recepturze B przedstawiono w tabelicy 6. Ocena skupia się głównie na porównaniu średniej szerokości pęknięcia, która wahała się od 0,29 mm do 1,20 mm. Największe pęknięcie wystąpiło w betonie z CEM II/C-M (S-LL), najmniejsze zaś w betonie z CEM I.

Wyniki badania skurczu plastycznego wskazują na większe ryzyko pęknięcia skurczowego w betonie z cementem CEM II w porównaniu z cementem referencyjnym CEM I. Możliwe przyczyny powstawania pęknięć o większej szerokości w betonie z cementu CEM II w porównaniu z betonem z CEM I to:

- większa powierzchnia właściwa;
- mniejsza zawartość klinkieru;
- zmniejszona zdolność do samoleczenia.

Należy zaznaczyć, że wyników badania skurczu plastycznego nie można traktować jako bezwzględnych. Badanie służy do porównania zachowania betonu w ekstremalnych warunkach laborato-

Tablica 6 / Table 6

CHARAKTERYSTYKA PĘKNIĘĆ POWSTAŁYCH W WYNIKU SKURCZU PLASTYCZNEGO BETONU

CHARACTERISTIC OF AN INTENTIONALLY INDUCED CRACK FROM PLASTIC SHRINKAGE OF CONCRETE

Oznaczenie betonu Concrete designation	Właściwości spękań / Crack characteristic			
	Maksymalna szerokość Maximum width, mm	Całkowia powierzchnia Total surface area, mm ²	Długość Length, mm	Średnia szerokość Average width, mm
EXP-C-M	2.00	424.76	353.67	1.20
REF-B-M	1.88	336.51	334.44	1.01
REF-CEM I	0.60	77.59	263.66	0.29

the flexural strength of the test bodies 100 × 100 × 400 mm after freezing and thawing cycles to the strength of the bodies that have not been frozen. The differences between the coefficient of frost resistance after 100 periodical cycles of -20 °C frost and +20 °C water are demonstrated in Fig. 12.

The coefficient of frost resistance with CEM II/C-M (S-LL) compared to that of concrete with:

- CEM II/B-M (S-LL) was the same at 28 days and 0.05 lower at 90 days;
- CEM I was 0.06 lower at 28 days and 0.06 higher at 90 days.

All concretes are identical to each other in terms of the 28- and 90-day frost resistance coefficients.

Resistance to freeze and thaw in the presence of de-icing salts

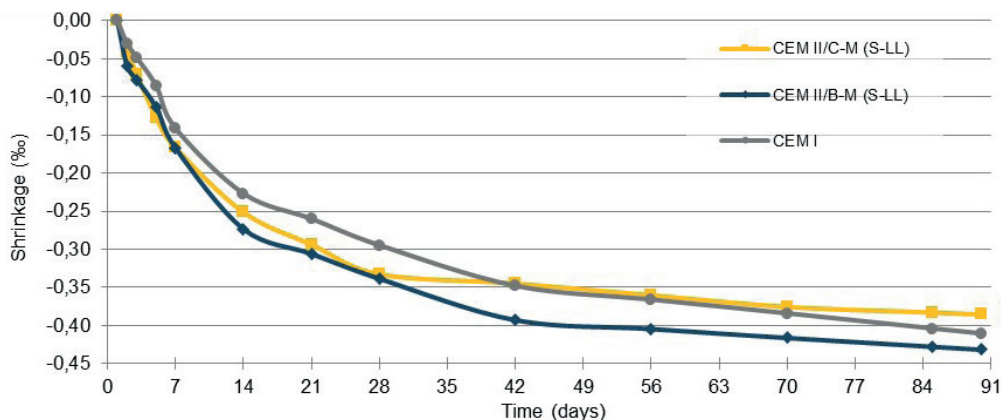
The concrete's resistance to water and chemical defrosting salts is determined by the amount of waste spalling off the concrete surface after the test. The lower the waste rate values, the higher the resistance of the concrete. The evaluation of the resistance to 3 % NaCl after the 25 or 50 cycles is shown in Fig. 13.

