

Analiza możliwości zastosowania betonu z proszków reaktywnych w konstrukcji mostowej

The analyse of the reactive powders concrete application possibility in a bridge structure

Słowa kluczowe: beton z proszków reaktywnych, Ductal, kładaka, konstrukcja kładki, beton ultra wysokowartościowy

Keywords: reactive powders concrete, ultra high performance concrete, Ductal, footbridge, construction of footbridge

1. Wprowadzenie

Beton ultra wysokowartościowy [BUWW], który należy do betonów z proszków reaktywnych [BPR]. To kompozyt cementowy wzmocniony włóknami stalowymi, zastosowanymi w ilości około 3% objętościowych, złożony z cementu portlandzkiego w ilości około 1000 kg/m³, pyłu krzemionkowego – 200 do 300 kg/m³, wypełniaczy mineralnych, pyłu i piasku kwarcowego. Beton ten ma bardzo mały stosunek wodno-cementowy, uzyskiwany za pomocą superplastyfikatorów na bazie polikarboksylanów (1, 2).

Modyfikacja mikrostruktury matrycy cementowej umożliwiającą zmniejszenie jej porowatości, jest podstawą rozwoju technologii wysokowartościowych kompozytów cementowych. Wiąże się ona z otrzymaniem maksymalnego upakowania cząstek w zaczynie, minimalną objętością porów oraz mikronowymi odległościami między ziarnami. Ponadto BPR nie zawiera kruszywa grubego co zwiększa jego plastyczność, ponieważ nie jest ograniczony szkieletem z kruszywa. Poprawa wiązności matrycy poprzez stosowanie proszków o uzupełniającym się rozkładzie wielkości ziaren oraz pyłów krzemionkowych, kilkakrotnie zmniejsza porowatość warstwy przejściowej zaczynu z ziarnami piasku. W konsekwencji przekazywanie naprężeń między zaczynem a piaskiem ulega poprawie (3).

Betony z proszków reaktywnych osiągają znaczną wytrzymałość na ściskanie, przekraczającą 150 MPa, w warunkach normalnych. Jest to możliwe dzięki jednorodnej mikrostrukturze o bardzo małej porowatości, wynoszącej na przykład 1,7 %, w której sporadycznie występują pory o rozmiarach mikrometrycznych (4, 5). Klasyfikację betonów ze względu na wytrzymałość na ściskanie podano w tablicy 1 (6).

Wytrzymałość kompozytów BUWW zależy w dużym stopniu od fazy C-S-H. Faza ta w zaczynie cementowym tworzy więźbę nanocząstek, a wiązania między nimi są wynikiem sił van der Waalsa oraz wiązań jonowych, wynikających z obecności jonów

1. Introduction

Ultra-High-Performance Concrete [UHPC], which includes Reactive Powder Concrete [RPC], is a generation of steel fibre reinforced material, made of Portland cement, silica fume, mineral additives, quartz powder and sand. Such a concrete is characterized by an extremely low water-cement ratio, obtained with the admixture, of the latest generation, of superplasticizers based on polycarboxylates (1,2).

Modification of the cement matrix microstructure to reduce its porosity is the basis for the development of high-performance cement composites. It involves obtaining the maximum packing of particles in the cement matrix, the minimum pore volume and the elimination of the macroscopic grain spacing. By elimination of coarse aggregate from concrete with reactive powders and good sand bond with the cement matrix, when shrinkage occurs, the matrix can shrink freely, because it is not limited by the skeleton of the coarse aggregate. The improvement of grain size by using powders with complementary grain size distribution and silica dust, eliminates the presence of interfacial transition zone between sand particles and cement matrix. Consequently, the transfer of stresses between paste and sand is improved (3).

RPCs have a high compressive strength – above 150 MPa, under normal conditions, due to a homogeneous microstructure with a very small porosity, for example, 1.7%, in which the micrometer pores occur sporadically (4, 5). The classification of concretes due to compressive strength is given in Table 1 (6).

The strength parameters of UPHC are largely related to the C-S-H phase. This phase in the cement paste forms a network of nanoparticles, and the interactions between them are the result of van der Waals forces and ionic bonds caused by the content of calcium ions (7). The cement paste has a small viscoelastic range, in which it can undergo the strains under the inner and outer stresses. The example of inner strains is the expansion caused by ettringite

Beton / Concrete	Skrót ang. English abbreviation	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] The compressive strength [MPa]
Beton Ultra Wysoko Wartościowy / Ultra High Performance Concrete	UHPC/UBWW	≥150
Beton Wysoko Wartościowy / Very High Performance Concrete	VHPC/BWW	100+150
High Performance Concrete	HPC/BWW	60+100
Beton zwykły / Ordinary Concrete	C	≤60

wapnia (7). Zaczyn cementowy wykazuje mały zakres plastyczny, w którym może ulegać odkształceniom pod wpływem naprężeń wewnętrznych i zewnętrznych. Przykładem odkształceń wewnętrznych jest rozszerzalność spowodowana ekspansją wywołaną powstawaniem ettringitu i jego krystalizacja w tym okresie nie powoduje spękań. Powstawanie C-S-H rozpoczyna się od hydrolizy alitu, który jest, po glinianie trójwapniowym, najszybciej reagującą fazą klinkierową. Jako wzorzec postępu hydratacji przyjmuje się zmiany składu fazowego zaczynu zaproponowane przez Lochera i Richartza (8) na Kongresie w Moskwie. Jak wykazał Powers (26) 326 faza C-S-H, nazwana przez niego żelem, decyduje o wytrzymałości zaczynu, przy czym jej wytrzymałość oceniał na 235 MPa.

Na szczególną uwagę zasługuje rola włókien w betonach UBWW, dzięki którym wytrzymałość na rozciąganie elementu kompozytowego znacznie wzrasta (9). Zwiększeniu ulega też udarność, czyli wytrzymałość na obciążenia zmęczeniowe. Odporność zmęczeniowa jest większa w związku z ograniczaniem przez włókna propagacji rys, w konstrukcjach obciążonych dużymi siłami dynamicznymi.

Zastosowanie włókien stalowych w matrycy betonowej zwiększa odporność na powstawanie rys, ogranicza ich propagację, a więc wpływa korzystnie na wytrzymałość dojrzałego betonu (9). Dzięki oddziaływaniu włókien, powstawanie rys skurczowych w fazie wiązania betonu zostaje ograniczona (9). Rodzaj włókien, a szczególnie ich kształt i długość, ma duży wpływ na właściwości reologiczne mieszanki betonowej. Po związaniu betonu włókna stalowe przeciwstawiają się naprężeniom rozciągającym i powstawaniu rys, w procesie deformacji betonu pod obciążeniem, a tarciem między włóknami i matrycą po utracie przyczepności. W momencie zerwania zespolenia między włóknem a matrycą cementową następuje tylko nieznaczny spadek siły przenoszonej przez włókno, a różnica zostaje przyjęta przez sąsiednie włókna (9).

