

Znaczenie zbrojenia rozproszonego na oddziaływania pośrednie w betonowych elementach masywnych

Effect of dispersed reinforcement on the indirect interactions in massive concrete elements

1. Wprowadzenie

Procesowi twardnienia spoiwa cementowego obok przyrostu wytrzymałości towarzyszy wydzielanie ciepła oraz skurcz, jeżeli twardnienie przebiega bez dostępu wody z zewnątrz. Na przebieg wymienionych zjawisk ma wpływ rodzaj stosowanego spoiwa, stosunek wodno-cementowy oraz wprowadzone do betonu domieszki i dodatki mineralne. Elementy betonowe w następstwie wpływów termiczno-skurczowych zaczynają dążyć do zmiany objętości, co w przypadku występujących więzów zewnętrznych wywołuje w nich odkształcenia i naprężenia. Odkształcenia i naprężenia powstające w tych elementach, zależą od składu mieszanki, oraz od ich wymiarów geometrycznych. Mają także na nie duży wpływ warunki zewnętrzne, determinujące wymianę energii i masy pomiędzy twardniejącym betonem i otoczeniem. Bezpośrednim następstwem tych zjawisk jest tworzenie się rys i spękań w twardniejącym betonie (1, 2). Z dotychczasowych badań wynika, że decydujący wpływ na zmniejszenie ryzyka tego typu uszkodzeń betonowych konstrukcji masywnych ma stosowanie cementów o małym cieple twardnienia oraz klasycznego zbrojenia wiotkiego, ograniczającego szerokość rozwarcia rys (3, 4, 5). W wielu konstrukcjach klasyczne zbrojenie prętami wiotkimi zastępuje się zbrojeniem rozproszonym, zazwyczaj w postaci włókien stalowych, oraz z tworzyw sztucznych, co ma duży wpływ na właściwości betonu. Wpływ zbrojenia rozproszonego na powstawanie rys w wyniku oddziaływań pośrednich oraz zachowanie się materiału po zarysowaniu nie został dotychczas w pełni poznany i udokumentowany. Szczególne znaczenie ma tutaj wczesny okres występujących oddziaływań i zmieniające się w czasie właściwości fizyczne twardniejącego betonu, mające wpływ na przyczepność włókien do matrycy cementowej oraz efektywność tego typu wzmocnienia.

W pracy podano wyniki badań symulacyjnych zmian naprężenia w konstrukcjach masywnych wykonanych z betonów zwykłych klasy C25/30 z cementu hutniczego CEM III, bez oraz z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. Przedstawiono wybrane wyniki badań wpływu zbrojenia rozproszonego na tworzenie się rys i spękań termiczno-skurczowych w elementach betonowych o różnicowanej masywności.

1. Introduction

The strength development on hardening of cement matrix is accompanied by heat evolution and shrinkage, as the processes occur without access of external water. These phenomena are affected by the type of binder, water to cement ratio, use of admixtures and mineral additives. The concrete elements, subjected to the thermal shrinkage, show volume changes and, when the external constraints exist, exhibit deformations and stresses. The deformations and stresses are the function of concrete mixture composition and geometrical dimensions. They are also affected by external curing conditions, determining the energy and mass transfer between the hardened concrete and environment. The scratches and cracks are the direct consequence of the phenomena mentioned above (1, 2). As it results from the previous studies, the application of low heat cements together with the classic slender reinforcement, limiting the angle of scratch spacing, is of special importance in preventing scratching and cracks (3, 4, 5). In many structures the classic slender reinforcement bars are replaced by the dispersed reinforcement in the form of steel, carbon or plastic fibres. They impact significantly the properties of concrete. The effect of dispersed reinforcement on the formation of scratches resulting from the indirect interactions, as well as on the behaviour of material after scratching has not been fully recognized and documented. These interactions are of special importance at early age of hardening; they impact also the change of hardening concrete strength and fibres adhesion to cement matrix. The effectiveness of reinforcement is thus strongly affected.

The data relating to the simulation studies on the changes of stresses induced in different massive structures are given in this work. The structures were erected using normal class C25/30 concrete produced from metallurgical cement CEM III with and without dispersed reinforcement.

The selected results relating to the effect of dispersed reinforcement on the formation of scratches and shrinkage induced cracks in different massive concrete elements are presented.

2. Materiały i metody badań

W badaniach stosowano włókna stalowe o długości 50 mm i średnicy 1 mm oraz włókna polipropylenowe o długość 12 mm i średnicy 30,6 μm . Końce włókien stalowych miały wykształcone strefy kotwienia.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach betonowych o następującym składzie:

- BZ I - betonu zwykłego klasy C25/30 wykonanego z cementu hutniczego, o małym cieple twardnienia,
- BZ II - betonu zwykłego klasy C25/30 wykonanego z cementu hutniczego z dodatkiem zbrojenia rozproszonego, w postaci włókien stalowych,
- BZ III - betonu zwykłego klasy C25/30 wykonanego z cementu hutniczego z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych i polipropylenowych.

Betony BZ I, BZ II oraz BZ III wykonano z cementu hutniczego CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA. Do mieszanki betonowej BZ II dodano włókna stalowe, natomiast do mieszanki BZ III włókna stalowe i polipropylenowe. Składy betonów stosowanych w badaniach podano w tablicy 1.

Program badań obejmował:

- ustalenie wczesnych wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu oraz modułu sprężystości, próbek betonów twardniejących w warunkach izotermicznych, izolowanych od wymiany wilgoci z otoczeniem,
- pomiar ciepła twardnienia cementu CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA, w warunkach adiabatycznych,
- wyznaczenie wczesnych zmian objętościowych wywołanych początkowo pęcznieniem a później skurczem twardniejącego betonu BZ I oraz ich wpływu na wzrost sił działających na próbki betonu pozbawione swobody przemieszczeń,
- symulację warunków twardnienia elementu płytowego o grubości $d = 0,75\text{ m}$, $d = 1,50\text{ m}$ oraz $d = 3,00\text{ m}$, wykonanego z betonów BZ I, BZ II, BZ III o składzie podanym w tablicy 1.