The amount of waste after testing of concrete with CEM II/C-M (S-LL), related to criterion [1] compared to that of concrete with:

- CEM II/B-M (S-LL) was at 28 days of age 45 g/m² lower after 25 cycles and 131 g/m² lower after 50 cycles;
- CEM II/B-M (S-LL) was at 90 days of age 72 g/m² lower after 25 cycles and 177 g/m² lower after 50 cycles;
- CEM I was at 28 days of age 304 g/m² greater after 25 cycles and 938 g/m² greater after 50 cycles;
- CEM I was at 90 days of age 8 g/m² greater after 25 cycles and 122 g/m² lower after 50 cycles.

Concrete with CEM II/C-M (S-LL) achieved higher resistance to water and defrosting salt compared to concrete with CEM II/B-M (S-LL) at both 28 and 90 days of age, and higher resistance compared to concrete with CEM I at 90 days of age.

Both concretes with CEM II cements showed significantly lower resistances compared to concrete with CEM I at 28 days of age.



Rys. 14. Graficzna ilustracja skurczu betonu w czasie

Fig. 14. Graphical assessment of concrete shrinkage over time

ryjnych. Wyniki wskazują jednak na podatność świeżo ułożonego betonu na pękanie plastyczne, szczególnie jeśli beton nie jest odpowiednio traktowany w podczas dojrzewania w warunkach atmosferycznych.

Skurcz stwardniałego betonu

Skurcz betonu przechowywanego w temperaturze 20°C/70% R.H. przedstawiono na rysunku 14. Skurcz betonu z CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu do betonu z CEM II/B-M (S-LL) był o 1,8% mniejszy po 28 dniach i o 10,9% mniejszy po 90 dniach, a przy CEM I o 12,5% większa po 28 dniach, natomiast o 6,3% mniejsza po 90 dniach. Wszystkie betony wykazują w przybliżeniu taki sam skurcz po 90 dniach ekspozycji. Należy podkreślić, że CEM II/C-M (S-LL) nie powoduje większego skurczu niż stosowane już CEM II/B-M (S-LL) B-M i CEM I.

4. Ocena różnic we właściwościach technicznych betonów

W tablicach 7 i 8 podsumowano zmierzone różnice we istotnych technicznie właściwościach betonów z cementem badanym CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu z betonami wykonanymi z referencyjnymi cementami CEM II/B-M (S-LL) i CEM I. Tablice przedstawiają wybrane kryteria maksymalnej różnicy D do oceny zaobserwowanych różnic we właściwościach betonów.

Do oceny tego eksperymentu, wprowadzono kryteria maksymalnej różnicy wartości przedstawionych w tablicy 7 z wartościami podanych w Eurokodzie 2 [tablica 3.1 normy EN 1992-1-1 (27)], która wymienia wytrzymałość i charakterystykę obróbki wstępnej betonu w zależności od wytrzymałości klasy betonu. Dla każdej cechy z Eurokodu 2 obliczono jej średnią różnicę w %, gdy beton został już przeklasyfikowany do niższej klasy wytrzymałości. Obliczenia przeprowadzono dla zakresu klas wytrzymałości C20/25 – C60/75.

Kryterium gęstości opiera się na tolerancji $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ dla betonu zwykłego zgodnie z STN EN 206+A2. Kryteria w tablicy 8 wywodzą się z przyjętych wartości kryteriów dla poszczególnych właściwości w STN EN 206/NA. Za znaczącą uważa się różnicę wynoszącą 15% w stosunku do poszczególnych kryteriów właściwości.

The subsequent reaction of the blast furnace slag with cement contributed significantly to the increase in the resistance to aggressive salt of the concretes made with CEM II cements at 90 days of age. This finding and previous results indicate to consider the need to evaluate technically significant properties of concrete made with highly-blended cements not only at the age of 28 days but also after 90 days of placement.

Plastic shrinkage

The purpose was to compare the parameters of the induced cracks in the concretes under the same mode of placement in a special mould during the first 24 hours after mixing. Crack initiation was intentionally caused by the effect of plastic shrinkage of fresh concretes, by the action of wind and stress inducer.

The results of crack characteristics evoked by the plastic shrinkage of concrete with recipe B are presented in Table 6. The evaluation is mainly focused on the comparison of the observed average crack's width, which ranged from 0.29 mm to 1.20 mm. The largest crack appeared in the concrete with CEM II/C-M (S-LL), while the smallest with CEM I.