Izotropowe kompozyty cementowe z włóknami stalowymi, a szczególnie zagadnienie rozmieszczenia tych włókien w matrycy cementowej, były przedmiotem badań wielu autorów (10-12). Wyniki dotychczasowych badań doświadczalnych, świadczą o tym, że włókna stalowe odgrywają dużą rolę w kształtowaniu wytrzymałości BUWW. O tych właściwościach decyduje głównie geometria włókien i ich udział objętościowy w mieszance betonowej. Zwiększenie długości włókien, modyfikacja ich kształtu oraz zwiększenie udziału włókien w objętości mieszanki, ma korzystny

wpływ na wytrzymałość, ale jego krystalizacja w tym okresie nie jest przyczyną jego odkształceń. Powstawanie C-S-H rozpoczyna się od hydrolizy alitu, który jest, po glinianie trójwapniowym, najszybciej reagującą fazą klinkierową. Jako wzorzec postępu hydratacji przyjmuje się zmiany składu fazowego zaczynu zaproponowane przez Lochera i Richartza (8) na Kongresie w Moskwie. Jak wykazał Powers (26) 326 faza C-S-H, nazwana przez niego żelem, decyduje o wytrzymałości zaczynu, przy czym jej wytrzymałość oceniał na 235 MPa.

Particularly noteworthy is the role of fibers in UHPC concrete, thanks to which the compressive and tensile strength of a composite element increases significantly (9). Impact resistance is also increased, like resistance to fatigue loads. Fatigue resistance is higher due to the ability of the fiber to reduce cracks propagation, in structures loaded with high dynamic forces. Steel fibers are required to act as the primary load bearing component, but above all to provide structural integrity (8).

The use of steel fibers in a concrete matrix increases the cracking resistance, reduces the propagation of micro-cracks, has a favorable effect on the final value of the mature concrete compressive strength. Due to the addition of fibers, the formation of shrinkage cracks in the concrete is dispersed, and their size is drastically reduced. The type of fibers, and especially their shape and length, significantly affect the rheological properties of the concrete. After setting of concrete, the steel fibers are opposing to the tensile stress and crack formation in the concrete deformation process under load, until the concrete structure is completely destroyed. This is due to the friction between the fibers and cement matrix. At the moment of breaking the bond between the fiber and the matrix, there is only a slight decrease in the force transmitted by the fiber, and the difference is taken by the neighboring fibers (9).

Isotropic cement composites with steel fibers, especially the problem of the distribution of these fibers in the cement matrix, are the subject of research by many authors (10-12). The results of previous experimental studies show that steel fibers play an important role in shaping the UHPC strength characteristics. These properties are mainly determined by the fiber geometry and their volume fraction in the concrete mixture. Increasing the length of fibers and modifying their shape and increasing the percentage of fibers in the volume of the mix has a positive effect on the fatigue strength of UHPC. The presence of fibers in UHPC blends affects

wpływ na wytrzymałość zmęczeniową BUWW. Ponadto dodatek włókien w mieszankach BUWW wpływa na ich właściwości reologiczne. Zwiększenie udziału objętościowego włókien powoduje wzrost granicy płynięcia (20). Natomiast zakres zmian lepkości plastycznej, spowodowany zmianami zawartości włókien, zależy od właściwości mieszanki betonowej oraz od długości włókien (20,25).

Z badań Yoo i Banthia (11) wynika, że w przypadku BUWW korzystniejsze od stalowych włókien prostych są włókna skręcone lub odgięte na końcach, szczególnie w zwiększeniu wytrzymałości na rozciąganie, lecz także na ściskanie, a szczególnie na rozciąganie oraz zmniejszenia odkształceń w betonie. Rigaud i in. (13) analizowali właściwości betonów z proszków reaktywnych, zawierających włókna szklane, określając zależność wytrzymałości na rozciąganie i naprężeń w betonie zarysowanym, a także bez rys. Stwierdzili, że kompozyty tego typu wykazują również dobrą odporność na długotrwałe, cykliczne obciążenia. Ważne znaczenie włókien ma przenoszenie obciążeń po pęknięciu matrycy (25). Jeżeli udział włókien w kompozycie przekracza zawartość krytyczną, to uzyskuje się wielokrotne pękanie matrycy (25).

Wykazano, że zastosowanie w praktyce BUWW zmniejsza masę własną elementów konstrukcyjnych o 30%, a nawet o 50% w stosunku do profili konstrukcyjnych z betonu tradycyjnego, w tych samych warunkach obciążenia. Projektowanie trwałych, lekkich, kompozytowych płyt pomostowych z BUWW w budowlach mostowych, wykorzystanie tych betonów, jako tworzywo konstrukcyjne mostowych elementów nośnych oraz związane z wzmocnieniami obiektów mostowych, to wciąż rozwojowe zagadnienia badawcze (12, 14).

W niniejszej pracy podjęto próbę przedstawienia możliwości zastosowania betonu z proszków reaktywnych w budowlach mostowych. W realizacji tego przedsięwzięcia wykorzystano wyniki badań BPR, potwierdzające możliwość uzyskania właściwości technicznych tworzywa konstrukcyjnego. Nakreślono kierunki dalszych badań laboratoryjnych, których celem jest potwierdzenie przydatności betonów z proszków reaktywnych w budowaniu mostów. Praca zawiera projekt modułowej kładki dla pieszych z wykorzystaniem betonu z proszków reaktywnych, zbrojonego włóknami stalowymi. W pracy przeanalizowano wariant wielomodułowej konstrukcji kładki dla pieszych, z dźwigarem nośnym kratownicowym. Pas górny konstrukcji stanowią dwie belki betonowe z BPR, połączone z płytą pomostu także z BPR. Pas dolny to pojedynczy pręt o przekroju kołowym, również wykonany z BPR, natomiast krzyżulce wykonane są z rur okrągłych, ze stali nierdzewnej.

2. Wybrane realizacje mostowe z BPR

Beton z proszków reaktywnych to nowoczesny materiał konstrukcyjny dający duże możliwości w projektowaniu mostowych konstrukcji betonowych, kształtem zbliżonych do ortotropowych konstrukcji stalowych [rysunki 1 i 2]. Podane przykłady konstrukcji mostowych pokazują, że właściwe dla tego materiału rozwiązania konstrukcyjne to z jednej strony różnego rodzaju ustroje

their rheological properties. An increase in the volume fraction of fibers results in an increase in the yield point of concrete mixture. However, the range of changes in plastic viscosity due to changes in the fiber content depends on the properties of the concrete mixture and the length of the fibers.