Badania wytrzymałości na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu przeprowadzono na próbkach sześciennych 150x150x150 mm, a modułu sprężystości na próbkach cylindrycznych $\phi 150 \times 300\text{ mm}$. Pomiary wytrzymałości i modułu sprężystości badanych betonów BZ I, BZ II, BZ III przeprowadzono po: 15, 24, 72, 168 i 672 godzinach zaś wytrzymałość na rozciąganie po 18, 48, 72, 168, 336 i 672 godzinach dojrzewania. Moduł sprężystości betonu wyznaczono po sześciokrotnym cyklu obciążeń wstępnych próbek, mierząc odkształcenia przy naprężeniach nie przekraczających 30% ich wytrzymałości doraźnej.

2. Materials and methods

In experiments the steel fibres of length of 50 mm and 1 mm diameter and polypropylene fibres of dimensions 12 mm and 30.6 μm were used. The steel fibres with hooked ends.

The following concrete samples were examined:

- BZ I – C25/30 class normal concrete, produced from low heat slag cement of hydration,
- BZ II – C25/30 class normal concrete, produced from slag cement with dispersed reinforcement in the form of steel fibres,
- BZ III – C25/30 class normal concrete, produced from slag cement with dispersed reinforcement in the form of steel and polypropylene fibres.

In the production of concretes the low heat, sulphate resistant, low alkali metallurgical cement CEM III/B 32.5 N LH/HSR/NA was used. The composition of concretes is given in Table 1.

The examination was carried out following the scheme:

- compressive, flexural strength and elasticity modulus determination at early age for the samples cured in the isothermal conditions, protected against the access of moisture from external environment,
- heat evolution measurements for CEM III/B 32.5 N LH/HSR/NA in hydrothermal conditions,
- determination of early volume changes induced by expansion and further on by shrinkage in BZ I sample; evaluation of these changes with increasing forces generated when the free deformation is constrained,
- simulation of the hardening process in concrete slabs of different thickness, that is at $d = 0.75\text{ m}$, $d = 1.50\text{ m}$ and $d = 3.00\text{ m}$ respectively, produced from mixtures BZ I, BZ II, BZ III (composition given in Table 1).

The compressive and flexural strength tests were carried out by splitting the 150x150x150 mm concrete cubes, the elasticity

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD BETONÓW STOSOWANYCH W BADANIACH W kg/m^3

COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES IN kg/m^3

Mieszanka Mixture	Cement	Woda Water	Kruszywo Aggregate		Włókna Fibers	
					Stalowe Steel	PP Polypropylene
BZ I	CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA 350	175 I	0÷2 630	2÷16 1280		
BZ II	CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA 350	175 I	0÷2 630	2÷16 1280	50	
BZ III	CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA 350	175 [I]	0÷2 630	2÷16 1280	50	2

Ilość wydzielonego ciepła twardnienia cementu oznaczono w kalorymetrze adiabatycznym, stosując próbki betonu BZ I o temperaturze początkowej 20°C.

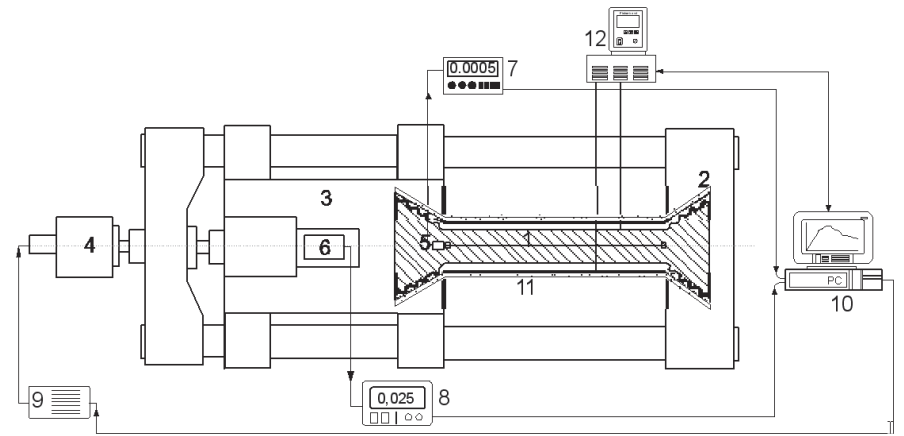
Do badań wczesnych zmian objętościowych twardniejącego betonu BZ I (pęcznienie, skurcz) oraz ich następstw zastosowano specjalnie skonstruowane urządzenie. Ogólny schemat budowy i działania tego urządzenia przedstawiono na rysunku 1 opisano między innymi we wcześniejszej publikacji (6).

Zasadniczym elementem układu sterowania urządzenia jest komputer [10], który poprzez sterownik [9] reguluje pracę układu napędowego [4]. W trakcie doświadczenia czujnikiem [5] dokonywany jest pomiar przemieszczenia bazy pomiarowej, a czujnikiem [6] wielkość siły działającej na badaną próbkę. Wartości te, poprzez tory ujemnego sprzężenia zwrotnego, mogą być niezależnie porównywane w układzie regulacji z wartościami zadanymi w programie doświadczenia. Próbki betonowe wykonywane są w konstrukcji urządzenia, w formie „koszulkowej”, o podwójnych ściankach [11], tworzących osłonę quasi-adiabatyczną twardniejącego betonu. Warunki termiczne twardnienia betonu badanej próbki regulowane są za pomocą temperatury cieczy przepływającej przez komory formy, symulującej warunki brzegowe przepływu ciepła we wnętrzu betonowej konstrukcji masywnej. Temperatury twardnienia betonu w formie ustalone zostały teoretycznie, na podstawie obliczeń uwzględniających między innymi skład mieszanki betonowej, wielkość i szybkość wydzielania ciepła przez cement oraz założoną grubość masywnego elementu płytowego $d = 0,75 \div 3,00$ m. Zmienna temperatura cieczy ustalana jest komputerowo za pomocą termostatu [12]. Po związaniu mieszanki betonowej w formie, jej ścianki oraz dno zostają minimalnie odsunięte od powierzchni próbki. W badaniach symulacyjnych następstw oddziaływań pośrednich, założono brak swobody przemieszczenia wykonanego elementu. Rejestrowano zmiany sił oddziaływujących na badane próbki betonu w wyniku początkowego wzrostu, a później spadku temperatury, od chwili związania betonu do czasu zniszczenia próbek.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki pomiarów wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i modułu sprężystości próbek betonowych we wczesnym okresie twardnienia oraz po 28 dniach przedstawiono w tabelicy 2.

