

MIROSŁAW BISKUP¹) ORCID: 0000-0002-6240-1892

JAN SKAWIŃSKI²⁾ ORCID: 0000-0002-7887-3130

PERFORMANCE OF TYPE "T" PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH LIMESTONE AGGREGATE UNDER LONG- AND SHORT-TERM LOADING PRACA STRUNOBETONOWYCH BELEK MOSTOWYCH TYPU "T" Z KRUSZYWEM WAPIENNYM POD OBCIĄŻENIEM DŁUGOTRWAŁYM I DORAŹNYM

STRESZCZENIE. Rosnące zapotrzebowanie budownictwa na kruszywa oraz coraz większe koszty ich wydobycia i transportu sprawiły, że od dłuższego czasu bierze się pod uwagę możliwość stosowania kruszyw wapiennych w sprężonych obiektach inżynierskich. W odpowiedzi na te rozważania podjeto badania prefabrykatów strunobetonowych wykonanych z betonu na bazie kruszywa wapiennego, w celu doświadczalnego zweryfikowania ich właściwości pod względem zgodności podstawowych parametrów materiałowych i konstrukcyjnych z założeniami projektowymi oraz normowymi. Do badań wytypowano belki strunobetonowe typu T12/2010 wykonane z betonu na bazie grysu wapiennego frakcji 2/8 i 8/16 z kopalni w Sitkówce koło Kielc. Zakres pracy obejmował badania próbek betonowych oraz badania doraźne i długotrwałe gotowych elementów prefabrykowanych realizowane na poligonie i w laboratorium. Uzyskane wyniki badań wykazały, że beton z kruszywem wapiennym może mieć nie gorsze właściwości mechaniczne od betonów na bazie kruszyw ze skał magmowych, a wykonane z niego belki sprężone spełniają założenia projektowe dla poszczególnych faz pracy elementu.

SŁOWA KLUCZOWE: konstrukcje sprężone, kruszywa wapienne, prefabrykaty strunobetonowe. ABSTRACT. Due to the growing demand for aggregates combined with the increase in aggregate excavation and transportation costs, the possibility of use of limestone aggregates in prestressed concrete bridges has long been the subject of consideration in the construction industry. To address this problem. the author performed tests on precast prestressed beams produced using limestone aggregate, aiming to experimentally verify their properties in terms of agreement of their basic material and structural parameters with design and standard principles. Type T12/2010 precast prestressed concrete beams were selected as the elements for testing; the beams were produced using 2/8 and 8/16 limestone grit excavated in Sitkówka near Kielce. The scope of the work included testing of concrete samples as well as short- and long-term testing of ready precast elements, both in field and in laboratory. The obtained results indicate that concrete with limestone aggregate is not necessarily inferior to concretes with magmatic aggregates in terms of mechanical properties; the obtained prestressed beams fulfilled the requirements adopted in the design for consecutive phases of their operation.

KEYWORDS: limestone aggregates, precast prestressed elements, prestressed structures.

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Filia Kielce, ul. Chorzowska 28, 25-852 Kielce; mbiskup@ibdim.edu.pl (🖂)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Filia Kielce, ul. Chorzowska 28, 25-852 Kielce; jskawiński@ibdim.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Stale rosnące zapotrzebowanie budownictwa na kruszywa wraz z coraz większymi kosztami ich wydobycia i transportu sprawiły, że w ostatnich latach w Polsce zaczęto rozważać możliwość stosowania w obiektach inżynierskich kruszyw dotychczas niebranych pod uwagę. Dotyczy to między innymi kruszyw węglanowych, a w szczególności kruszyw wapiennych ze złóż dewońskich zlokalizowanych na terenie województwa świętokrzyskiego.

Z podobnych powodów kruszywa węglanowe zaczęto już dość dawno stosować do betonów konstrukcyjnych w wielu krajach na świecie. Przykładem mogą być niektóre regiony Francji [1], czy też Stany Zjednoczone, gdzie materiał ten stanowi podstawowy budulec już od wielu dekad [2, 3]. Nie wszystkie rodzaje skał węglanowych mogą być wykorzystywane do produkcji kruszyw do betonu ze względu na ich reaktywność w obecności alkaliów [4]. Zjawisko to zostało po raz pierwszy rozpoznane w USA na początku lat czterdziestych ubiegłego wieku i od tamtego czasu było przedmiotem badań, pozwalających na lepsze zrozumienie tego procesu [5]. Jak wynika z analizy literatury, kruszywa wapienne odpowiedniej jakości są z powodzeniem stosowane również w konstrukcjach sprężonych. Przedmiotem znacznej części prac badawczych prezentowanych w tym obszarze w ostatnich dwóch dekadach są zagadnienia związane ze stosowaniem w elementach sprężonych betonów samozagęszczalnych z kruszywem wapiennym [6, 7], a nawet betonów z wykorzystaniem kruszyw wapiennych z recyklingu [8]. Wyniki takich prac są zwykle odnoszone do zachowania elementów porównawczych wykonanych z betonów standardowych z takim samym kruszywem, które przez autorów są już traktowane jako rozwiązania typowe.

Stosowanie tego rodzaju kruszyw w budownictwie mostowym w Polsce uzyskało akceptację administracji drogowej w drugiej dekadzie bieżącego stulecia. Najpierw pojawiły się realizacje obiektów żelbetowych z wykorzystaniem kruszyw wapiennych, a po pewnym czasie zaczęto je również stosować w konstrukcjach sprężonych.

Do zmiany podejścia w tej kwestii przyczyniło się z pewnością upowszechnienie wiedzy o przydatności kruszyw wapiennych do stosowania w betonach konstrukcyjnych oraz liczne realizacje z ich wykorzystaniem w budownictwie mieszkaniowym i przemysłowym, których przykłady można znaleźć w publikacjach [9, 10]. Nie bez znaczenia było również zaangażowanie producentów

1. INTRODUCTION

The growing demand of the construction industry for aggregates, in combination with the increase in aggregate excavation and transportation costs, heightened the interest in Poland in the possibility of using aggregates that had been previously perceived as unsuitable for concrete bridge structures. Such aggregates include carbonate aggregates, particularly limestone aggregates from Devonian deposits located in the Świętokrzyskie Voivodeship.

For similar reasons, carbonate aggregates have been used in structural concretes in many countries around the world for a relatively long time. Examples include certain regions of France [1], or the United States, where this material has been widely used in construction for many decades [2, 3]. Not all types of carbonate rocks may be used in production of aggregates for concrete due to their alkali-reactivity [4]. This phenomenon, first identified in the USA in early 1940s, is still the subject of research efforts aiming at improved understanding of the process [5]. Literature review indicates that limestone aggregates of appropriate quality are also successfully used in prestressed structures. Many research works published in this field in the last two decades pertained to prestressed elements produced using self-compacting concrete with limestone aggregate [6, 7], or even concrete with recycled limestone aggregates [8]. Results obtained in such works are usually compared to those of reference elements incorporating standard concretes with the same aggregates, which are treated by the authors as typical solutions.

Application of this type of aggregate in bridge construction in Poland was approved by the road administration in 2010s. Limestone aggregates were first introduced in reinforced concrete bridge structures; later their applications were broadened to prestressed structures as well.

Approach to this subject certainly evolved due to popularization of knowledge on suitability of limestone aggregates for structural concrete and owing to numerous successful applications of such aggregates in housing and industrial construction projects, whose examples have been described in publications [9, 10]. Involvement of precast prestressed concrete element producers was also of importance; their efforts enabled performance of tests presented herein.

The aim of the presented research was to verify the properties of prestressed bridge girders with limestone agprefabrykatów strunobetonowych, z inicjatywy których możliwe było wykonanie badań prezentowanych w niniejszym artykule.

Badania te miały na celu zweryfikowanie właściwości sprężonych dźwigarów mostowych z betonu na bazie kruszywa wapiennego pod względem zgodności podstawowych parametrów materiałowych i konstrukcyjnych z założeniami projektowymi i normowymi.