The results of the plastic shrinkage test indicate a higher risk of shrinkage cracking in concrete with CEM II cement compared to the reference CEM I. Possible causes of the formation of cracks with a larger width of CEM II-type cement concrete compared to CEM I concrete are:

- higher specific surface area;
- lower clinker content;
- reduced capacity for self-healing.

It should be noted that the plastic shrinkage test results cannot be taken as absolutes. The test is used to compare the behaviour of concrete under extreme laboratory conditions. However, the results indicate the susceptibility of freshly placed concrete to plastic cracking, especially if the concrete is not adequately treated under outer weather conditions.

Na podstawie porównania zmierzonych różnic w stosunku do kryteriów różnice we właściwościach betonu oceniono jako znaczne i nieistotne. Różnice nieistotne definiują betony jako identyczne, a różnice istotne wskazują na znaczący wpływ cementu na właściwości betonu.

Stwierdzono istotne różnice we właściwościach betonów z CEM II/C-M (S-LL) w porównaniu do betonów z cementami referencyjnymi:

- w porównaniu do CEM II/B-M (S-LL):
 - ◇ zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach hydratacji;
- w porównaniu do CEM I:
 - ◇ zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach hydratacji;
 - ◇ zmniejszenie 7-dniowej wytrzymałości na ściskanie;

Shrinkage of hardened concrete

Shrinkage of the concrete maintained at 20°C/ 70 % R. H.-air cure is introduced in Figure 14. The shrinkage of concrete with CEM II/C-M (S-LL) compared to that of concrete with CEM II/B-M (S-LL) was 1.8 % lower after 28 days and 10.9 % lower after 90 days; and with CEM I 12.5 % greater after 28 days, while 6.3 % lower at 90-days. All concretes show approximately the same shrinkage after 90 days of exposure. It should be stressed that CEM II/ C-M (S-LL) does not cause a higher shrinkage than the already used CEM II/B-M (S-LL) B-M and CEM I.

4. Evaluation of differences in technically significant properties of concretes

Tables 7 and 8 summarize the observed differences in the technically significant properties of concretes with the experimental CEM

Tablica 7 / Table 7

OCENA ZMIAN ISTOTNYCH TECHNICZNIE WŁAŚCIWOŚCI BETONU WEDŁUG EUROKODU 2

EVALUATION OF CHANGES IN TECHNICALLY SIGNIFICANT PROPERTIES OF CONCRETE ACCORDING TO EUROCODE 2

Właściwość / Property	Wiek betonu, dni / Age of concrete, days	Ocena różnic we właściwościach [Di] betonów ¹⁾ Evaluation of differences in properties [Di] of concretes ¹⁾				
		Kryterium maksymalnej różnicy / Criterion of maximal difference	Porównanie z CEM II/B-M [S-LL] / Opposite to REF with CEM II/B-M [S-LL]		Porównanie z CEM I / Opposite to REF with CEM I	
			Di	Ocena / Evaluation	Di	Ocena / Evaluation
Gęstość / Density	28	±5 %	0.0 %	Nieistotny / Non-substantial	-0.4 %	Nieistotny / Non-substantial
	90	±5 %	-0.4 %	Nieistotny / Non-substantial	-0.4 %	Nieistotny / Non-substantial
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	2	-15 %	-16.7 %	Istotny / Substantial	-42.0 %	Istotny / Substantial
	7	-15 %	-14.0 %	Nieistotny / Non-substantial	-26.9 %	Istotny / Substantial
	28	-15 %	-2.7 %	Nieistotny / Non-substantial	-5.8 %	Nieistotny / Non-substantial
	90	-15 %	1.5 %	Nieistotny / Non-substantial	-2.9 %	Nieistotny / Non-substantial
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu / Tensile splitting strength	28	-10 %	-3.5 %	Nieistotny / Non-substantial	0.0 %	Nieistotny / Non-substantial
	90	-10 %	-7.2 %	Nieistotny / Non-substantial	3.4 %	Nieistotny / Non-substantial
Wytrzymałość na zginanie Flexural strength	28	-10 %	-4.6 %	Nieistotny / Non-substantial	-3.1 %	Nieistotny / Non-substantial
	90	-10 %	6.6 %	Nieistotny / Non-substantial	4.8 %	Nieistotny / Non-substantial
Sieczny moduł sprężystości przy ściskaniu / Secant modulus of elasticity in compression	28	-5 %	3.3 %	Nieistotny / Non-substantial	3.9 %	Nieistotny / Non-substantial
	90	-5 %	1.4 %	Nieistotny / Non-substantial	2.9 %	Nieistotny / Non-substantial
Dynamiczny moduł sztywności / Dynamic modulus of elasticity	28	-5 %	0.2 %	Nieistotny / Non-substantial	3.5 %	Nieistotny / Non-substantial
	90	-5 %	0.9 %	Nieistotny / Non-substantial	0.9 %	Nieistotny / Non-substantial
Skurcz betonu stwardniałego / Shrinkage of hardened concrete	28	+4 %	-1.8 %	Nieistotny / Non-substantial	12.5 %	Istotny / Substantial
	90	+4 %	-10.9 %	Nieistotny / Non-substantial	-6.3 %	Nieistotny / Non-substantial