Z przedstawionych w tabelicy 2 wyników wyciągnąć można ogólny wniosek, że korzystny wpływ dodatku do betonu włókien na jego właściwości mechaniczne, szczególnie zaś wytrzymałość na rozciąganie, ujawnia się dopiero po dłuższym okresie twardnienia.



Rys.1. Urządzenie do badań próbek betonu w procesie twardnienia: 1 – próbka betonowa 100x100x700 mm, 2 – uchwyt nieruchomy urządzenia, 3 – uchwyt ruchomy urządzenia, 4 – układ napędu uchwytu ruchomego, 5 – czujnik pomiaru przesunięć, 6 – czujnik pomiaru siły, 7 – odczyt układu pomiarowego przesunięć, 8 – odczyt układu pomiarowego siły, 9 – sterownik układu napędu, 10 – komputer centralnego układu sterowania, 11 – osłona quasi-adiabatyczna, 12 – termostat sterowany komputerowo

Fig. 1. Scheme of apparatus for concrete testing on hardening: 1 – 100x100x700 mm concrete sample, 2 – stationary, immobile holder, 3 – mobile holder, 4 – power transmission system for mobile holder, 5 – sensor of displacement, 6 – sensor of force, 7 – read-out of displacement measuring system, 8 – read-out of force measuring system, 9 – power transmission system controller, 10 – central power transmission system unit, 11 – quasi-adiabatic shield, 12 – computer controlled thermostat

modulus was determined using the ϕ 150x300 mm cylindrical samples. The measurements of strength and elasticity modulus were done for the BZ I, BZ II and BZ III concretes after the 15, 24, 72, 168 and 672 hours hardening respectively. The elasticity modulus of concrete was determined at six cycles of preload load; the deformation was measured at stresses not exceeding 30% of immediate strength.

The heat evolved values were determined in an adiabatic calorimeter on the BZ I samples, at initial temperature 20°C.

The early volume changes of hardened BZ I concrete (expansion, shrinkage) as well as their consequences were characterized in specially constructed apparatus. The general scheme and directions of use for this device, presented in Fig.1, has been reported in another work (6).

Computer (10) is a basic element of controlling system which through controller (9) influence on power transmission system (4). During experiments the sensor (5) is measuring the displacement of measuring base and sensor (6) is measuring the force applied to the sample. These measured values, through negative coupling point indicator can be compared in controlling system with the values assigned in experimental programme. The samples were prepared in the “jacket” mould, in measuring device with double walls (11), forming quasi adiabatic chamber of hardening concrete. The thermal conditions of hardening sample are controlled with the liquid temperature which is flowing through the mould chamber which is simulating the threshold conditions of heat transmission in the massive concrete element. The hardening temperatures of concrete in the mould have been establish theoretically on

Ilość wydzielonego ciepła twardnienia cementu CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA pokazano na rysunku 2.

Badany cement charakteryzuje stosunkowo mała maksymalna szybkość wydzielania ciepła około 5 J/gh, w okresie początkowych 20 godzin hydratacji, oraz niskie ciepło twardnienia, około 180 J/g, po 100 godzinach twardnienia.

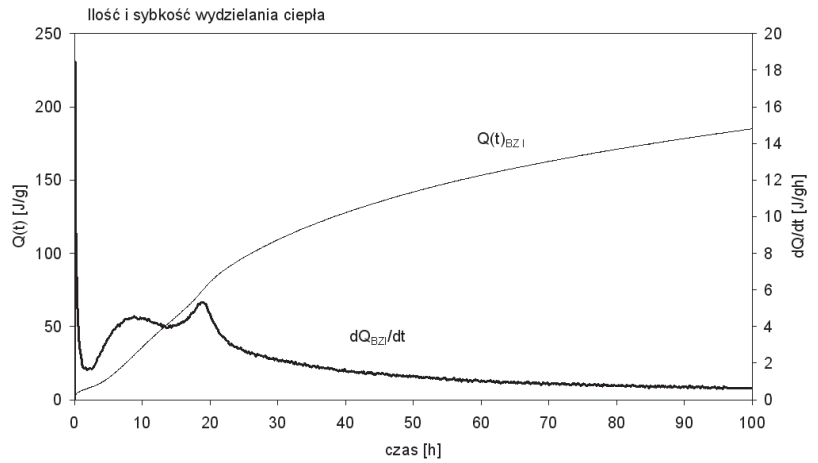
Na rysunku 3 pokazano wyniki badań swobodnych zmian liniowych próbek ϵ^s badanego betonu BZ I oraz spowodowane nimi naprężenia.

Próbka betonu BZ I, zabezpieczona izolacją przed wymianą wilgoci z otoczeniem, w początkowym okresie twardnienia wykazuje nieznaczne pęcznienie. Po około 20 godzinach od końca wiązania następuje niewielki skurcz, który po 200 godzinach twardnienia osiąga wartość ok. 7 $\mu\text{m}/\text{m}$. Wczesne zmiany objętościowe twardniejącego betonu w warunkach braku swobody odkształceń wywołują nieznaczne naprężenia wymuszone.

Wyniki badań symulacyjnych termicznych naprężeń wymuszonych w płytach betonowych o grubości od 0,75 m do 3,00 m pokazano na rysunkach 4-6.