2. PROGRAM BADAŃ

Mając na względzie dotychczasowe doświadczenia z badań prefabrykowanych dźwigarów strunobetonowych, przyjęto założenie, że badaniom zostaną poddane prefabrykaty stosowane w ustrojach belkowych, stanowiące typowe i powszechnie stosowane rozwiązanie konstrukcyjne. Wybrano belki typu T według opracowania katalogowego Przedsiębiorstwa Robót Mostowych "Mosty-Łódź" S.A. z 2010 roku [1].

Przyjęty program badań zakładał użycie sześciu prefabrykatów, wobec czego do badań wytypowano belki T12/2010, których długość (12 m) umożliwiała wykonanie wszystkich elementów w jednym cyklu produkcyjnym. Było to istotne ze względu na potrzebę uzyskania możliwie dużej powtarzalności wykonania belek, a w szczególności – takiej samej siły sprężającej.

Do produkcji belek zaplanowano użycie betonu na bazie grysu wapiennego frakcji 2/8 i 8/16 z kopalni w Sitkówce koło Kielc. Wyboru kruszywa do projektowanej mieszanki betonowej dokonano na podstawie analizy wyników badań kruszywa w odniesieniu do wymagań normy PN-EN 12620 [12] oraz wniosków zawartych w opinii Zakładu Betonu Instytutu Badawczego Dróg i Mostów [13], w których pozytywnie oceniono możliwość stosowania tych kruszyw do betonów konstrukcyjnych. Zakładane parametry wytrzymałościowe i trwałościowe betonu według opracowanej receptury zostały potwierdzone badaniami próbek pobranych z zarobów próbnych. Zakres badań próbek obejmował wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość, wodoprzepuszczalność, mrozoodporność i odporność na złuszczenie podczas zamrażania i rozmrażania w roztworze NaCl.

Program badań prefabrykatów obejmował następujący zakres:

- badania właściwości betonu na próbkach,
- kontrolę produkcji i ocenę jakości wykonania prefabrykatów,

gregate in terms of agreement of their basic material and structural parameters with design and standard principles.

2. TESTING PROGRAM

Taking into account previous experience from testing of precast prestressed girders, the assumption was adopted that research was to be performed on prefabricated elements typically and commonly used in beam systems. Type T beams, as defined in the 2010 catalog publication by the "Mosty-Łódź" company [1], were selected for testing. As the adopted research program assumed testing of six precast elements, T12/2010 beams were chosen; their length (12 m each) enabled manufacturing of all elements in one production cycle. This fact was significant due to the need for obtaining high repeatability of beams and, most importantly, their prestressing force.

The beams were produced using concrete with 2/8 and 8/16 limestone grit excavated in Sitkówka near Kielce. Aggregate for the designed concrete mixture was chosen based on aggregate test results analyzed in reference to the PN-EN 12620 standard [12] and the conclusions presented in the opinion of the Concrete Division of the Road and Bridge Research Institute [13], in which such aggregates were positively evaluated for use in structural concrete. Strength and durability parameters assumed in the concrete mix design were confirmed in tests on specimens sampled from trial mixtures. These tests encompassed compressive strength, water absorption, water permeability, frost resistance and resistance to scaling during freezing and thawing in NaCl solution.

Testing program for the precast elements included:

- testing of concrete sampled from the mixtures,
- production and quality control of precast elements,
- testing (up to cracking) of two beams without concrete deck in four-point bending test,
- long-term testing and observation of four beams in field, under self-weight or under additional static load,
- testing (up to cracking and to failure) of four beams with concrete deck in four-point bending test.

3. CONCRETE TESTING 3.1. COMPOSITION OF MIXTURES

In accordance with technical documentation [11], beams were produced using the class C40/50 (B50) concrete mixture composition and concrete decks were produced

- badania (do zarysowania) dwóch belek bez płyty zespolonej w próbie zginania czteropunktowego,
- badania i obserwacje czterech belek na poligonie, w warunkach obciążenia ciężarem własnym i długotrwałym obciążeniem użytkowym,
- badania (do zarysowania i do zniszczenia) czterech belek z płytą zespoloną w próbie zginania czteropunktowego.

3. BADANIA BETONU 3.1. SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

Zgodnie z dokumentacją techniczną [11], do wykonania belek opracowano recepturę betonu klasy C40/50 (B50) oraz klasy C30/37 (B35) dla płyt zespolonych, stosując następujące materiały:

- cement CEM I 52,5 R 420 kg,
- grys wapienny 2/8 Sitkówka 487 kg,
- grys wapienny 8/16 Sitkówka 679 kg,
- piasek 0/2 622 kg,
- superplastyfikator 3,2 kg,
- napowietrzacz 0,6 kg,
- woda wodociągowa 147 kg.

3.2. PRÓBKI I METODY BADAŃ

W czasie betonowania belek formowano próbki sześcienne o boku 150 mm do badań wytrzymałości betonu na ściskanie i na rozciąganie przez rozłupywanie oraz próbki walcowe Ø150/300 mm przeznaczone do badań modułu sprężystości betonu. Z betonu płyt zespolonych formowano jedynie próbki sześcienne o boku 150 mm do badań wytrzymałości betonu na ściskanie. Próbki po zaformowaniu były przechowywane w warunkach laboratoryjnych, a ich badania wykonywano w seriach po trzy próbki po określonym w programie badań okresie dojrzewania lub w chwili badania prefabrykatów.

Wytrzymałość charakterystyczną (gwarantowaną) betonu na ściskanie wyznaczono trzema metodami:

- a) metodą określoną w normie PN-S-10040:1999 [14],
- b) metodą określoną w normie PN-EN 206-1:2003 [15],
- c) metodą statystyczną, przy założeniu dopuszczalnej wadliwości w = 5% oraz poziomu ufności 0,5, według wzoru:

$$R^{\rm G}_{\ b} = R_{\rm bc} - t_{\rm min} \cdot s_{\rm R} \,, \tag{1}$$

using class C30/37 (B35) concrete, incorporating the following material:

- CEM I 52.5 R cement 420 kg,
- 2/8 Sitkówka limestone grit 487 kg,
- 8/16 Sitkówka limestone grit 679 kg,
- 0/2 sand 622 kg,
- superplasticizer 3.2 kg,
- air-entrainer 0.6 kg,
- water 147 kg.

3.2. SPECIMENS AND TEST METHODS

Concrete sampled from the mixture during beam production was used to form 150 mm cube specimens for compressive strength and tensile (splitting) strength tests, as well as cylindrical Ø150/300 mm specimens for elasticity modulus tests. Only 150 mm cube specimens for compressive strength testing were formed in the case of concrete dedicated for the deck to be placed over the beams. Specimens after casting were stored in laboratory conditions; they were tested in series of three, either after the curing period described in the testing program or at the time of precast element testing.

Characteristic (guaranteed) compressive strength of concrete was determined using three methods:

- a) method defined in the PN-S-10040:1999 standard [14],
- b) method defined in the PN-EN 206-1:2003 standard [15],
- c) statistical method, adopting the allowable defectiveness w = 5% and confidence level of 0.5, according to the equation:

$$R^{\rm G}_{\ b} = R_{\rm bc} - t_{\rm min} \cdot s_{\rm R}, \qquad (1)$$

where:

- $R^{\rm G}_{\rm b}$ guaranteed strength,
- $R_{\rm bc}$ mean compressive strength,
- t_{\min} coefficient adopted based on [16], equals 1.94 for three samples,
- $s_{\rm R}$ standard deviation.

Independently of the testing program performed by the Road and Bridge Research Institute, cube specimens were also sampled by the precast beam producer's laboratory. They were stored in the same conditions as the precast elements up to the moment of beam prestressing; later the gdzie:

- $R^{\rm G}_{\rm b}$ wytrzymałość gwarantowana na ściskanie,
- $R_{\rm bc}$ wytrzymałość średnia na ściskanie,
- *t*_{min} przyjęty wg opracowania [16] współczynnik, wynoszący dla trzech próbek 1,94,
- $s_{\rm R}$ siła normalna pomiędzy cząstkami.