Yoo and Banthia (10) have found that in the case of BHPc from the straight steel fibres more advantageous are the curled fibres or with bend ends, particularly in the increasing of the tension strength and increasing of the concrete strains. Rigaud et al. (13) the properties of concrete form reactive powders with glass fibres have analyzed, particularly the bending strength of the concrete containing cracks, measuring the relation of bending strength and stresses. They found that this type of composites the good resistance to long and cyclic load have shown. The important properties of fibres is the transfer of load after the matrix cracking (25). If the fibres share in the composite is higher than the critical value, the multiple matrix cracking is obtained (25).

The research shows (10) that in UHPC, twisted or bent fibers at the ends prove to be more favorable than steel straight fibers in terms of increasing compressive and tensile strength, significant changes in bending strength and reduction of stress and strain values in concrete is also assured. Rigaud et al. (13) analyzed the behaviour of concretes of reactive powders containing other than steel fibers, for example glass fibers, determining the dependence of tensile strength and stresses in cracked and non-cracked concrete. Composites of described type also show low sensitivity, susceptibility to prolonged, cyclic loading.

It has been shown that the use of Ultra-High-Performance Concretes in practice leads to the reduction of the own mass of structural elements to $\frac{1}{3}$ or $\frac{1}{2}$ of the own mass of structural profiles from traditional concrete, analyzed under the same load. Design of durable, light UHPC decks for bridge structures, the use of these concretes as the structural material of bridge bearing elements and applications related to reinforcements of bridge structures are still progressive research topics (12, 14).

This paper attempts to present the possibility of reactive powders concrete application in the bridge structures. The results of RPC concrete tests of this application, the expected technical parameters of this construction composite were confirming. The horizons of future laboratory tests have been outlined, which aim is to confirm the versatile suitability of reactive powders concrete in bridge applications. The work includes a modular pedestrian bridge design using concrete made of reactive powders, reinforced with steel fibers. The work analyzed the variant of the multi-module structure of the footbridge with a truss carrying girder. The top stripe of the structure is made up of two RPC concrete beams, combined with a bridge deck, also with RPC. The lower belt is a single rod with a circular cross section, also made of RPC concrete, while the crossbars are made of round stainless steel pipes.

kratownicowe, z drugiej konstrukcje wykorzystujące zakrzywienie powierzchni płaskich, w celu stworzenia przekroju zamkniętego lub pokrewnego do niego, tak aby zwiększyć sztywność ustroju (15-17).

Przykładem obiektu zrealizowanego z BPR jest kładka pieszo-rowerowa w Sherbrooke w Kanadzie z roku 1997 [rysunek 1]. Jego całkowita długość wynosi 120 m i składa się z 5 przęseł, z których 2 środkowe o długości 60 m wykonane zostały z wykorzystaniem betonu ultra wysokiej wytrzymałości. Konstrukcja nośna kładki to dźwigar kratownicowy o przekroju skrzynkowym wysokości 3 m, a szerokości 3,3 m. Pas górny dźwigara stanowi płyta o grubości zaledwie 3 cm, usztywniona poprzecznikami i podłużnicami. Pas dolny stanowią dwie belki o przekroju 32 x 38 cm. Krzyżulce wykonane są ze stali nierdzewnej o przekroju \varnothing 150 mm wypełnione w środku BPR. Dźwigar składa się z segmentów scalonych kablami sprężającymi umieszczonymi w pasach górnych, dolnych oraz sprężeniem zewnętrznym. Obiekt ten jest pierwszym na świecie mostem dla pieszych, w którym zastosowano beton z proszków reaktywnych (15).

Innym przykładem wykorzystania betonu wysokiej wytrzymałości jest budowla mostowa w Kassel, w Niemczech, zrealizowana w 2007 roku [rysunek 2]. Jego długość wynosi 136 metrów i składa się z 7 przęseł, z których najdłuższe ma 36 m. Ustrój nośny stanowi dźwigar kratowy, o zmiennej wysokości. Pasy górne wykonane są w technologii BUWW, natomiast pas dolny i krzyżulce ze stali nierdzewnej. Płyta górna ma grubość 8-9 cm i połączona jest z pasem górnym kratownicy poprzez sklejenie żywicami epoksydowymi (16, 17).

W konstrukcji zespolonej stalowo-betonowej Texel Footbridge w Holandii (18) dwa stalowe dźwigary główne, o zmiennej wysokości i rozpiętości około 17 m, połączono z modułami prefabrykowanej płyty UBWW o grubości 8,5 cm. Wymiary poszczególnych modułów kompozytowej płyty betonowej wynoszą 2,9 x 1,5 m [rysunek 3]. Jest to przykład typowej konstrukcji zespolonej o małej rozpiętości przęsła, ale z nowoczesną płytą z BPR o zmniejszonej wysokości konstrukcyjnej, w stosunku do tradycyjnych rozwiązań.



Rys. 1. Kładka pieszo-rowerowa w Sherbrooke w Kanadzie (15)

Fig. 1. Pedestrian and bicycle bridge in Sherbrooke, Canada (15)

2. Selected bridge structures from UHPC

Reactive powders concrete is a modern construction material that gives great possibilities in the design of bridge constructions, with a shape similar to the orthotropic steel constructions [Figs. 1, 2]. The examples of existing bridge constructions given image that the construction solutions appropriate for this material are on the one hand different truss structures, on the other constructions using a flat surface curvature in order to create a closed or related section to increase the stiffness of the system (15-17).

An example of an object made of RPC is a footbridge in Sherbrooke, Canada in 1997 (Fig. 1). The total length of this footbridge is 120 m and consists of 5 spans, of which the two middle, 60 m long, was made using ultra high performance concrete. The supporting structure of the footbridge is a truss girder with a box section height of 3 m and a width of 3.3 m. The upper belt of the girder is a slab with a thickness of only 3 cm stiffened with crossbars and stringers. The lower belt consists of two beams with a cross section of 32x38 cm. The crossheads are made of stainless steel with a cross-section of \varnothing 150 mm, filled in the middle with the RPC. The girder consists of integrated segments with prestressed cables placed in the upper and lower belts and external compression. This object is the first pedestrian bridge in the world constructed of the reactive powders concrete (15).