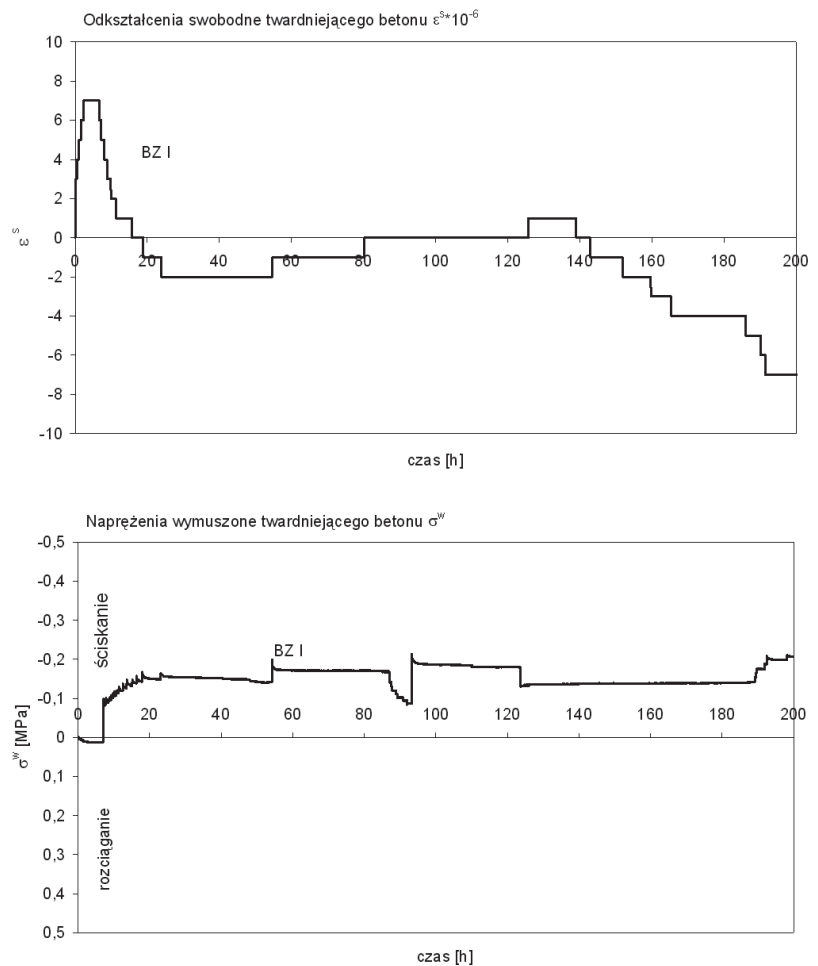
Próbki nie zbrojonego betonu (BZ I), poddane cyklicznym zmianom temperatury średniej, odpowiadającej warunkom jego twardnienia we wnętrzu masywnych płyt fundamentowych o grubości od 0,75 do 3,00 m uległy zniszczeniu przy nieznacznym spadku temperatury $\Delta T = T_{\text{max}} - T_r$, odpowiednio o 1,3 do 4,4°C. Maksymalne wartości naprężeń rozciągających powodujących zniszczenie materiału mieszczą się w granicach od 0,91 do 1,00 MPa. Wobec braku zbrojenia rozproszonego w betonie, rejestrowano gwałtowny spadek siły rozciągającej w chwili utworzenia się pierwszej rysy. Okres od chwili związania mieszanki betonowej do rozerwania twardniejącej próbki mieści się w granicach od 69 do 120 godzin i związany jest jedynie z zaprogramowanym cyklem zmian temperatury płyt o zróżnicowanej masywności. Wyższym temperaturom twardnienia betonu w płytach o większej grubości towarzyszą większe wartości naprężeń ściskających, co w połączeniu z wolniejszym ich chłodzeniem powoduje późniejsze zniszczenie materiału.

Beton BZ II, zbrojony włóknami stalowymi, uległ zniszczeniu przy wyższych wartościach naprężeń rozciągających w granicach od 1,2 do 1,7 MPa. Po krótszym czasie dojrzewania próbek betonowych twardniejącego materiału (symulacja warunków twardnienia płyt o grubości 0,75 m i 1,50 m) zarejestrowano nagłe zniszczenie materiału $\sigma_r = \sigma_n$ (tablica 3). Symulacja warunków twardnienia płyty o grubości 3,00 m (wyższe temperatury oddziałujące przez dłuższy okres czasu), wykazała, że po pojawieniu się pierwszego



Rys. 2. Ciepło twardnienia cementu CEM III/B N LH/HSR/NA w warunkach adiabaticznych

Fig. 2. Heat evolution corresponding to the cement CEM III/B 32.5 N LH/HSR/NA hardening in adiabatic conditions