Niezależnie od programu badań IBDiM, próbki sześcienne zostały pobrane również przez laboratorium producenta belek. Były one przechowywane w warunkach dojrzewania betonu prefabrykatów aż do chwili sprężania, a następnie w warunkach laboratoryjnych do końca okresu dojrzewania betonu. Badanie wytrzymałości na ściskanie w laboratorium producenta wykonywano w celu określenia wytrzymałości w chwili sprężania oraz wytrzymałości 28-dniowej.

3.3. WYNIKI BADAŃ

Uzyskane w badaniach próbek betonowych średnie wartości wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu oraz modułu sprężystości betonu użytego do wykonania belek T12 i płyt zespolonych przedstawiono w Tabl. 1. W Tabl. 2 i 3 zestawiono natomiast charakterystyczne (gwarantowane) wytrzymałości betonu na ściskanie, obliczone trzema różnymi metodami.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że beton użyty do produkcji belek i płyt zespolonych charakteryzuje się dużym przyrostem wytrzymałości na ściskanie w początkowym okresie dojrzewania. Już po pierwszej dobie średnia wytrzymałość na ściskanie betonu belek wyniosła 34,3 MPa, a betonu płyt zespolonych 21,9 MPa. Wytrzymałość charakterystyczna, w zależności od sposobu obliczania, wyniosła od 28,6 MPa do 31,3 MPa dla belek oraz od 17,3 MPa do 24,5 MPa dla płyt zespolonych.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie dla próbek dojrzewających w warunkach prefabrykatów (obróbka termiczna) były istotnie wyższe. Jak wynika z dzienników sprężania opracowanych przez producenta belek, po okresie jednej doby uzyskano wytrzymałość charakterystyczną 41,9 MPa. Wymagania zawarte w dokumentacji projektowej belek [11] zakładały możliwość sprężania po osiągnięciu przez beton wytrzymałości gwarantowanej na ściskanie o wartości 30 MPa, wobec czego warunek ten został spełniony. cube samples were stored in laboratory conditions for the remainder of the curing period. Compressive strength was tested in the producer's laboratory in order to determine the strength at the moment of beam prestressing and the 28-day strength.

3.3. TEST RESULTS

Table 1 presents a comparison of the obtained mean values of compressive strength, tensile (splitting) strength and modulus of elasticity of concrete used for production of the T12 beams and concrete decks. Tables 2 and 3 show the obtained characteristic (guaranteed) compressive strength of concrete determined using the three methods mentioned.

The obtained test results indicate that concrete used for production of the precast beams and concrete decks displays fast growth of compressive strength in the initial stage of curing. Even after one day, mean compressive strength equaled 34.3 MPa for concrete used in beams and 21.9 MPa for concrete used in the decks. Characteristic compressive strength ranged from 28.6 MPa to 31.3 MPa for concrete used in beams and from 17.3 MPa to 24.5 MPa for concrete used in decks.

Compressive strength values obtained on specimens that had been stored by the producer in the same conditions as the precast elements (thermal conditioning) were significantly greater. As indicated in the producer's prestressing log, characteristic compressive strength after one day equaled 41.9 MPa. Requirements set forth in the design documentation of the precast beams [11] permitted element prestressing after concrete had reached guaranteed compressive strength of 30 MPa; therefore, this condition was fulfilled.

According to the [15] standard, characteristic compressive strength of concrete used in beams reached the required value as soon as 3 days after casting. After 28 days of curing it equaled 65.3 MPa and was greater by 30% than the designed value of 50 MPa. After a further period of 28 days, strength increases by about 4% and later remains at a comparable level.

Characteristic compressive strength of concrete used in decks reached the value of 49,7 MPa according to [15] after only 7 days; it was greater by 34% than the designed value of 37 MPa. After 14 days this concrete practically reached its maximum compressive strength – the mean value from tests performed at later intervals equaled 51.4 MPa.

Table 1. Test results of concretes used for beams and decks Tablica 1. Wyniki badania betonu belek i płyt zespolonych

			Concrete for decks Beton płyt zespolonych		
No. Lp.	Concrete age [days] Wiek betonu [dni]	Mean compressive strength Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{\rm cm,cube}$ [MPa]	Mean tensile strength by splitting test Średnia wytrzymałość na rozciąganie badana przez rozłupywanie $f_{ctm,sp}$ [MPa]	Mean modulus of elasticity Średni moduł sprężystości $E_{\rm cm}$ [GPa]	Mean compressive strength Średnia wytrzymałość na ściskanie $f_{\rm cm,cube}$ [MPa]
1	1	34.3	2.9	35.8	21.9
2	3	55.6	3.5	39.8	_
3	7	67.8	3.8	39.5	53.2
4	14	68.2	4.0	39.6	59.6
5	28	69.3	3.7	39.9	_
6	32	_*)	_	_	64.6
7	41	_	_	_	64.0
8	47	76.4	_	_	_
9	56	72.1	_	_	_
10	76	_	_	_	64.6
11	90	73.3	4.0	38.3	_
12	120	65.8	_	_	_
13	150	71.0	_	_	_
14	169	_	_	_	64.5
15	180	75.0	4.1	39.8	_
16	230	_	_	_	63.2
17	239	_	_	_	54.3
18	241	70.4	_	_	_
19	243	68.3	_	_	_
20	245	_	_	_	67.4
21	250	65.3	_	_	_
22	256	70.6	_	_	_
23	300	71.8	_	_	_
*) – n	ot applicable / brak dany	/ch			

Table 2. Characteristic compressive strength of concrete used for beams Tablica 2. Wartości wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie betonu belek

No. Lp.	Concrete age [days] Wiek betonu [dni]	Management		Characteristic (guaranteed) compressive strength [MPa] Wytrzymałość charakterystyczna (gwarantowana) na ściskanie				
		Mean strength Wytrzymałość średnia $f_{cm,cube}$ [MPa]	R ^G _b (acc. / wg PN-S-10040)	<i>f</i> _{ck,cube} (acc. / wg PN-EN 206-1)	$R^{G}_{\ b}$ according to statistical calculations $R^{G}_{\ b}$ wg obliczeń statystycznych			
1	1	34.3	28.6	30.3	31.3			
2	3	55.6	46.3	51.6	49.0			
3	7	67.8	58.2	63.8	66.2			
4	14	68.2	58.2	64.2	65.9			
5	28	69.3	58.5	65.3	64.6			
6	47	76.4	64.4	72.4	71.7			
7	56	72.1	60.1	68.1	60.9			
8	90	73.3	61.3	69.3	67.9			
9	120	65.8	54.8	61.8	56.2			
10	150	71.0	59.1	67.0	61.7			
11	180	75.0	64.2	71.0	72.9			
12	241	70.4	58.7	66.4	59.5			
13	243	68.3	56.9	64.3	57.3			
14	250	65.3	54.4	61.3	57.5			
15	256	70.6	58.8	66.3	55.0			
16	300	71.8	61.5	67.8	68.3			

Table 3. Characteristic compressive strength of concrete used for decks

Tablica 3. Wartości wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie betonu płyt zespolonych

No. Lp.		Mean atum ath	Characteristic (guaranteed) compressive strength [MPa] Wytrzymałość charakterystyczna (gwarantowana) na ściskanie				
	Concrete age [days] Wiek betonu [dni]	Wytrzymałość średnia $f_{\rm em, cube}$ [MPa]	$\frac{R_{b}^{G}}{(acc. / wg PN-S-10040)}$	$f_{\rm ck,cube}$ (acc. / wg PN-EN 206-1)	R^{G}_{b} according to statistical calculations R^{G}_{b} wg obliczeń statystycznych		
1	1	21.9	21.9	24.5	17.3		
2	7	53.2	46.2	49.7	52.3		
3	14	59.6	51.8	56.2	58.2		
4	32	64.6	50.4	56.4	51.0		
5	41	64.0	55.1	60.8	61.0		
6	76	64.6	52.6	58.6	58.7		
7	169	64.5	52.9	59.5	57.3		
8	230	63.2	50.7	56.6	55.7		
9	239	54.3	47.9	53.4	45.5		
10	245	67.4	50.2	56.3	48.2		

Wytrzymałość charakterystyczna betonu prefabrykatów określona wg normy [15] osiągnęła wartość projektowaną już po 3 dobach od chwili betonowania. Po 28 dniach dojrzewania wyniosła natomiast 65,3 MPa i była o 30% większa od projektowanej wartości 50 MPa. Po kolejnych 28 dniach wytrzymałość zwiększa się o około 4% i pozostaje na podobnym poziomie w dalszym okresie.