¹⁾Uwaga: Pogorszenie właściwości powyżej kryterium wynikającego z (27) uważa się za różnicę istotną / Note: Deterioration of the property above the criterion derived from (27) is considered a substantial difference

- ◇ zmniejszenie odporności na wodę i sole rozmrażające w wieku 28 dni;
- ◇ zwiększenie szybkości skurczu po 28 dniach.

Wreszcie, należy wziąć pod uwagę wzrost ryzyka pęknięcia skurczowego plastycznego podczas wczesnej hydratacji przy zastosowaniu CEM II/C-M (S-LL) stosowanego w betonie.

5. Znaczenie praktyczne i potencjalne zastosowania pracy

Celem badań było sprawdzenie wpływu nowego typu cementu kompozytowego portlandzkiego CEM II/C-M (S LL) 42,5 N wg STN EN 197-5 na (1) istotne technicznie właściwości betonu oraz (2) odporność betonu na działanie środowiska agresywnego: karbonatyzacji [XC], penetracji chlorków [XD], oddziaływania chemicznego [XA] zgodnie z metodami badań przyspieszonych oraz zamrażanie i rozmrażanie [XF] (25, 26). Uzyskane dotychczas wyniki stanowią podstawę do rzetelnej oceny możliwości zastosowania CEM II/C-M (S-LL) w betonie zgodnie z normami STN EN 206+A2 i STN EN 206/NA. Podczas rozwiązywania tego projektu przeprowadzono badania sprawdzające odporność betonu na działanie klas ekspozycji XC, XD i XS w oparciu o wymagania przyszłych norm prEN 206-1:2023, prEN 206-100 i prEN 1992-1-1 [Eurokod 2] nie zostały przeprowadzone.

II/C-M (S-LL) compared to those made with the reference CEM II/B-M (S-LL) and CEM I. The tables show the selected maximum difference criteria *D* to evaluate the observed differences in the properties of the concretes.

For the evaluation of this experiment, the maximum difference criteria in Table 7 are derived from the values reported in Eurocode 2, Table 3.1 of EN 1992-1-1 [27], which lists the strength and pretreatment characteristics of concrete according to the strength classes of concrete. For each characteristic from Eurocode 2, its average difference in % when the concrete is already re-classified to a lower strength class was calculated. The calculation was carried out for the range of C20/25 - C60/75 strength classes.

The criterion for the density is based on a tolerance of $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ for plain concrete according to STN EN 206+A2. The criteria in Table 8 are derived from the adopted values of the criteria for individual properties in STN EN 206/NA. A difference of 15 % from the individual property criteria is considered to be significant.

From the comparison of the observed differences against the criteria, the differences in the properties of the concrete were evaluated as substantial and non-substantial. Non-substantial differences define the concretes as identical to each other and substantial differences already demonstrate a significant influence of cement on the concrete property.