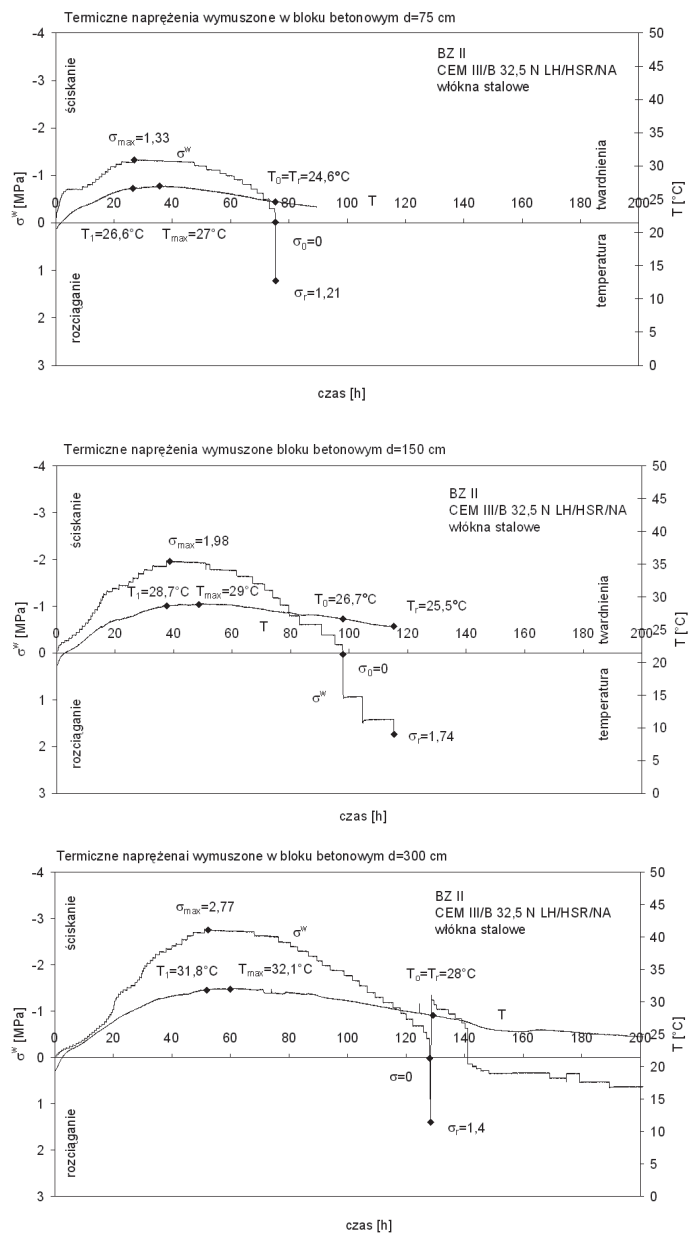


Rys. 3. Odkształcenia swobodne oraz naprężenia wymuszone wywołane zmianami objętościowymi betonu BZ I w początkowym okresie twardnienia

Fig. 3. Free deformations and forced stresses induced by volume changes in BZ I concrete at early age of hardening

the basis of calculations taking into account the composition of concrete mix, the heat of cement hardening and its evolution as well as the dimension of concrete massive element $d = 0.75 -$

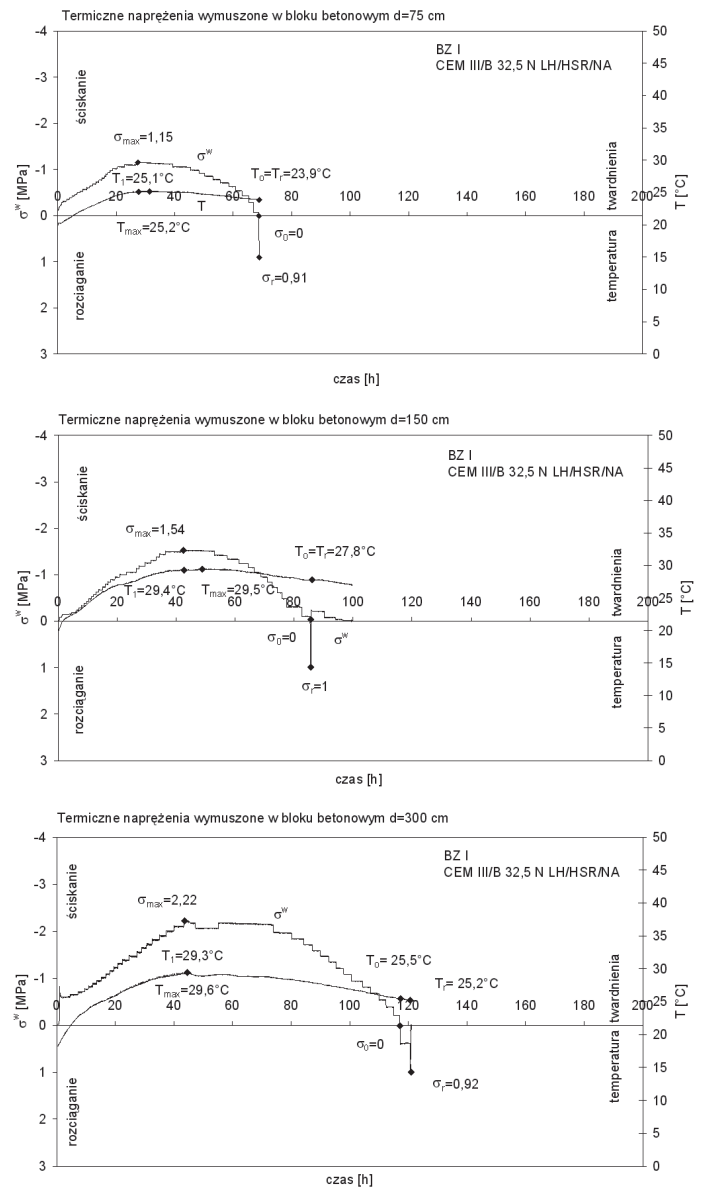
zarysowania (gwałtowny spadek naprężenia), przekrój badanej próbki, przy dalszym spadku temperatury, może przejmować naprężenia rozciągające. Wskazuje to na efektywny udział zbrojenia rozproszonego w przyjmowaniu sił rozciągających w przekroju próbki, wywołanych dalszym ochładzaniem się betonu. Wynika stąd, że dopiero po dłuższym dojrzewaniu betonu włókna stalowe uzyskały odpowiednią przyczepność do matrycy cementowej.