Another example of the use of high-strength concrete is the bridge structure in Kassel, Germany, completed in 2007 (Fig. 2). The length of the crossing is 136 meters and consists of 7 spans, the longest of which is 36 m. The supporting structure is a lattice girder with variable height. The upper belts are made in Ultra-High-Performance Concrete technology, while the lower belts and steel bows from stainless. The upper plate has a thickness of 8-9 cm and is connected to the upper strip of the truss by bonding with epoxy resins (16, 17).

In the composite steel and concrete structure of Texel Footbridge (18), two steel main girders, varying in height and span of about 17



Rys. 2. Kładka w Kassel, Niemcy (17)

Fig. 2. Footbridge in Kassel, Germany (17)



Rys. 3. Holenderska kładka dla pieszych w Texel, w Holandii (18)

Fig. 3. Texel Footbridge from Holland (18)

Podstawową zaletą tworzywa z BPR jest duża wytrzymałość przy małej masie objętościowej, jest też niestety jego wadą. Chodzi tu o potencjalne zagrożenie dla lekkich konstrukcji drganiami wzbudzonymi przez pieszych lub wiatr (19). W tym przypadku należy skoncentrować uwagę na ukształtowaniu konstrukcji maksymalnie sztywnej, gdyż tłumienie drgań, w dużym uproszczeniu, zależy od sztywności konstrukcji, a nie jej masy własnej. Z uwagi na wytrzymałość na rozciąganie i możliwości montażowe, większe konstrukcje, bądź elementy z betonu z proszków reaktywnych zbrojonych włóknami, wymagają dodatkowego sprężenia.

3. Właściwości betonu z proszków reaktywnych, zastosowanego w konstrukcji mostowej

W projekcie prototypowej kładki modułowej wykorzystano beton z proszków reaktywnych, zaprojektowany i wykonany w Laboratorium Materiałów Budowlanych Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Opolskiej. Wyniki badań tego betonu zostały zaprezentowane w pracy Grzeszczyk i in. (20).

3.1. Skład mieszanki z BPR

Do przygotowania betonu BPR stosowano cement portlandzki CEM I 52,5 R, pył krzemionkowy, mączkę i piasek kwarcowy, włókna stalowe o długości 12 mm i średnicy 0,2 mm. Skład zaprojektowanego betonu z proszków reaktywnych opisano szczegółowo w ramach przytoczonej już pracy (20), a następnie zbadano mikrostrukturę otrzymanego kompozytu. Poszczególne składniki mieszanki podano w tabelicy 2.

3.2. Wytrzymałość BPR

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie próbek betonu z proszków reaktywnych zamieszczono w tabelicy 3.

Wytrzymałość na ściskanie betonu z proszków reaktywnych już po dwóch dniach dojrzewania osiąga 145 MPa, natomiast po 28 dniach około 200 MPa. Także wytrzymałość na zginanie jest bardzo

m, were combined with UHPC prefabricate deck, with a thickness of 8.5 cm. The dimensions of the individual modules of the composite concrete deck are 2.9 x 1.5 m [Fig. 3]. This is an example of a typical composite construction with a small span length, but with a modern RPC bridge deck with a reduced construction height, compared to the traditional solutions.

The basic advantage of this RPC material - high strength at low volumetric mass, is also its disadvantage. This is a potential threat to light constructions with vibrations triggered by human-induced exaltation or wind (19). In this case, attention should be focused on the construction of the maximum rigid structure, because the damping of the vibrations, in a great simplification depends on the stiffness of the structure, not its own mass. For reasons of tensile strength and assembly possibilities, long spans of bridge structures or concrete elements made of RPC reinforced with fibers require additional prestressed system.

3. Characteristics of reactive powders concrete used in the bridge structure

The prototype modular footbridge design uses reactive powders concrete [RPC] designed and made at the Building Materials Laboratory of the Department of Building Materials Engineering at the Opole University of Technology. The results of testing concrete are presented in paper of Grzeszczyk et al. (20).

3.1. The composition of the RPC mixture

RPC Portland Cement 52.5 R, silica fume, quartz powder and sand, steel fibers with a length of 12 mm and a diameter of 0.2 mm were used to prepare RPC concrete. The quantitative and qualitative composition of the designed concrete from reactive powders is described in detail in the framework of the above-mentioned work (20), and then the microstructure of the obtained composite was analyzed therein. The individual components of the RPC mixture are shown in Table 2.

dobra i po 28 dniach przekracza 50 MPa. Uzyskana wytrzymałość stwarza korzystne perspektywy z punktu widzenia zastosowań mostowych.

3.3. Moduł E

Statyczny, sieczny moduł sprężystości (E) oznaczono na walcu $h = 300$ mm oraz $d = 150$ mm, zgodnie z normą PN-EN 12390-13 metoda A. Oznaczono wartość początkową modułu, która wynosi 42,5 GPa, natomiast po trzech cyklach obciążenia wartość modułu E wyniosła 43,8 GPa.

3.4. Porowatość BPR

Wyniki badań porowatości całkowitej oraz udziału objętościowego porów w betonach, oznaczonych metodą porozymetrii rtęciowej (20), wykazały, że całkowita zawartość objętościowa porów w próbkach betonów stopniowo zmniejsza się z upływem czasu, z wyjściowej 10,9 %, po dwóch dniach dojrzewania, do 4,4 %, po 28 dniach hydratacji. Zmniejszenie udziału porów większych, a wzrost małych mezoporów korzystnie wpływa na wytrzymałość i trwałość betonu. Jak wiadomo struktura porów ma duży wpływ na właściwości betonu, przede wszystkim na przepuszczalność oraz na wytrzymałość, a więc w konsekwencji na jego trwałość.

4. Koncepcja konstrukcyjna modułowej kładki dla pieszych

4.1. Podstawy obliczeniowe konstrukcji z betonu z proszków reaktywnych

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe elementów konstrukcyjnych modułowej, prototypowej kładki dla pieszych, poprzedzone były analizą metod obliczeniowych i zaleceń do projektowania konstrukcji z wykorzystaniem elementów z UBWW, zawartych w pracy Gowripalana i Gilberta (21).

Plastyczność przekroju zginanego jest zależna od odkształcenia granicznego i związanego z nim współczynnika położenia osi obojętnej do wysokości efektywnej przekroju k_u . Wysokość efektywna d jest odległością od włókien rozciąganych do wypadkowej siły rozciągającej, która jest efektem zginania oraz ewentualnego sprężenia. Wartość k_u jest więc zależna od stopnia zbrojenia betonu włóknami oraz sprężenia. Dla zapewnienia odpowiedniej plastyczności wartość współczynnika k_u nie powinna być większa od 0,4. Na rysunku 4 przedstawiono rozkład naprężeń i odkształceń w przekroju elementu sprężonego, wykonanego z betonu z proszków reaktywnych, według metody SGN - stanów granicznych nośności. Dla przekroju sprężonego stan graniczny nośności zostaje osiągnięty, gdy odkształcenie włókien ściskanych wynosi 0,0035.