Tablica 8 / Table 8

OCENA ZMIAN ISTOTNYCH TECHNICZNIE WŁAŚCIWOŚCI BETONU WEDŁUG STN EN 206+A2/NA

EVALUATION OF CHANGES IN TECHNICALLY SIGNIFICANT PROPERTIES OF CONCRETE ACCORDING TO STN EN 206+A2/NA

Właściwość / Property	Wiek betonu, dni Age of concrete, days	Ocena różnic we właściwościach [Di] betonów ¹⁾ Evaluation of differences in properties [Di] of concretes ¹⁾				
		Kryterium maksymalnej różnicy Criterion of maximal difference	Porównanie z CEM II/B-M [S-LL] Opposite to REF with CEM II/B-M [S-LL]		Porównanie z CEM I Opposite to REF with CEM I	
			Di	Ocena / Evaluation	Di	Di
Absorptivity, % by mass	28	0.9	-0.2	Nieistotny / Non-substantial	0.4	Nieistotny / Non-substantial
	90	0.9	0.1	Nieistotny / Non-substantial	0.9	Nieistotny / Non-substantial
Depth of penetration by water under pressure, mm	28	8	2	Nieistotny / Non-substantial	0	Nieistotny / Non-substantial
	90	8	1	Nieistotny / Non-substantial	-2	Nieistotny / Non-substantial
Coefficient of frost resistance	28	-0.13	0.00	Nieistotny / Non-substantial	-0.06	Nieistotny / Non-substantial
	90	-0.13	-0.05	Nieistotny / Non-substantial	0.06	Nieistotny / Non-substantial
Resistance to defrosting salts - 25 cycles, g/m ²	28	75	-45	Nieistotny / Non-substantial	304	Istotny / Substantial
Resistance to defrosting salts - 50 cycles, g/m ²	28	75	-131	Nieistotny / Non-substantial	938	Istotny / Substantial
Resistance to defrosting salts - 25 cycles, g/m ²	90	75	-72	Nieistotny / Non-substantial	8	Nieistotny / Non-substantial
Resistance to defrosting salts - 50 cycles, g/m ²	90	75	-177	Nieistotny / Non-substantial	-122	Nieistotny / Non-substantial

Uwaga: Za znaczącą różnicę uważa się pogorszenie właściwości o więcej niż 15% w stosunku do poszczególnych kryteriów zgodnie z (4)
Note: Significant difference is considered to be a property deterioration of more than 15 % from the individual criteria according to (4)

6. Wnioski

Ważne aktualne ustalenia związane z oceną zastosowania CEM II/C-M (S-LL) normy EN 197-5 w betonie przedstawiono są następujące.

1. Beton z cementu CEM II/C-M (S-LL) posiada, z wyjątkiem wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania, wszystkie istotne właściwości techniczne identyczne z betonem z cementu CEM II/B-M (S-LL) w świetle normy STN EN 197-1. Cement CEM II/B-M (S-LL) jest dopuszczony do stosowania w betonie zgodnie z normą STN EN 206+A2.
2. Beton z cementu CEM II/C-M (S-LL) ma większość istotnych technicznie właściwości identycznych z betonem oznaczonym CEM I w normie STN EN 197-1. Cement CEM I jest dopuszczony do stosowania w betonie zgodnie z normą STN EN 206+A2.
3. CEM II/C-M (S-LL) z EN 197-5 nadaje się do stosowania w betonie zgodnie z EN 206+A2 w taki sam sposób, jak porównawczy CEM II/B-M (S-LL) z EN 197-1 z punktu widzenia wpływu na istotne technicznie właściwości betonu.

Podziękowanie

Autorzy pragną podziękować Stowarzyszeniu Słowackich Producentów Cementu za wsparcie prac badawczych.

Literatura/ References

1. CEN, EN 206 + A2: 2021. Concrete. Specification, performance, production and conformity. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2021).
2. CEN, EN 197-1: 2011. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2011).
3. CEN, EN 197-5: 2021. Cement-Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and composite cement CEM VI. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2021).
4. UNMS [Slovak Office of Standards, Metrology and Testing], STN EN 206/NA + A2: 2023. Concrete. Specification, performance, production and conformity, National Annex. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2023).
5. A. Król, Z. Giergiczny and J. Kuterasińska-Warwas, Properties of concrete made with low-emission cements CEM II/C-M and CEM VI. Materials **13**(10), 2257 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13102257>.
6. CEN, EN 196-1: 2016. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2016).
7. CEN, EN 196-3: 2016. Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2016).
8. CEN, EN 196-2: 2013. Methods of testing cement. Part 2: Chemical analysis of cement. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2013).
9. CEN [The European Committee for Standardization], CEN/TR 196-4. Methods of testing cements-Part 4: Quantitative determination of constituents, The European Technical Report, pp. 1-34, (2008).