Wytrzymałość charakterystyczna betonu płyt zespolonych już po 7 dniach dojrzewania wyniosła wg normy [15] 49,7 MPa i była o 34% większa od projektowanej wartości 37 MPa. Po 14 dniach dojrzewania beton osiąga praktycznie maksymalną wytrzymałość na ściskanie – średnia jej wartość z wyników badań wykonywanych w dalszych okresach dojrzewania wyniosła 51,4 MPa.

Średnia wytrzymałość na rozciąganie betonu przyrastała praktycznie do 14 dnia dojrzewania, osiągając wartość 3,99 MPa. W dalszym okresie nie ulegała istotnym zmianom. Uzyskane wyniki wykazują dużą zgodność z normą PN-EN 1992-1-1:2008 [17] w odniesieniu do projektowanej klasy betonu; dla betonu C40/50 określona została wartość średniej wytrzymałości na rozciąganie $f_{\rm ctm,sp} = 4,1$ MPa.

Maksymalną wartość modułu sprężystości beton osiągnął praktycznie już po 3 dniach dojrzewania, a jego średnia wartość wyniosła 39,8 GPa. Analizując uzyskane wyniki w odniesieniu do normy [17] można zauważyć, że zależność średniej wytrzymałości na ściskanie i średniej wartości modułu sprężystości jest podobna do określonej w tej normie dla betonu kwarcytowego.

Ciężar objętościowy betonu zbadany na próbkach wyniósł od 2,37 kg/dm³ do 2,45 kg/dm³, średnio: 2,39 kg/dm³. Wynik ten mieści się w połowie zakresu przewidzianego dla betonów zwykłych wykonywanych z kruszyw kamiennych.

4. BADANIA PREFABRYKATÓW 4.1. PRODUKCJA BELEK I TERMINY BADAŃ

Belki T12/2010 wyprodukowane zostały na torze naciągowym jednego z zakładów prefabrykacji w Kielcach w jednym cyklu produkcyjnym (6 belek na torze), zgodnie z programem sprężania opracowanym przez IBDiM. Numerację belek od B1 do B6 przyjęto, licząc od strony czynnej toru. Mean tensile strength of concrete increased in the first 14 days of curing, reaching the value of 3.99 MPa. It did not display significant changes in later periods. The obtained results are in close agreement with the PN-EN 1992-1-1:2008 standard [17] in terms of the designed concrete class; the mean tensile strength given for the C40/50 class is $f_{\rm ctm,sp} = 4.1$ MPa.

Concrete reached its maximum modulus of elasticity practically after 3 days of curing; its mean value equaled 39.8 GPa. Analysis of the obtained results in the light of the [17] standard indicates that the relationship between the mean compressive strength and the mean modulus of elasticity is similar to that given in the standard for quartzite concrete.

Density of concrete determined on specimens ranged from 2.37 kg/dm³ to 2.45 kg/dm³, mean: 2.39 kg/dm³. This value lies in the middle of the range provided for standard concretes based on stone aggregates.

4. TESTING OF PRECAST ELEMENTS 4.1. BEAM PRODUCTION AND TEST SCHEDULE

The T12/2010 beams were produced on a casting bed in one of the precast concrete production facilities in Kielce, within one production cycle (6 beams on the bed), in accordance with the prestressing program developed by the Road and Bridge Research Institute. Beams were labeled B1 to B6, starting from the tensioning end of the bed.

Table 4 presents a detailed timeline of beam production, short-term laboratory tests and long-term field tests.

4.2. TESTS PERFORMED DURING PRODUCTION OF PRECAST ELEMENTS AND EVALUATION OF PRODUCTION QUALITY

Based on the measurements performed during tensioning on the casting bed, it was noted that installation tensioning force of strands was lower by 0.1% than the assumed force; strand elongation was greater by 0.7% than the assumed value. The results indicated sufficient agreement of tensioning force in the beams with the designed value; therefore, no corrections to the design parameters were made. W Tabl. 4 przedstawiono szczegółowe zestawienie terminów produkcji belek oraz realizacji badań doraźnych w laboratorium i długotrwałych na poligonie.

Table 4. Schedule of beam production and testing
Tablica 4. Zestawienie terminów wykonania i badania belek

Beam No. Nr belki	Beam production	Concrete deck	Long-terr Badania dł	m testing ugotrwałe	Short-term loading test Badania doraźne		
	Produkcja belek	zespolonei	under load	without load	to cracking	to failure	
		J	pod obciążeniem	bez obciążenia	do zarysowania	do zniszczenia	
B1	Steel tensioning / Naciąg: 22.11.2017	_*)	_	_	21.12.2017	—	
B2			—	_	09.01.2018	10.01.2018	
B3	Concrete casting / Betonowanie:	07 12 2017	04.01.2018 -		23.07.2018	24-25.07.2018	
B4	22.11.2017 07.12.2017 29.0		29.06.2018		03.08.2018	03-06.08.2018	
B5	Prestressing / Sprężanie:			04.01.2018 -	10.08.2018	10.08.2018	
B6	23.11.2017	_	_	02.07.2018	27.07.2018	_	
*) not applicable / brak danych							

4.2. BADANIA W CZASIE PRODUKCJI I OCENA JAKOŚCI WYKONANIA PREFABRYKATÓW

Na podstawie analizy pomiarów prowadzonych w czasie naciągu cięgien na torze stwierdzono, że siła montażowa naciągu cięgien była mniejsza o 0,1% od zakładanej, a wydłużenie było większe o 0,7% od zakładanego. Uzyskane wyniki wskazały na tyle dużą zgodność siły sprężającej w belkach z wartością projektowaną, że nie były dokonywane korekty parametrów projektowanych.

Sprężanie belek wykonano następnego dnia po zabetonowaniu. Wytrzymałość charakterystyczna betonu w chwili sprężania wynosiła 41,9 MPa i była o prawie 12 MPa większa od wytrzymałości wymaganej w dokumentacji [11]. Wytrzymałość betonu w chwili sprężania została określona przez laboratorium wytwórni na podstawie badań próbek dojrzewających w takich samych warunkach jak prefabrykaty.

Wartości strzałek odwrotnych belek zmierzonych metodą niwelacyjną bezpośrednio po sprężeniu na torze oraz w początkowym okresie składowania zestawiono w Tabl. 5. Według dokumentacji technicznej [11] strzałka w stanie początkowym powinna wynosić 11 mm. Zmierzone strzałki wynoszące średnio 8,8 mm są mniejsze od projektowanych o około 20%, co wskazuje na większą szt.wność belek w chwili sprężania. Warunki podparcia prefabrykatów w obliczeniach teoretycznych i w trakcie wykonywanych pomiarów strzałek były takie same; Beams were prestressed the day after they had been cast. Characteristic concrete strength at the moment of prestressing equaled 41.9 MPa and was greater by almost 12 MPa than the value required in the documentation [11]. Concrete strength at the moment of prestressing was determined at the producer's laboratory on concrete samples stored in the same conditions as the precast elements.

Values of camber (upward deflection) were measured using levelling methods directly after prestressing on the casting bed and in the initial period of storage; they are given in Table 5. According to the technical documentation [11], camber in the initial state should equal 11 mm. The measured camber values, 8.8 mm on average, are less than the designed values by approx. 20%, which indicates greater stiffness of the beams at the moment of prestressing. Support schemes of prefabricated elements in theoretical calculations and during camber measurements were identical; the observed differences in camber result primarily from greater modulus of elasticity of concrete at the moment of prestressing than the value assumed in the design.

4.3. FIELD TESTS AND OBSERVATIONS

The aim of beam testing performed in field was to verify performance of precast elements under more long-term loading by self-weight and additional static load in natural climatic conditions.