Rys. 5. Termiczne naprężenia wymuszone w płytach o grubości od 0,75 do 3,00 m; beton BZ II

Fig. 5. Thermal stresses forced in the 0.75 m to 3.00 m thick concrete slabs; BZ II concrete

Inny charakter zmian naprężeń σ_w w twardniejącym betonie zaobserwowano w przypadku próbek zbrojonych włóknami stalowymi polipropylenowymi (BZ III) [rysunek 6]. Wyraźnie zaznacza się w tych próbkach moment zarysowania betonu przy naprężeniach σ_r wynoszących od 0,8 do 1,7 MPa, czemu odpowiada gwałtowny chwilowy spadek naprężenia, oraz następujący po tym okres ich wzrostu i stabilizacji. W trakcie badań symulacyjnych warunków twardnienia płyt o grubości 0,75 i 1,50 m zniszczenie



Rys. 4. Termiczne naprężenia wymuszone w płytach o grubości od 0,75 do 3,00 m; beton BZ I

Fig. 4. Thermal stresses forced in the 0.75 m to 3.00 m thick concrete slabs; BZ I concrete

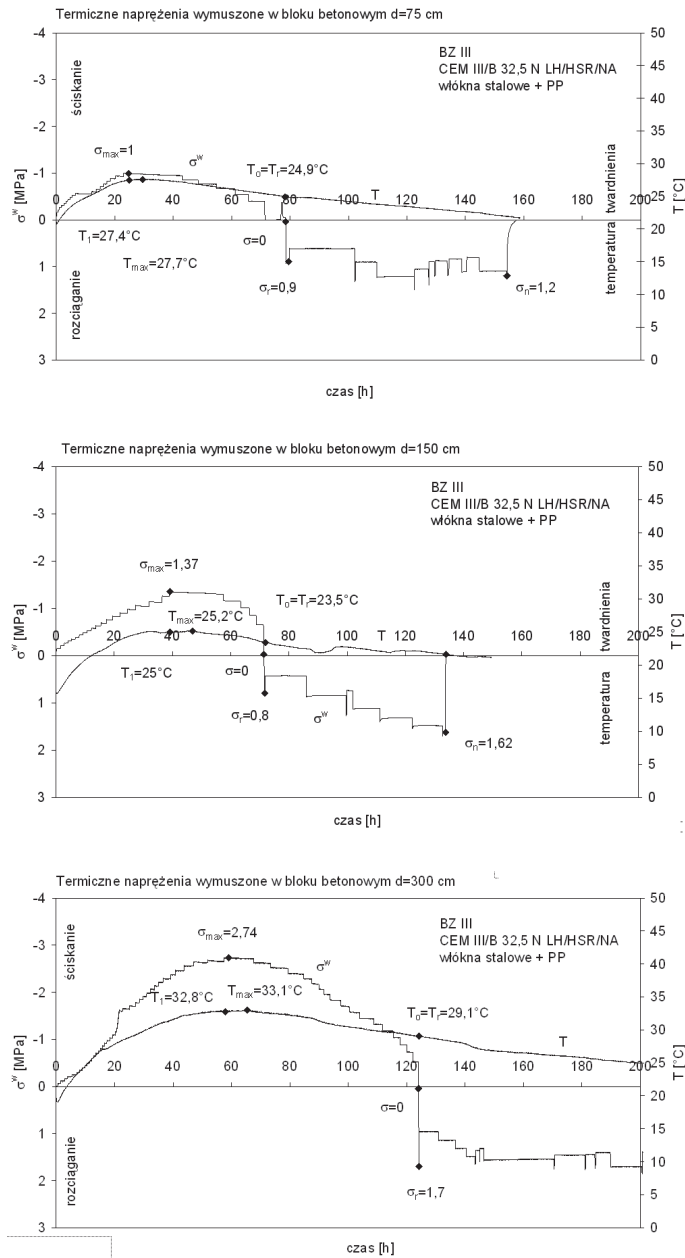
3.00 m. The liquid temperature is controlled by computer with the aid of thermostat (12).

After setting end of concrete in the mould its walls and the bottom are slightly displaced from the sample surface. In simulating experiments of indirect interactions the lack of free displacement of concrete element was assumed. The forces affecting on concrete samples due to initial increase and were registrated afterwards decrease of temperature from concrete self till the samples destruction.

3. Results and discussion

The compressive strength, flexural strength and elasticity modulus of concrete samples at early age of hardening and after 28 days maturing are presented in Table 2.

materiału następowało znacznie później w porównaniu z czasem t_r – utworzenia rysy, przy naprężeniach $\sigma_n > \sigma_r$. W przypadku płyty o grubości 3,00 m, w trakcie dalszego jej ochładzania, naprężenie nie uległo większym zmianom, co świadczy o efektywnym udziale zbrojenia rozproszonego w przejmowaniu oddziaływań pośrednich twardniejącego betonu wywołanych zmianami jego temperatury i skurczu.



Rys. 6. Termiczne naprężenia wymuszone w płytach o grubości 0,75 do 3,00 m; beton BZ III

Fig. 6. Thermal stresses forced in the 0.75 m to 3.00 m thick concrete slabs; BZ III concrete

Zestawienie charakterystycznych wyników badań pokazanych na rysunkach 4÷6 podano w tabelicy 3. Można zauważyć, że korzystny wpływ zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych w składzie betonu ($\sigma_n > \sigma_r$) uwidacznia się dopiero w badaniach symulacyjnych bloków o większej masywności, a więc wówczas gdy materiał poddawany jest naprężeniom rozciągającym dopiero po

Tablica 2 / Table 2

WYTRZYMAŁOŚĆ I MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI PRÓBEK BETONOWYCH
STRENGTH DATA AND ELASTICITY MODULUS OF CONCRETE SAMPLES

Wytrzymałość na ściskanie/Compressive strength $f_{cm(t)}$, MPa						
Czas Time, h	15	24	72	168	672	
BZ I	1,32	3,18	10,46	20,64	34,96	
BZ II	1,75	3,88	11,47	23,98	37,69	
BZ III	2,38	3,71	12,99	23,54	39,01	
Moduł sprężystości/Elasticity modulus $E_{cm(t)}$, MPa						
Czas Time, h	15	24	72	168	672	
BZ I	4370	6970	13380	19800	32960	
BZ II	3560	10200	12140	20860	34260	
BZ III	3240	9430	17570	-	36660	
Wytrzymałość na rozciąganie/Flexural strength $f_{ctm(t)}$, MPa						
Czas Time, h	18	48	72	168	336	672
BZ I	0,13	0,64	1,06	1,69	2,29	2,64
BZ II	0,18	0,49	0,72	2,13	3,20	3,81
BZ III	0,29	0,61	0,89	2,37	3,30	3,50

From the data given in Table 2 one can conclude that the beneficial effect of fibre reinforcement as the mechanical properties modifying agent, particularly as the flexural strength is concerned, appears after longer time of maturing.