Significant differences in the properties of concretes with CEM II/C-M (S-LL) compared to concretes with reference cements, were found as follows:

- compared to CEM II/B-M (S-LL):
 - ◇ decrease in 2-day compressive strength;
- compared to CEM I:
 - ◇ decrease in 2-day compressive strength;
 - ◇ decrease in 7-day compressive strength;
 - ◇ decrease in resistance to water and defrosting salts at 28 days of age;
 - ◇ increase in shrinkage rate at 28 days.

Finally, one would take into account the increase in the risk of plastic shrinkage cracking during early-age hydration with CEM II/C-M (S-LL) used in concrete.

5. Practical relevance and potential applications of the work

The research aimed to verify the influence of a new type of Portland composite cement CEM II/C-M (S LL) 42.5 N according to STN EN 197-5 on (1) technically significant concrete properties and (2) the resistance to aggressive environments of carbonation [XC], chloride penetration [XD], chemical action [XA] according to our accelerated test methodologies and freezing and thawing [XF] (25, 26). The results obtained until now serve as a basis for reliable assessing the applicability of CEM II/C-M (S-LL) in concrete according to STN EN 206+A2 and STN EN 206/NA. During the solution of this project, tests to verify the resistance of concrete to the influence of the exposure class XC, XD, and XS based on the requirements of the forthcoming standards prEN 206-1:2023, prEN 206-100 and prEN 1992-1-1 [Eurocode 2] were not carried out.

6. Conclusions

Important present findings related to the evaluation of the use of CEM II/C-M (S-LL) of EN 197-5 in concrete are:

1. Concrete made of CEM II/C-M (S-LL) has, except for 2-day compressive strengths, all technically significant properties identical to concrete with reference CEM II/B-M (S-LL) of STN EN 197-1. The CEM II/B-M (S-LL) cement is approved for use in concrete in STN EN 206+A2.
2. Concrete made of CEM II/C-M (S-LL) has most of the technically significant properties identical to concrete with reference CEM I of STN EN 197-1. The CEM I cement is approved for use in concrete in STN EN 206+A2.
3. CEM II/C-M (S-LL) of EN 197-5 is suitable for use in concrete according to EN 206+A2 in the same way as the comparative CEM II/B-M (S-LL) of EN 197-1 from the viewpoint of influencing the technically significant properties of concrete.

10. ÚNMS, STN 72 2113: 1993. Determination of cement density. Bratislava: Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (1993).
11. CEN, EN 196-6: 2018. Methods of testing cement-Part 6: Determination of fineness. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, (2018).
12. ÚNMS, STN EN 12350-2: 2020. Testing fresh concrete-Part 2: Slump-test. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2020).
13. ÚNMS, STN EN 12350-7: 2020. Testing fresh concrete-Part 7: Air content. Pressure methods. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2020).
14. ÚNMS, STN EN 12350-6: 2020. Testing fresh concrete-Part 6: Density. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2020).
15. ÚNMS, STN EN 480-4: 2006. Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods-Part 4: Determination of bleeding of concrete. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2006).
16. ÚNMS, STN EN 12390-3: 2020. Corrigendum AC - 7/12 Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2020).
17. ÚNMS, STN EN 12390-5: 2020. Testing hardened concrete. Part 5: Flexural strength of test specimens. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2020).
18. ÚNMS, STN EN 12390-6: 2011. Testing hardened concrete-Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2011).
19. ÚNMS, STN 73 1316: 2023. Determination of moisture content, absorptivity and capillarity of concrete. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2023).
20. ÚNMS, STN EN 12390-8: 2020. Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2020).
21. ÚNMS, STN 73 1320: 1987. Determination of volume changes of concrete. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (1987).
22. ACI [American Concrete Institute], ASTM C 1579-06: Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete [Using a steel form insert]. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, (2006).
23. ÚNMS, STN EN 12390-13: 2022. Testing hardened concrete-Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2022).
24. ÚNMS, STN 73 1371: 1981. Method of ultrasonic pulse testing of concrete. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (1981).
25. ÚNMS, STN 73 1322: 2016. Determination of frost resistance of concrete. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2016).
26. ÚNMS, STN 73 1326: 2016. Resistance of cement concrete surface to water and defrosting chemicals. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2016).
27. ÚNMS, STN EN 1992-1-1+A1: 2015. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing, Bratislava, Slovakia, (2015).

Acknowledgments

The authors wish to thank the Association of Slovak Cement Producers for supporting the research work.