Beams B3 and B4 (both with concrete decks) were stored in field under additional load, whereas beam B5 (with concrete deck) and beam B6 (without concrete deck) were subjected to self-weight only. Beams B3 and stwierdzone różnice strzałek odwrotnych wynikają głównie z wyższej od zakładanej w projekcie wartości modułu sprężystości betonu podczas sprężania. B4 were loaded using 3-ton steel weights (14 pcs.) and 0.28-ton concrete elements (4 pcs.). Load was transferred onto both beams using a steel frame. A scheme of the test station is presented in Fig. 1; its view during placement of weights is shown in Fig. 2.

Table 5. Comparison of deflection values after beam prestressing and in the initial period of storage Tablica 5. Zestawienie wartości strzałek odwrotnych belek od sprężenia oraz ich zmian w początkowym okresie składowania

No.	Concrete age [h]	Deflection of beam / Strzałki belek [mm]						Mean	
Lp.	Wiek betonu	B1	B2	В3	B4	В5	B6	Średnia	
1	17 (after prestressing) (po sprężeniu)	6.67	7.27	7.41	9.43	7.53	7.71	7.67	
2	22 (in storage) (na składowisku)	7.17	8.29	8.52	10.42	9.42	8.77	8.76	
3	48	8.59	9.33	9.84	11.51	10.30	11.07	10.11	
4	72	9.22	_*)	_	_	_	11.08	10.15	
5	120	9.33	10.13	10.67	12.49	11.25	11.37	10.87	
6	192	9.49	10.79	11.22	12.92	11.89	11.56	11.31	
7	312	_	11.59	10.91	12.88	12.58	12.73	12.14	
*)	*)								

*) – not applicable / brak danych

4.3. BADANIA I OBSERWACJE BELEK NA POLIGONIE

Badania belek na poligonie miały na celu sprawdzenie pracy prefabrykatów w warunkach bardziej długotrwałego obciążenia ciężarem własnym oraz oddziaływaniami zewnętrznymi w naturalnych warunkach klimatycznych.

Badania pod obciążeniem dotyczyły belek B3 i B4 z płytą zespoloną, natomiast belka B5 z płytą zespoloną i B6 bez płyty zespolonej były badane wyłącznie pod obciążeniem własnym. Obciążenie belek B3 i B4 realizowano obciążnikami stalowymi o masie 3 t (14 szt.) oraz elementami betonowymi o masie 0,28 t (4 szt.). Obciążenie było przekazywane na obydwie belki za pośrednictwem stalowej ramy. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 1, a jego widok w trakcie ustawiania obciążenia przedstawia Rys. 2.

Obciążenie dobrano tak, aby w każdej z belek uzyskać moment zginający o wartości 406,00 kNm, co odpowiada oddziaływaniom od charakterystycznych obciążeń ruchomych podanych w dokumentacji belek [11]. Wartość obciążenia dla przyjętego schematu badawczego wyniosła 443,11 kN. Faktycznie zastosowane obciążenie nie różniło się od projektowanego o więcej niż 1%.



Fig. 1. Scheme of the test station for storage of beams B3 and B4 under external loading

Rys. 1. Schemat i wyposażenie stanowiska do badań belek B3 i B4 pod obciążeniem zewnętrznym



Fig. 2. View of the test station during placement of weights on beams B3 and B4

Rys. 2. Widok stanowiska badawczego podczas ustawiania obciążenia na belkach B3 i B4

W trakcie całego okresu badań mierzono ugięcia belek B3 i B4 pod obciążeniem oraz strzałki odwrotne belek B5 i B6. Ugięcia i strzałki belek mierzono, stosując dwie niezależne metody: niwelację precyzyjną oraz czujniki zegarowe o zakresie ±50 mm i rozdzielczości 0,1 mm. Przy pomiarach dokonywano również każdorazowo oględzin prefabrykatów pod kątem ewentualnych uszkodzeń oraz zmian wyglądu powierzchni betonowych poddanych działaniu czynników atmosferycznych.

Pomiary ugięć oraz strzałek odwrotnych belek rozpoczęto już w momencie ustawienia ich na podporach. Na Rys. 3 przedstawiono wykres ilustrujący zmiany ugięć belek B3 i B4 oraz strzałek odwrotnych belek B5 i B6 w całym okresie badania.

W przypadku badań belek pod obciążeniem maksymalne ugięcie tuż po ustawieniu obciążenia zarejestrowano w belce B4. Ugięcie to wyniosło 4,52 mm, co stanowi 76% wartości obliczonej teoretycznie. Różnica ugięć pomiędzy belkami była niewielka i wyniosła tylko 0,25 mm. Biorąc pod uwagę techniczne możliwości precyzyjnego ustawienia obciążenia, różnicę tę można uznać za nieistotną.

Ugięcia belek wzrastały w ciągu pierwszych kilkunastu dni od momentu przyłożenia obciążenia, osiągając wartość zbliżoną do ugięcia teoretycznego, wynoszącego 5,9 mm. W dalszym okresie obserwacji (160 dni) nastąpiła względna stabilizacja ugięć, a kolejne pomiary wykazywały co prawda wahania w zakresie przekraczającym nawet 1 mm (na co wpływ miały zmiany temperatury Loading of both beams was selected so as to introduce the bending moment of 406.00 kNm, which corresponds to the action of characteristic live loads given in the documentation of the beams [11]. Value of loading in the adopted test scheme equaled 443.11 kN. The actual load did not differ from the designed load by more than 1%.

Deflections of the loaded beams B3 and B4 as well as cambers of beams B5 and B6 were measured throughout the field testing period using two independent methods: precise levelling and dial gauges with the range of \pm 50 mm and resolution of 0.1 mm. Measurements were always combined with visual inspection of precast elements in order to detect any potential damage or changes in appearance of concrete surfaces exposed to environmental conditions.

First measurements of deflections and cambers were performed as soon as beams had been placed on supports in field. Fig. 3 illustrates the changes in deflections of beams B3 and B4 and deflection of beams B5 and B6 throughout the field tests.



Fig. 3. Plot of deflections of beams B3 and B4 and camber of beams B5 and B6 in the entire test period Rys. 3. Wykres zmian ugięć belek B3 i B4 oraz strzałek odwrotnych belek B5 i B6 w całym okresie badania

In the case of beams stored under additional loading, the greatest deflection directly after placement of weights was observed for beam B4. This deflection equaled 4.52 mm, that is 76% of the value calculated theoretically. Difference in the initial deflection of the two beams was as low as 0.25 mm. Taking into account the technical potential for precise placement of loading weights, this difference may be treated as negligible.

i nasłonecznienie), jednakże oscylowały one cały czas wokół podobnych wartości.

Strzałki odwrotne belek B5 i B6 bez obciążenia w całym okresie badania uległy zwiększeniu o około 4 mm. Podobnie jak w belkach obciążanych, w kolejnych pomiarach można było zauważyć wahania odczytów ugięć. Zwraca uwagę fakt, że obydwie belki zachowywały się podobnie, a belka z płytą zespoloną wykazała niewiele mniejszy przyrost strzałki odwrotnej niż belka bez płyty.

Obserwacje wykonywane podczas badań nie wykazały żadnych usterek betonu, nie stwierdzono również na powierzchniach betonowych jakichkolwiek zmian związanych z oddziaływaniami czynników atmosferycznych.

4.4. BADANIA NOŚNOŚCI BELEK NA ZGINANIE

4.4.1. Warunki i sposób realizacji badań

Badania wytrzymałościowe belek na zginanie realizowano przy różnych parametrach ich wykonania, składowania, wieku betonu oraz sposobu realizacji obciążenia. Informacje dotyczące warunków badań poszczególnych belek zestawiono w Tabl. 6. Beam deflections gradually increased within the first 10-20 days after placement of loads, reaching values comparable to the calculated theoretical deflection of 5.9 mm. In the following period of observation (160 days), deflections displayed relative stabilization; while successive measurements showed fluctuations of even 1 mm (influenced by changes in temperature and exposure to sunlight), they still remained around similar values.