Wytrzymałość na rozciąganie wyznaczana się mnożąc graniczną wytrzymałość przez współczynnik redukcyjny ϕ . Dla przekrojów niespręż-

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANKI RPC (20)

THE COMPOSITION OF THE RPC MIXTURE (20)

Składnik/ Component	Udział masowy/ Mass ratio
Cement/ Cement	1,00
Pył krzemionkowy/ Silica fume	0,20
Mączka kwarcowa/ Quartz powder	0,12
Piasek kwarcowy/ Quartz sand	1,03
Woda/ Water	0,24
Włókna stalowe/ Steel fibres	0,27
Superplastyfikator/ Superplasticizer	0,025
w/c	0,24
w/s	0,20

3.2. The strength of RPC

The results of compressive and flexural tests of concrete samples created by RCP are presented in Table 3.

The compressive strength of RPC after 2 days were 145 MPa and after 28 days the 200 MPa was attained. The flexural strength was also substantially high and exceeds 50 MPa after 28 days. Obtained values of strength parameters are promising in the aspect of bridge applications.

3.3. The module E

The static modulus of elasticity (E) was determined on the cylinder $h = 300$ mm and $d = 150$ mm, according to PN-EN 12390-13 method A. The initial value of the module was determined, which is 42.5 GPa, and after three load cycles the value of the E module was 43.8 GPa.

3.4. RPC porosity

The results of investigations of total porosity and the volume fraction of pores in concrete, determined by mercury porosimetry (20) showed that the total volume of pores in concrete samples gradually decreases over time, from the initial 10.9%, after two days of maturation, to 4.4 %, after 28 days of hydration. The reduction of the proportion of larger pores, and the growth of small mesopores, favorably affects the strength and durability of concrete. As we know, the pore structure has an advantageous impact on the properties of concrete, primarily on permeability and strength, as well as consequently on its durability.

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE I ZGINANIE BPR, MPA (20)

COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF RPC, MPA (20)

Wytrzymałość na ściskanie/ Compressive strength				
24 godz./ 24h	2 dni/ 2 days	7 dni/ 7 days	14 dni/ 14 days	28 dni/ 28 days
96,1	145,4	167,5	184,6	198,3
Wytrzymałość na zginanie/ Flexural strength				
36,2	48,7	50,8	51,9	52,6

zonych, dla których po zarysowaniu rozciąganie przenoszone jest przez włókna stalowe, wartość tego współczynnika wynosi 0,7. Dla przekrojów sprężonych, dla których współczynnik k_u nie jest większy od 0,4, wartość ϕ należy przyjmować jako równą 0,8.

Wartość momentu zginającego przenoszona przez elementy podczas próby łamania jest większa od wartości momentu rysującego. Natomiast, w przypadku betonów zwykłych wartość momentu zginającego jest mniejsza od wartości występującego momentu rysującego. W związku z tym, w przypadku BPR wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu jest większa od naprężenia powodującego zarysowanie. Ponieważ stosunek momentu zginającego do wartości momentu rysującego, dla elementów niezbrojonych wykonanych z UBWW jedynie z dodatkiem włókien, jest zazwyczaj większy od 1,2 nie jest wymagane stosowanie zbrojenia minimalnego na zarysowanie, jak w przypadku tradycyjnych betonów zwykłych.

Wartość współczynnika Poissona dla BPR jest zbliżona do przyjmowanych dla betonów zwykłych i wynosi od 0,16 do 0,24. Jako wartość obliczeniową zaleca się przyjmować 0,2. Gęstość objętościowa betonów z proszków reaktywnych wynosi od 2400 do 2650 kg/m³; dla wykonanego doświadczalnie BPR gęstość objętościowa wynosiła 2570 kg/m³.

Aby uniknąć lokalnego wybożenia smukłych przekrojów, współczynnik efektywnej długości do szerokości półek, w przypadku przekrojów teowych lub średników oraz w przypadku przekrojów prostokątnych, powinien być mniejszy od 25 dla belek swobodnie podpartych. Dla elementów utwierdzonych wartość tego współczynnika powinna być mniejsza od 10.

Podobnie jak dla betonów zwykłych, pełzanie BPR zależy od wieku betonu w chwili przyłożenia obciążenia oraz od czasu trwania i wielkości obciążenia. Ponadto wpływ na pełzanie ma temperatura podczas wiązania i pielęgnacja betonu. Według zaleceń projektowych (21) dla BPR, poddanych obróbce cieplnej, współczynnik pełzania przyjmuje wartość około 0,3, w przypadku obciążenia po 28 dniach. Natomiast, gdy nie jest stosowana obróbka parą pod ciśnieniem podczas wiązania, współczynnik pełzania dla obciążenia przyłożonego po 28 dniach wynosi 1,2.

Odształcenia wywołane skurczem w przypadku BPR wynoszą 5×10^{-4} , jeżeli przez pierwsze dwa dni po betonowaniu stosowana jest obróbka cieplna. Wówczas całe odształcenie skurczowe następuje w pierwszych 48 godzinach. W przypadku, gdy wiązanie przebiega w temperaturze otoczenia, skurcz zachodzi wolniej. Nie jest on rozłożony w czasie tak jak dla betonów zwykłych, w których skurcz spowodowany jest głównie wysychaniem. W BPR skurcz w głównej mierze jest wynikiem reakcji chemicznych, w związku z tym odształcenie wywołane skurczem praktycznie ustaje wraz z ukończeniem twardnienia, po 28 dniach.

Strefa zakotwienia jest obszarem pomiędzy licem belki, a przekrojem w którym rozkład naprężenia spowodowany sprężeniem jest liniowy. Dla elementów kablobetonowych sprężenie zachodzi w wyniku zakotwienia umieszczonego w licu belki. W przypadku elementów strunobetonowych sprężenie realizowane jest stopnio-

4. The structure concept of a modular footbridge

4.1. Design basis of a bridge structure involving reactive powders concrete

Static and strength calculations of structural elements of the modular, prototype footbridge, were preceded by the analysis of calculation methods and recommendations for the design of bridge structures using UHPC elements, included in the work (21).