The total heat evolved on cement CEM III/B 32,5 N LH/HSR/NA hardening is shown in Fig. 2.

A relatively low maximum rate of heat evolution, 5 J/gxh during the first 20 hours, as well as the low total heat evolved value, about 180 J/g after 100 hours hardening, was found.

In Fig. 3 the free linear dimensions changes ϵ^s for concrete sample BZ I are shown. There is also the plot showing the stresses thus generated.

At early age of hardening the BZ I sample, protected against the attack of moisture, shows an expansion. After ca. 20 hours from the final setting time some shrinkage is observed; it attains ca. 7 $\mu\text{m}/\text{m}$ value after 200 h. At early volume changes of hardened concrete, when the free deformation is not possible, some low forced stresses appear.

The results of simulation experiments, concerning the forced stresses in the 0.75 m to 3.00 m thick concrete slabs, are shown in Figs 4 – 6.

The concrete (BZ I) samples with no reinforcement, subjected to the cyclic changes of average temperature, reflecting the conditions of the hardening process inside the massive, 0.75 m to 3.00 m thick concrete slabs, were destroyed at low temperature drop $\Delta T = T_{max} - T_r$, that is 1.3 to 4.4°C respectively. The maximum

Tablica 3 / Table 3

ZESTAWIENIE WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH

THE RESULTS OF SIMULATION EXPERIMENTS

Temperatury i naprężenia w twardniejących płytach betonowych o grubości 0,75 m Temperatures and stresses in hardened 0.75 m thick concrete slabs										
Beton Concrete	T_p °C	T_1 °C	σ_{max} MPa	T_{max} °C	T_o °C	T_r °C	σ_r MPa	σ_n MPa	t_r h	ΔT °C
BZ I	20,0	25,1	1,15	25,2	23,9	23,9	0,91	0,91	69	1,3
BZ II	20,0	26,6	1,33	27	24,6	24,6	1,21	1,21	75,4	2,4
BZ III	20,7	27,4	1,0	27,7	24,9	24,9	0,9	1,2	79,5	2,8
Temperatury i naprężenia w twardniejących płytach betonowych o grubości 1,5 m Temperatures and stresses in hardened 1.5 m thick concrete slabs										
Beton Concrete	T_p °C	T_1 °C	σ_{max} MPa	T_{max} °C	T_o °C	T_r °C	σ_r MPa	σ_n MPa	t_r h	ΔT °C
BZ I	20,0	29,4	1,54	29,5	27,8	27,8	1,0	1,0	85,7	1,7
BZ II	19,4	28,7	1,98	29,0	26,7	25,5	1,74	1,74	115,3	3,5
BZ III	15,8	25,0	1,37	25,2	23,5	23,5	0,8	1,62	71,5	1,7
Temperatury i naprężenia w twardniejących płytach betonowych o grubości 3,0 m Temperatures and stresses in hardened 3.0 m thick concrete slabs										
Beton Concrete	T_p °C	T_1 °C	σ_{max} MPa	T_{max} °C	T_o °C	T_r °C	σ_r MPa	σ_n MPa	t_r h	ΔT °C
BZ I	18,2	29,3	2,22	29,6	25,5	25,2	0,92	0,92	120,7	4,4
BZ II	19,4	31,8	2,77	32,1	28,0	28,0	1,40	-	128,42	4,1
BZ III	19,4	32,8	2,74	33,1	29,1	29,1	1,70	-	124,18	4,0
Oznaczenia/Notation:										
T_p	- temperatura początkowa mieszanki betonowej/initial temperature of concrete mixture,									
T_1	- temperatura płyty odpowiadająca chwili wystąpienia naprężeń σ_{max} /temperature of slab, corresponding to the σ_{max} stress generation,									
σ_{max}	- maksymalne naprężenia w okresie wzrostu temperatury twardniejącego betonu/maximum stress during the temperature rise in hardened concrete,									
T_{max}	- maksymalna temperatura twardniejącego betonu/maximum temperature of hardened concrete,									
T_o	- temperatura odpowiadająca naprężeniom $\sigma = 0$ w fazie chłodzenia/temperature corresponding to the stress value $\sigma = 0$ on cooling,									
T_r	- temperatura w chwili zarysowania lub zniszczenia (rozerwania) elementu/temperature at the moment of scratch or failure (splitting) of element,									
σ_r	- naprężenia wywołujące zarysowanie lub zniszczenie (rozerwanie) elementu/stress generating scratch or failure (splitting) of element,									
σ_n	- naprężenia wywołujące zniszczenie (rozerwanie) elementu (dotyczy płyt zbrojonych włóknami)/stress generating scratch or failure (splitting) of element (in fibre reinforced slabs)									
t_r	- czas zarysowania lub zniszczenia (rozerwania) betonu/time of scratch or failure (splitting) of concrete,									
ΔT	- różnica między temperaturą maksymalną oraz temperaturą elementu w chwili jego zarysowania lub zniszczenia ($T_{max}-T_r$)/difference between the maximum temperature and the temperature of scratch or failure ($T_{max}-T_r$).									

dłuższym okresie twardnienia, w wyższych temperaturach. Dłuższy czas dojrzewania betonu sprzyja wzrostowi przyczepności pomiędzy twardniejącą matrycą cementową a zbrojeniem rozproszonym. Dodatek do betonu, oprócz włókien stalowych, również włókien polipropylenowych okazał się szczególnie korzystny w przypadku elementów o mniejszej masywności, które poddawane są termiczno-skurczowym naprężeniom rozciągającym we wczesnych okresach twardnienia kompozytu. Wyniki niektórych badań (7) wskazują na korzystniejsze warunki tworzenia warstwy przejściowej na powierzchni włókna polimerowego w porównaniu z włóknami stalowymi, co ma bezpośredni wpływ na ich wczesną przyczepność do matrycy cementowej i efektywność wzmocnienia.

values of tensile stresses, leading to the failure of material are within the range of 0.91 to 1.00 MPa. A substantial, quick drop of tensile force was found when the first scratch appeared in concrete mixture with no dispersed reinforcement. The time interval between the concrete mixture setting and the failure of hardened sample is in the range from 69 h to 120 h. This is only the consequence of cyclic temperature changes in the slabs of different thickness. Higher temperatures of concrete on hardening in the slabs of higher thickness are accompanied by higher compressive strength values and simultaneously their cooling is slower. Therefore in this case the failure is observed at later age.