Deflection of beams B5 and B6 (stored without additional loading) increased by around 4 mm in the entire test period. As was the case with loaded beams, certain fluctuations in successive measurements were observable as well. Interestingly, both beams behaved in similar manner; the increase in camber displayed by the beam with concrete deck was only slightly lower than that of the beam without concrete deck.

Observations performed during testing indicated neither defects nor environmentally-induced surface changes in the concrete.

4.4. LOAD-BEARING CAPACITY OF BEAMS UNDER BENDING

4.4.1. Test conditions and procedure

Bending strength of beams was tested for various parameters of element production, storage, age and loading. Information on the test conditions of individual beams is given in Table 6.

No.	Parameter	Beam number / Numer belki						
Lp.	Parametr	B1	B2	B3	B4	B5	B6	
1	Concrete age [days] / Wiek betonu [dni]	29	48/49	243/245	254/257	261	247	
2	Concrete deck / Płyta zespolona	No / Nie	Yes / Tak	Yes / Tak	Yes / Tak	Yes / Tak	No / Nie	
3	Storage prior to short-term loading test Składowanie przed badaniem	test hala l	test hall in field, with loading in field, w hala badań obciążone na poligonie bez obciąże		in field, with loading obciążone na poligonie		nout loading a na poligonie	
4	Test type / Rodzaj badania	R1		R2	+ Z		R1	
R1 – 1	 R1 – testing (to cracking) of beam without deck in the following cycles / badanie do zarysowania belki bez płyty w następujących cyklach: cycle I / cykl I – up to 60% of the designed cracking force / do 60% projektowanej siły rysującej, cycle II / cykl II – up to occurrence of a 0.2 mm wide crack / do rysy o rozwarciu 0,2 mm, cycle III / cykl III – repeated up to cracking / powtórny do zarysowania. 							
R2 – 1	 R2 – testing (to cracking) of beam with deck in the following cycles / badanie do zarysowania belki z płytą w następujących cyklach: cycle I / cykl I – up to 60% of the designed cracking force / do 60% projektowanej siły rysującej, cycle II / cykl II – up to occurrence of a 0.2 mm wide crack (in beam B2) or up to cracking (in other beams) / do rysy o rozwarciu 0,2 mm w belce B2 oraz do zarysowania w pozostałych belkach. 							
Z- t	 Z - testing (to failure) of beam with deck in the following cycles / badanie do zniszczenia belki z płytą w następujących cyklach: cycle I / cykl I – up to 60% of the designed cracking force / do 60% projektowanej siły niszczącej, cycle II / cykl II – up to 85% of the designed cracking force / do 85% projektowanej siły niszczącej, cycle III / cykl III – up to failure / do zniszczenia. 							

Table 6. Test conditions for beams B1 to B6 Tablica 6. Warunki wykonania badań belek od B1 do B6

Badania wykonywano na stanowisku badawczym, którego schemat i wyposażenie przedstawiono na Rys. 4. Metodyka badań była taka sama, jak w przypadku realizowanych już wcześniej przez IBDiM badań mostowych prefabrykatów strunobetonowych, prezentowanych między innymi w publikacji [18].



Fig. 4. Scheme of the station for strength testing of beams Rys. 4. Schemat wyposażenia stanowiska do badań wytrzymałościowych belek

Wszystkie urządzenia pomiarowe były podłączone do komputerowego systemu pomiarowego, w którym wykonywano ciągłą rejestrację wskazań. W trakcie badań prowadzono również obserwację powstawania i rozwoju rys.

Na potrzeby analizy uzyskanych wyników badań wytrzymałościowych wykonano obliczenia teoretycznych wartości sił rysujących, z uwzględnieniem strat reologicznych w odniesieniu do wieku prefabrykatu i warunków jego składowania. Wartości siły niszczącej przyjęto na podstawie dokumentacji [11]. Obliczenia wykonano w oparciu o projektowe charakterystyki betonu i stali sprężającej. Short-term loading tests were conducted at a test station, whose scheme is shown in Fig. 4. Test methodology was the same as in the case of earlier tests of precast prestressed bridge members, performed by the Road and Bridge Research Institute and presented in previous publications, including [18].

All the measurement devices were connected to a computer system that registered their indications continuously. Testing also encompassed observation of crack initiation and development.

In order to analyze the obtained strength results, theoretical values of cracking forces were calculated, taking into account rheological losses related to precast element age and storage conditions. Values of failure force were adopted based on the documentation [11]. Calculations were based on the design characteristics of concrete and prestressing steel.

4.4.2. Results of testing (to cracking) of beams without concrete deck

The results of testing (up to the point of cracking) of beams B1 and B6 (beams without concrete deck) are given in Table 7. The deflection vs. force relationship, along with the values of maximum deflection and permanent deflection in successive loading cycles, is shown in Fig. 5 using the example of beam B1.



Fig. 5 . Deflection vs. force relationship for beam B1 in strength test to cracking

Rys. 5. Wykres zależności ugięcia od siły w czasie badania do zarysowania belki B1

4.4.2. Wyniki badania do zarysowania belek bez płyty zespolonej

Wyniki badania do zarysowania belek B1 i B6 (bez płyt zespolonych) zestawiono w Tabl. 7. Na Rys. 5 pokazano na przykładzie belki B1 krzywe zależności ugięcia od siły oraz wartości ugięć maksymalnych i pozostałości trwałych w poszczególnych cyklach obciążenia.

Na podstawie analizy zależności siły i ugięcia stwierdzono, że szt.wność belek jest bardzo zbliżona do teoretycznej. Ulega lekkiemu zmniejszeniu jeszcze przed pojawieniem się pierwszej rysy, a po zarysowaniu wyraźnie spada. Zarysowanie belki B1 nastąpiło przy sile 203,2 kN, wynoszącej dokładnie tyle, co wartość obliczeniowej siły rysującej. Belka B6 zarysowała się przy sile niewiele mniejszej, wynoszącej 201,3 kN, choć w belce tej zakładano większe straty reologiczne siły sprężającej. Odkształcenia obydwu belek w strefie rozciąganej były podobne i stanowiły średnio 85% wartości obliczonych. Ugięcie trwałe belki B1 po drugim cyklu badania stanowiło 8% ugięcia całkowitego; w przypadku belki B6 wartość ugięcia trwałego wyniosła zaledwie 3% ugięcia całkowitego. Są to wartości mniejsze od stosowanego kryterium dopuszczalnych ugięć trwałych, wynoszącego 10%.

Analysis of the force vs. deflection relationship indicated that beam stiffness was very close to the theoretical value. Stiffness decreased slightly before the appearance of the first crack and then decreased noticeably as cracking occurred. Beam B1 cracked at the force of 203.2 kN, which exactly matched the calculated value of cracking force. Beam B6 cracked at the force of 201.3 kN, which was only slightly lower, despite the fact that greater rheological losses of prestressing force were expected in this beam. Values of strain of both beams in the zone subjected to tension were similar; on average they corresponded to 85% of the calculated theoretical strains. Permanent deflection of beam B1 after the second load cycle comprised 8% of total deflection; in the case of beam B6 permanent deflection corresponded to only 3% of total deflection. These values are within the effective criterion of permissible permanent deflection, which is 10%.

Table 7. Results of testing (up to the point of cracking) of beams without concrete deck Tablica 7. Wyniki badania belek (do zarysowania) bez płyty zespolonej

No.		Test parameters			Unit Beam designation / Oznacz		
Lp.		Parametry badania		Jednostka	B1	B6	
		calculated / obliczona		ĿN	203.2	183.0	
No. Lp. 1 2	Cracking force Siła rysująca	actual / rzeczywista		KIN	203.2	201.3	
1		ratio actual to calculated stosunek wartości rzeczywistej do obliczonej		_	1.00	1.10	
	Deflection	at the calculated cracking force	calculated / obliczone		13.8	12.43	
2		przy obliczonej sile rysującej	measured / zmierzone		14.68	11.65	
2	Ugięcie	total in cycle II / całkowite w cyklu II		111111	22.18	16.12	
		permanent in cycle II / trwałe w cyklu II			1.81	0.48	
3	Strain in th Odkształcenia	ne tensioned zone at the calculated a w strefie rozciąganej przy oblicz	cracking force onej sile rysującej	·10 ⁻⁶	+290	+269	

4.4.3. Wyniki badania do zarysowania i do zniszczenia belek z płytą zespoloną

Wyniki badania do zarysowania i do zniszczenia belek od B2 do B5 (z płytą zespoloną) zestawiono w Tabl. 8. Wykresy zależności ugięcia od siły na przykładzie badania do zarysowania i do zniszczenia belki B2 przedstawiono na Rys. 6 i 7.