The plasticity of the flexural cross-section is dependent on the limit deformation and the associated position coefficient of the neutral axis to the height of the effective cross-section. Effective height d is the distance from the stretched fibers to the resulting tensile force, which is the effect of flexure and possible compression. The k_u value is therefore dependent on the amount of concrete reinforcement with fibers and compression. To ensure adequate plasticity, the k_u coefficient should not be greater than 0.4. Fig. 4 presents the distribution of stresses and strains in the section of the prestressed element made in concrete technology from reactive powders, according to the SGN [load-bearing limit state] method. For a compressed cross-section, the ultimate limit state is reached when the compression of the compression fibers is 0.0035.

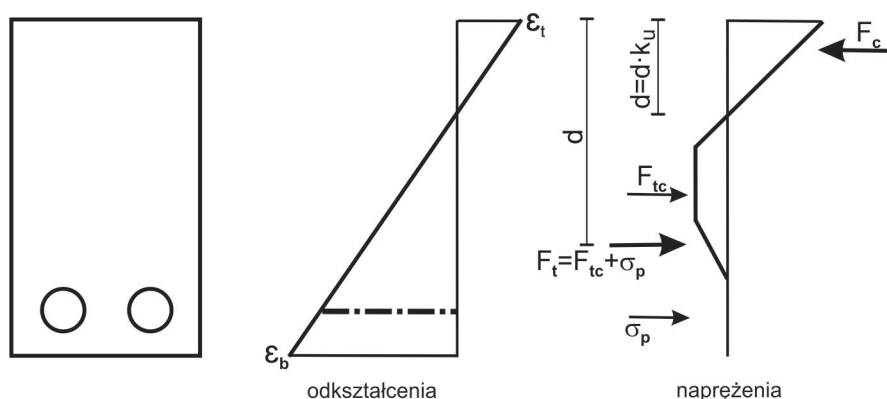
Tensile strength is determined by multiplying the limit strength by a reduction factor ϕ . For non prestressed cross-sections for which cracks is transferred by steel fibers after cracks, the value of this coefficient is 0.7. For compressed sections, for which the coefficient k_u is not higher than 0.4, the value ϕ should be taken as equal to 0.8.

The value of the flexural moment transferred by the RPC concrete elements during the breaking test is greater than the value of the crack moment. However, in the case of ordinary concretes, the value of the bending moment is lower than the value of the crack moment. Therefore, in the case of RPC, the tensile strength at bending is higher than the stress resulting cracking. Since the ratio of the flexural moment to the crack moment for unreinforced elements made of UHPC – with only the addition of fibers, is usually higher than 1.2, it is not required to use minimum reinforcement to preventing cracks formation, as in the case of traditional concretes.

The value of Poisson's ratio for RPC is close to the values assumed for ordinary concretes and ranges from 0.16 to 0.24. As a computational value, it is recommended to adopt the value 0.2. The volume bulk density of reactive powders concretes are in the range from 2400 to 2650 kg/m³, for the experimental RPC concrete bulk density is 2570 kg/m³.

In order to avoid local buckling of slender cross-sections, the coefficient of effective length to the width of the shelves, in the case of T-sections or webs and in the case of rectangular cross-sections, should be less than 25, for simply supported beams. For anchored elements, the value of this coefficient should be lower than 10.

As with ordinary concrete, creep in RPC concrete depends on the age of the concrete when the load is applied and the duration



Rys. 4. Rozkład naprężeń i odkształceń w przekroju elementu sprężonego wykonanego z BPR w przypadku granicznego obciążenia

Fig. 4. Distribution of stresses and strains in cross-section of a prestressed element made of RPC in SGN

wo z uwagi na wiązanie pomiędzy cięgnami i betonem, na długości zwanej długością transmisji l_t . Dla betonów BPR długość ta jest mniejsza niż w przypadku betonów konwencjonalnych, ponieważ warunki połączenia cięgien z betonem są lepsze, z uwagi na zbrojenie rozproszone. W przypadku betonu z proszków reaktywnych długość ta wynosi od $20d_b$ do $40d_b$, przy czym d_b jest średnicą cięgien. W celu projektowania strefy zakotwienia zalecane jest stosowanie modelu ST (S – Strut – pręt ściskany; T – Tie – pręt rozciągany, cięgno).

Naciąg strun sprężających powoduje straty doraźne wywołane skrótem sprężystym. Zmiana odkształceń strun sprężających, wywołana skrótem sprężystym betonu, jest proporcjonalna do odkształceń w betonie (21, 22).

W większości sprężonych belek wykonanych z BPR nie dochodzi do zarysowania pod obciążeniem krótkotrwałym. W takim przypadku ugięcie można obliczyć zakładając wartość modułu sprężystości około 50 GPa oraz wyznaczając moment bezwładności przekroju. W przypadku ugięcia pod obciążeniem długotrwałym, jego wartość można oszacować całkując krzywiznę uzyskaną w przekroju obliczeniowym w analizie czasowej.

4.2. Rozwiązania konstrukcyjne prototypowej kładki dla pieszych z zaprojektowanym doświadczalnie betonem BPR

Celem opracowania projektowego było przedstawienie różnych wariantów mostów dla pieszych, których przęsła złożone są z segmentów prefabrykowanych, wykonanych z betonu z proszków reaktywnych. Założenie podstawowe określono jako uzyskanie konstrukcji o dużej smukłości, przy niewielkim przekroju poprzecznym, za pomocą której można pokonywać przeszkody o szerokości kilku do kilkunastu oraz kilkudziesięciu metrów. Jako długość każdego z prefabrykowanych segmentów przyjęto modularną rozpiętość 3 metry. Poszczególne warianty różnią się między sobą technologią wykonania oraz przekrojem poprzecznym.

and magnitude of the load. In addition, creep temperature and concrete care are affecting creep. According to the design recommendations (21) for heat-treated RPC concretes, the coefficient of creeping is about 0.3, in the case of loading after 28 days. In the case when no heat-pressure treatment during bonding is applied, the creep coefficient for the load applied after 28 days is 1.2.

The deformation caused by shrinkage for RPC concretes is 5×10^{-4} , if heat treatment is applied for the first two days of concrete placing. Then, the entire shrinkage deformation occurs in the first 48 hours. In the case the bond occurs at atmospheric temperature, the shrinkage process occurs slower. It is not spread over time as for ordinary concretes, where the shrinkage

is mainly caused by drying. In RPC concretes, shrinkage is mainly the result of chemical reactions, which causes the deformation by shrinkage is virtually ceasing with the completion of hydration, thus practically after 28 days.