4. Podsumowanie

Stosowanie do wykonania betonowych konstrukcji masywnych cementów o małym cieple twardnienia nie eliminuje ryzyka tworzenia się rys i spękań termiczno-skurczowych. Ryzyko to można znacznie ograniczyć dodając do składu mieszanki betonowej zbrojenie rozproszone. Dodatek do mieszanki betonowej, poza włóknami stalowymi, również włókien polipropylenowych okazał się szczególnie korzystny w wypadku gdy termiczno-skurczowe oddziaływania pośrednie wywołują wzrost naprężeń rozciągających w początkowym okresie twardnienia betonu. Dotyczy to przede wszystkim elementów o małym i średnim module powierzchniowym (8). Po utworzeniu się rys właściwie dobrane zbrojenie rozproszone, może efektywnie przejmować następstwa oddziaływań pośrednich generowanych zmianami temperatury i skurczu twardniejącego betonu.

Literatura / References

1. R. Springenschmid, P. Nischer, Untersuchungen über die Ursache von Querrissen im jungen Beton. Beton – und Stahlbetonbau, 68, s. 221-226 (1973).
2. W. Kiernożycki, Betonowe konstrukcje masywne, Polski Cement, Kraków 2003.
3. G. König, N. Viet Tue, M. Zink, Hochleistungsbeton - Bemessung, Herstellung und Anwendung, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2001.
4. K. Flaga, Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych, Monografia 295, Politechnika Krakowska, 2004.
5. W. Kiernożycki, J. Borucka-Lipska, F. Freidenberg, O minimalnym zbrojeniu powierzchniowym masywnych elementów płytowych, Inżynieria i Budownictwo, 11 (2003).
6. J. Borucka-Lipska, P. Freidenberg, W. Kiernożycki, Oddziaływania pośrednie zachodzące w masywnych elementach betonowych o zróżnicowanym składzie, LI Konferencja Naukowa KLIiW PAN i KN PZITB, Gdańsk-Krynica, 2005.
7. W. Pichór, J. Dyczek, Przyczepność włókien polimerowych do zaczynu cementowego, Cement, Wapno, Beton, 1 (1999).
8. K. Flaga, Naprężenia własne termiczne typu „makro” w elementach i konstrukcjach z betonu. Zeszyt Naukowy Politechniki Krakowskiej, Monografia 106, Kraków 1990.

The steel fibres reinforced BZ II concrete suffered the failure at higher tensile stress values, that is in the range from 1.2 to 1.7 MPa. At shorter curing (simulation corresponding to the hardening of 0.75 m and 1.50 m thick slabs) the sudden failure of material at $\sigma_r = \sigma_n$ (see Table 3) was registered. Simulation corresponding to the hardening of 3.00 m thick slabs (higher temperature impact at prolonged time) revealed that after the appearance of the first scratch (quick drop of stress value) the cross section of sample, after prolonged cooling, could transfer the tensile stresses. It is indicating the effective influence of dispersed reinforcement in taking over of stretching forces in sample section generating by further cooling of concrete. It seems that after longer curing of concrete the steel fibres achieved a better cohesion to cement matrix.

The changes of σ_w stresses in the hardened concrete BZ III, reinforced with the steel and polypropylene fibres are of another character (Fig. 6). The appearance of the scratch is very clearly registered at the σ_r stress value from 0.8 to 1.7 MPa, together with corresponding instantaneous stress drop, further followed by its rise and stabilization. During the simulation experiments dealing with the hardening of 0.75 m and 1.50 m thick slabs the failure was observed at later age than the formation of scratch (t_s) and at the stress $\sigma_n > \sigma_r$. In the case of 3.00 m thick slab the stress did not specially change on further cooling; it means that the dispersed reinforcement is very effective in the transmission of indirect interactions in concrete, created by temperature gradient and shrinkage.

The summary of results of the experiments illustrated in Figs 4-6 is given in Table 3. One can notice that the beneficial effect of dispersed reinforcement in concrete ($\sigma_n > \sigma_r$) is well visualized in the simulation experiments as the more massive block are taken into account, that is in the material subjected to the tensile stresses after longer time of maturing, at higher temperatures. At later age the adhesion of dispersed reinforcement to the hardened matrix is better. The addition of polypropylene fibres together with the steel ones seems to be significantly advantageous. In the other work the better properties of the transition zone formed on the surface of polymer fibre, as compared to the steel one, has been reported (7). This interface is of special importance as the adhesion to cement matrix and the effectiveness of reinforcement is discussed.

4. Summary

As one can conclude from the results presented above, the reduction of thermal and shrinkage cracks is strongly related to the composition of concrete mixture. The risk of these cracks generation in massive structures is diminished by use of low heat cements and by the application of dispersed reinforcement. The addition to concrete mix, behind the steel fibres, also polypropylene fibres seems to have a beneficial influence in case when stretching stresses are caused by indirect interactions in the early stage of hardening. It concerns chiefly the elements with low or medium surface modulus (8). In this case after microcracks formation the indirect interactions resulting from the temperature gradient and shrinkage of hardened concrete can be effectively compensated by dispersed reinforcement.