4.4.3. Results of testing (to cracking and to failure) of beams with concrete deck

The results of testing (up to the points of cracking and failure) of beams B2 to B5 (beams with concrete deck) are given in Table 8. The deflection vs. force relationships from testing to cracking and testing to failure are shown in Fig. 6 and 7, based on the example of beam B2.

No.		Test parameters		Unit	Beam de	signation	/ Oznacze	nie belki
Lp.		Parametry badania			B2	B3	B4	B5
		Test parameters Parametry badaniaUnit JednostkaBeam designation / OzParametry badaniaUnit JednostkaB2B3FCracking force Siła rysującacalculated / obliczona ratio actual / rzeczywistakN272.5279.527Cracking force Siła rysującaratio actual to calculated stosunek wartości rzeczywistej do obliczonej-1.031.251.Deflection Ugięcieat the calculated cracking force przy obliczonej sile rysującejcalculated / obliczone measured / zmierzone measured / zmierzone6.986.95613.948.807Odkształcenia przy obliczonej sile rysującejbottom / dolne-10°-132-105-1Odkształcenia przy obliczonej sile rysującejbottom / dolne-10°-132-105-1Failure force Siła niszczącacalculated / obliczonakN851.5851.585	279.5	240.8				
1	Cracking force	actual / rzeczyw	vista	KIN	279.3	349.1	325.0	288.9
	Siła rysująca	ratio actual to calculated stosunek wartości rzeczywistej do obliczonej		_	1.03	1.25	1.16	1.20
		at the calculated cracking force ca				7.	30	
2	Deflection	przy obliczonej sile rysującej	measured / zmierzone		6.98	6.95	6.76	5.42
2	Ugięcie	total in cycle II / całkowite w cyklu II		IIIII	13.94	8.80	7.73	7.43
		permanent in cycle II / trv	vałe w cyklu II	-	0.98	0.19	on / Oznaczeniu B4 5 279.5 1 325.0 1.16 7.30 6.76 7.73 0.17 6 5 851.5 4 952.7 1.12 6 6 105.24 2 268.66 -1141	0.15
2	Strain at	the calculated cracking force	upper / górne	$\begin{array}{ c c c c c c c c } \hline Beam designation / 02nac2eme berki \\ \hline B2 & B3 & B4 & B5 \\ \hline B2 & 279.5 & 279.5 & 240.8 \\ \hline 279.3 & 349.1 & 325.0 & 288.9 \\ \hline - & 1.03 & 1.25 & 1.16 & 1.20 \\ \hline & - & 1.03 & 1.25 & 1.16 & 1.20 \\ \hline & & & & & & & & & & & & & & & & & &$	-104			
3	Odkształce	nia przy obliczonej sile rysującej	bottom / dolne	·10-0	+223	+257	+225	+214
		calculated / oblig	czona	1-N	851.5	851.5	on / Oznaczenie B4 5 279.5 2 1 325.0 2 5 1.16 2 7.30 2 3 5 6.76 3 6 7.73 2 7 +225 - 5 851.5 8 4 952.7 9 4 1.12 3 6 105.24 9 92 268.66 3 1 -1141 -	851.5
4	Failure force	actual / rzeczyw	vista	KIN	936.6	974.4		974.7
-	Siła niszcząca	ratio actual to calo stosunek wartości rzeczywis	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $					
_	Deflection	$\frac{1}{1.10} = \frac{1}{1.10} + \frac{1}{1.12} + 1$	94.37					
5	Ugięcie	maximum / maks	ymalne	mm	307.30	344.92	on / Oznaczenia B4 5 279.5 1 325.0 1.16 7.30 6.76 7.73 0.17 5 851.5 4 952.7 1.12 6 105.24 2 268.66	305.82
6	Strain Odkszta	in the compressed zone at the calcula ¿cenia w strefie ściskanej przy obliczo	ted failure force nej sile niszczącej	·10 ⁻⁶	-1144	-991	-1141	-1145

Table 8. Res	ults of testing (1	o cracking an	nd to failure)	of beams with	concrete	e deck
Tablica 8. W	yniki badania d	o zarysowania	a i do zniszcz	zenia belek z p	ołytą zesj	ooloną





Rys. 6. Wykres zależności ugięcia od siły w czasie badania do zarysowania belki B2

Badania prefabrykatów z płytą zespoloną do zarysowania wykazały, że szt.wność belek jest nieco większa od teoretycznej, a różnice wieku i warunków składowania nie spowodowały istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi belkami.







When precast elements with concrete decks were tested to cracking, the results indicated that beam stiffness was slightly greater than the theoretical value; differences in age and storage conditions did not entail significant differences between individual beams. Zarysowanie belki B2 badanej bezpośrednio po osiągnięciu dojrzałości betonu nastąpiło przy sile 279,3 kN, która była zaledwie o 3% większa od wartości obliczeniowej siły rysującej. Pozostałe trzy belki składowane wcześniej na poligonie zarysowały się przy siłach większych od obliczeniowych o średnio 20%, co może wynikać z różnic w parametrach procesów reologicznych przyjętych w obliczeniach i zaistniałych w rzeczywistości. Odkształcenia wszystkich belek były na zbliżonych poziomach w odniesieniu do obliczeniowej siły rysującej. Podobnie jak w przypadku belek bez płyty zespolonej, pozostałości trwałe ugięć były mniejsze w belkach składowanych wcześniej na poligonie. Maksymalne ugięcie trwałe zarejestrowano w przypadku belki B2 – w drugim cyklu wyniosło ono 7% ugięcia całkowitego.

Badania belek do zniszczenia wykazały zbliżone wartości sił niszczących w przypadku każdej z belek. Ugięcia przy sile niszczącej obliczeniowej były największe w przypadku belki B2; belki składowane na poligonie miały ugięcia mniejsze o ponad 25%. W zakresie ugięć maksymalnych nie stwierdzono już takiej zależności; zmierzone wartości tych ugięć mieściły się w zakresie od 268 mm do 345 mm. Na poziomie obliczeniowej siły niszczącej odkształcenia w strefie ściskanej belek niewiele różniły się od siebie i odpowiadały naprężeniom wynoszącym około 45 MPa.

Belki w końcowej fazie cyklu prowadzonego do zniszczenia wykazywały zarysowania praktycznie na całej długości, a część zarysowań obejmowała również płytę zespoloną. Zniszczenie belek następowało w wyniku zmiażdżenia betonu w górnej strefie płyty zespolonej, przy odkształceniach w betonie odpowiadających naprężeniom blisko 60 MPa. Typowy wygląd belki po zniszczeniu pokazano na Rys. 8.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeglądu dostępnych publikacji oraz przebiegu przeprowadzonych badań i analizy ich wyników można sformułować następujące wnioski:

 Kruszywo węglanowe z kopalni w Sitkówce koło Kielc charakteryzuje się właściwościami, które spełniają ogólnie przyjęte normy dla kruszyw do betonów konstrukcyjnych. Wbrew utartym stereotypom kruszywa węglanowe są różne; w zależności od składu chemicznego oraz okresu geologicznego formowania skał mogą stanowić pełnowartościowy materiał budowlany. Beam B2, tested directly after concrete had cured, cracked at the force of 279.3 kN, which was greater by only 3% than the calculated cracking force. The remaining three beams, which had been stored in field, cracked at forces greater by 20% (on average) than the calculated values of cracking forces. This might have been caused by potential differences between actual rheological parameters and those assumed in the calculations. Strains in all the beams were at similar levels in relation to the calculated cracking force. As was the case with beams without concrete deck, permanent deflections were lower for elements that had been stored in field. The maximum value of permanent deflection was registered for beam B2 – in the second cycle it equaled 7% of the total deflection.