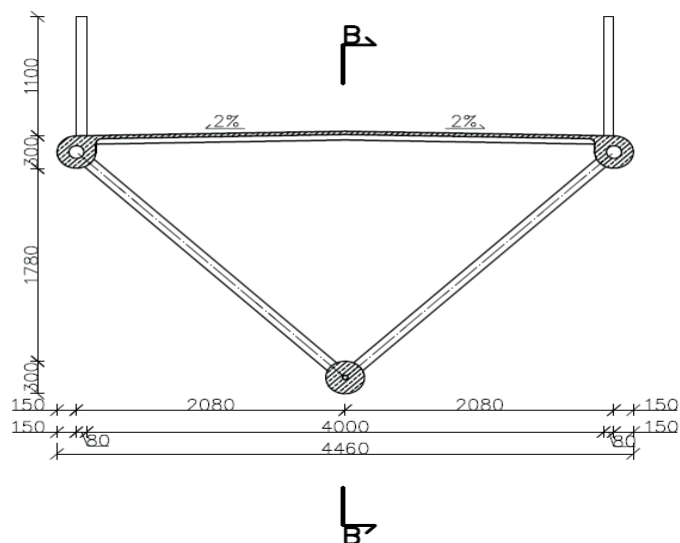
The anchorage zone is the area between the face of the beam and the section in which the distribution of stress from compression is linear. For pre-stressed concrete elements, the compression is carried out by the anchorage placed in the face of the beam. In the case of pre-stressed elements, the compression is carried out gradually due to the binding between the tendons and concrete on the length called the transmission length l_t . For RPC concretes, this length is smaller than in the case of conventional concretes, because the connection conditions of tendons with concrete are better due to the dispersed reinforcement. In the case of reactive powders concrete, the length is from $20d_b$ to $40d_b$, where d_b is the diameter of the tendons. For designing the anchorage zone, it is recommended to use the ST model (S - Strut - compression rod, T - Tie - tension rod, tie rod).

The tension of the prestressed cables causes immediate losses caused by the elastic shortening. The change in the deformation of the prestressed cables caused by the elastic shortcut of the concrete is proportional to the deformation of the concrete (21, 22). Most of the prestressed beams made of RPC do not crack under short-time load. In this case, the deflection can be calculated by assuming a modulus of elasticity of about 50 GPa and determining the moment of inertia of the cross-section. In the case of deflection under long-term load, its value can be estimated by integrating the curvature obtained in the calculated cross-section in the time analysis.

4.2. Design solutions of footbridge with RPC

The aim of the project was to present various variants of pedestrian bridges, whose spans consist of precast segments made of reactive powders concrete. The basic assumption was defined as obtaining a construction with a large slenderness, with a small

PRZEKRÓJ A-A
skala 1: 50



Rys. 5. Przekrój poprzeczny segmentu kratownicowego

Fig. 5. Cross section of the truss segment

Wersją podstawową stanowił układ belkowo płytowy. Dźwigary zaprojektowane zostały jako okrągłe, a ich wysokość wynosiła 30 cm. Wysokość konstrukcyjna płyty pomostu to 5 cm. Schemat statyczny tego rozwiązania stanowi jednoprzęsłowa belka wolnopodparta.

Wariant drugi stanowiły dwie belki sprężone, współpracujące z płytą pomostu. Wymiary przekroju poprzecznego pozostały niezmienione w stosunku do wariantu podstawowego. Sprężenie zaprojektowane zostało jako wykonane w technologii kablobetonu. Z uwagi na ograniczone wymiary bloku oporowego, spowodowane otuleniem, do sprężania mogą być zastosowane kable, dla których musi być zapewnione otulenie bloku oporowego.

cross-section, through which it is possible to overcome obstacles with a width of several to a dozen or several dozen meters.

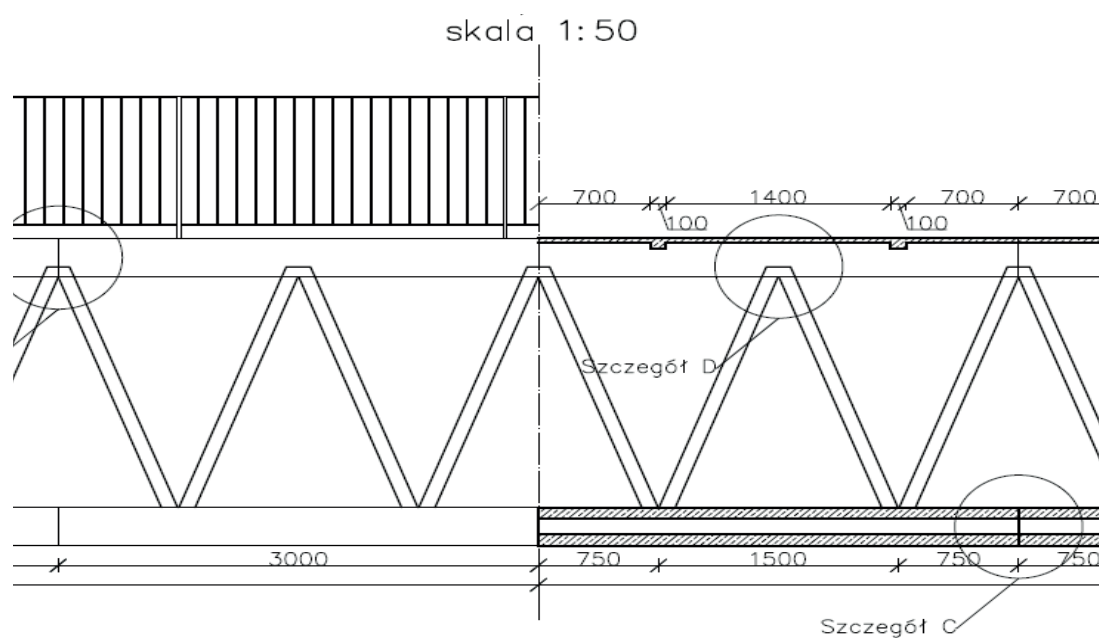
As the length of each of the precast segments, a modular span of 3 meters was adopted. The individual variants differ in technology of realization and cross-section.

The basic version was a beam-type arrangement. The girders were designed as round, and their height was 30 cm. The construction height of the bridge deck is 5 cm. The static scheme of this solution is a single-span free-support beam.

The second variant was composed of two beams linked with the bridge deck. The dimensions of the cross-section are unchanged in relation to the basic variant. The compression was designed as a cable-concrete technology. Due to the limited dimensions of the resistance block due to the cover, prestressed cables can be used for which the resistance block must be secured.

In the comprehensive engineering and numerical calculations, the variant of the pedestrian bridge structure with the lattice supporting beam was finally analyzed. The top stripe of the structure is made of two RPC concrete beams with a diameter of 30 cm, connected by a UHPC deck, with a thickness of 5 cm. The lower belt is a single rod with a circular cross-section of 30 cm diameter, also made of RPC concrete. The crosses are made of round stainless steel pipes with a cross-section RO101.6x12.5 mm. The vertical and horizontal distance between the girder centers is 2.08 m. The construction due to the use of UHPC and the adopted dimensions of structural elements has an interesting aesthetic dimension, as well as a decisive lightness in visual perception [Figs. 5 and 6].