Testing to failure indicated similar values of failure forces for all beams. Deflections at the calculated failure force were greatest in the case of beam B2; beams that had been stored in field displayed deflections lower by more than 25%. When maximum deflections were analyzed, no such relationship was noted; the measured deflection values ranged from 268 mm to 345 mm. Strains in the compressed zones of beams at the calculated failure force differed only slightly and corresponded to stress of about 45 MPa.

In the final phase of the load cycle conducted up to the point of failure, beams displayed cracks practically along their entire length, with some cracks visible also in the concrete deck. Failure occurred due to crushing in the upper zone of the concrete deck, at strains corresponding to stress of nearly 60 MPa. Typical view of a failed beam is shown in Fig. 8.



Fig. 8. Typical view of a failed beam Rys. 8. Typowy wygląd belki po zniszczeniu

- 2. Prawidłowo zaprojektowana mieszanka betonowa z pełnowartościowego kruszywa węglanowego pozwala na wykonywanie betonów wysokiej wytrzymałości, spełniających również wymagania w zakresie parametrów wpływających na jego trwałość, takich jak nasiąkliwość, mrozoodporność i wodoprzepuszczalność. Beton ten charakteryzuje się również wysokim modułem sprężystości, który odpowiada założeniom normowym stosowanym w projektowaniu. Przyrost wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz wartości modułu sprężystości następuje szybko, przy wyraźnej korelacji tych parametrów. Oczekiwane wartości są osiągane praktycznie w ciągu 7-14 dni od zaformowania, a w późniejszym czasie pozostają na zbliżonym poziomie.
- 3. Na podstawie wyników badań długotrwałych można stwierdzić, że belki z kruszywa węglanowego zachowują się prawidłowo. Zarówno poddane obciążeniom stałym, jak również składowane bez obciążenia, wykazują stosunkowo małe efekty procesów reologicznych, na co wskazuje niezbyt duży przyrost strzałek odwrotnych w czasie oraz wartości rzeczywistych sił rysujących większe, niż wynika to z wykonanych obliczeń dla założonych teoretycznie strat reologicznych. Doświadczenia z produkcji belek tego typu wykonanych z innych betonów wykazują, że przyrosty strzałek odwrotnych osiągają po kilku miesiącach nawet ponad 100% wartości strzałki pierwotnej. W analizowanym przypadku przyrost strzałek odwrotnych belek po okresie prawie pół roku składowania nie przekroczył 30%. W przypadku belek poddanych długotrwałemu obciążeniu przyrost ugięcia belek po przyłożeniu siły następował w krótkim czasie, wynoszącym około 20 dni, po czym ulegał zatrzymaniu. Po zdjęciu obciążenia nie stwierdzono pozostałości trwałych ugięć. Podczas badań poligonowych nie stwierdzono widocznych objawów reakcji kruszywa z alkaliami zawartymi w cemencie. Okres badań był oczywiście stosunkowo krótki, ale – jak pokazują doświadczenia ze stosowania tego kruszywa w mostowych konstrukcjach żelbetowych - w obserwowanych dotychczas obiektach zjawisko to nie występuje.
- 4. Badania wytrzymałościowe belek wykazały dużą zgodność z założeniami projektowymi, zarówno w przypadku badań doraźnych, jak i badań po wielomiesięcznym składowaniu prefabrykatów pod wpływem różnych oddziaływań.

5. CONCLUSIONS

Based on the review of available literature, the performed tests and the analysis of the obtained results, the following conclusions may be formulated:

- 1. Properties of carbonate aggregate from Sitkówka near Kielce meet the generally accepted standards for aggregates used in structural concrete. Contrary to popular stereotypes, there are various carbonate aggregates; depending on their chemical composition and geologic period of rock formation, they may serve as fully usable construction material.
- 2. Properly designed concrete mixture with appropriate carbonate aggregate enables one to obtain high-strength concretes that also meet other requirements pertaining to water absorption, frost resistance and water permeability. Such concrete is also characterized by high modulus of elasticity, meeting the standard assumptions used in design. Compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity increase at a high rate and are clearly correlated with each other. The expected values are reached practically within 7-14 days after casting; they remain on similar levels later on.
- 3. Results of the long-term tests indicate good performance of beams containing carbonate aggregate. Both under long-term static loads and under self-weight only, they display relatively low rheological effects, as indicated by relatively low increase in camber over time and the observed actual cracking forces greater than the calculated cracking forces based on theoretical rheological losses. Previous experience from production of such beams using different concretes indicated that after several months cambers could increase by over 100% of the initial value. In the analyzed case, the relative increase in camber after almost a half year of storage did not exceed 30%. In the case of beams subjected to long-term loading, the increase in deflection progressed quickly after placement of loads (within the first 20 days) and then stopped. No permanent deflection was noted after removal of the long-term load. No visible signs of alkali-aggregate reaction were observed during the field tests. While the testing period was relatively short, experience from usage of similar aggregate in reinforced concrete bridge structures shows that this reaction has not yet occurred in the monitored structures.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- Poitevin P.: Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. Cement and Concrete Composites, 21, 2, 1999, 89-97, DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00047-X
- [2] Carlos A., Masumi I., Hiroaki M., Maki M., Takahisa O.: The effects of limestone aggregate on concrete properties. Construction and Building Materials, 24, 12, 2010, 2363-2368, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008
- [3] *Willet J.C.*: 2018 Minerals Yearbook. Stone, Crushed [Advance Release]. US Geological Survey, 2022
- [4] Owsiak Z.: Korozja wewnętrzna betonu. Monografie, Studia, Rozprawy, M66,. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2015
- [5] Fournier B., Bérubé M.A.: Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. Canadian Journal of Civil Engineering, 27, 2, 2000, 167-191, DOI: 10.1139/199-072
- [6] Wehbe N., Sigl A., Gutzmer Z., Stripling C.: Structural performance of prestressed SCC bridge girders made with limestone aggregates. Research Report No. MPC-08-196, South Dakota State University, 2009
- [7] Wehbe N., Stripling C.: Experimental assessment of flexural strength and serviceability of prestressed SCC bridge I-girders with composite decks. KSCE Journal of Civil Engineering, 17, 3, 2013, 540-549, DOI: 10.1007/s12205-013-0605-5
- [8] Brandes M.R., Kurama Y.C.: Behavior of shear-critical prestressed concrete beams with recycled concrete aggregates under ultimate loads. Engineering Structures, 165, 2018, 237-246, DOI: 10.1139/199-072
- [9] Małolepszy J., Gajewski R.: Skały węglanowe jako cenne źródło kruszyw do betonu. Budownictwo, Technologie, Architektura, 2, 2008, 64-69

- 4. Strength testing of beams indicated good agreement with the values assumed in the design, both in the case of tests performed directly after curing and after several months of storage under various conditions.
- [10] Wawrzeńczyk J.: Zastosowanie kruszywa wapiennego do produkcji betonów konstrukcyjnych. Konferencja Dni Betonu, Wisła, 2014
- [11] Prefabrykowane belki strunobetonowe typu "T". Przedsiębiorstwo Robót Mostowych "Mosty-Łódź" S.A., Łódź, 2010
- [12] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu
- [13] Opinia na temat możliwości stosowania kruszyw z Zakładu Sitkówka (wapień dewoński) do produkcji betonów wykorzystywanych w inżynierii komunikacyjnej. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2015
- [14] PN-S-10040:1999 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania
- [15] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [16] Brunarski L.: Kryteria zgodności wytrzymałości charakterystycznych materiałów budowlanych w normach PN-EN-ISO. Prace ITB-Kwartalnik, 4, 2002, 15-41
- [17] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [18] Cieśla J., Biskup M., Skawiński M.: Experimental analysis of stiffness of pre-tensioned concrete bridge beams. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 8, 1, 2009, 13-39