In subsequent project stages, truss segments from the span of 15 meters were analyzed, i.e. after joining 5 segments, then 6, 7 etc. basic modules [Figs. 5 and 6]. The basic material data for concrete



Rys. 6. Widok z boku i przekrój podłużny segmentu kratownicowego o rozpiętości 3 m

Fig. 6. Side view and longitudinal section of a truss segment with a span of 3 m

W kompleksowych obliczeniach inżynierskich i numerycznych przeanalizowano docelowo wariant konstrukcji kładki dla pieszych, z dźwigarem nośnym kratownicowym. Pas górny konstrukcji stanowią dwie belki betonowe z BPR o średnicy 30 cm, połączone płytą z BUWW pomostu o grubości 5 cm. Pas dolny stanowi pojedynczy pręt o przekroju kołowym o średnicy 30 cm, również wykonany z betonu BPR. Krzyżulce wykonane są z rur okrągłych ze stali nierdzewnej, o przekroju RO101,6x12,5 mm. Odległość w pionie i w poziomie pomiędzy środkami dźwigarów wynosi 2,08 m. Konstrukcja dzięki zastosowaniu BUWW i przyjętym wymiarom elementów konstrukcyjnych, ma ciekawy wymiar estetyczny, a także zdecydowaną lekkość w odbiorze wizualnym [rysunki 5 i 6].

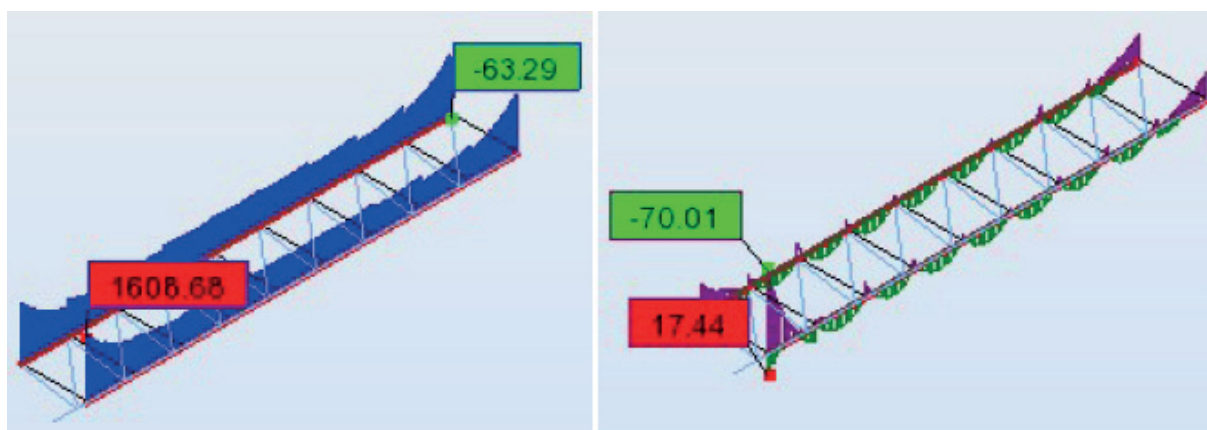
W kolejnych etapach projektowych analizowano segmenty kratownicowe od rozpiętości 15 metrów, a więc po połączeniu 5 segmentów, następnie 6, 7 itd. modułów podstawowych [rysunki 5 i 6].

Podstawowe dane materiałowe dla betonu z proszków reaktywnych, przyjęto na podstawie badań doświadczalnych, opisanych w rozdziale 3, na podstawie pracy Grzeszczyk i in. (20). Moduł sprężystości przyjęto jako $E=43,8$ GPa; wytrzymałość charakterystyczną na ściskanie równą $f_{ck} = 200$ MPa; wytrzymałość obliczeniową na ściskanie $f_{cd}=f_{ck}/1,4 = 143$ MPa; średnią wytrzymałość

from reactive powders was adopted on the basis of experimental research, described in Chapter 3, based on paper of Grzeszczyk et al. 20. The modulus of elasticity was established as $E = 43.8$ GPa; characteristic compressive strength equal to $f_{ck} = 200$ MPa; compressive strength $f_{cd} = f_{ck}/1.4 = 143$ MPa; medium tensile strength $f_{ctm} = 5$ MPa, allowable deformation of compression fibers $\epsilon_t = 0.004$ and permissible deformation of tensile fibers $\epsilon_b = 0.01$ [Fig. 4].

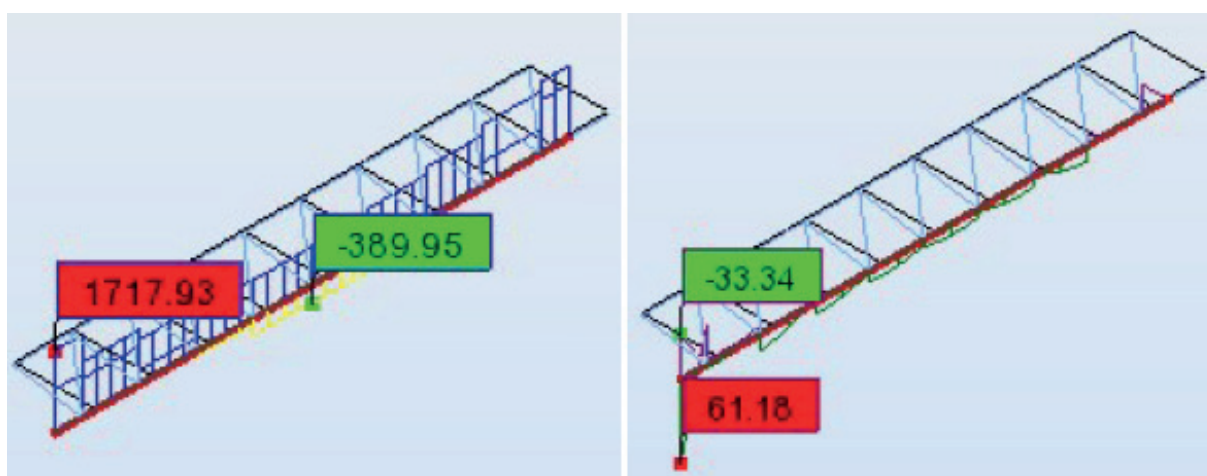
In selected structural solution, with truss supporting beams, RPC concrete beams undergo flexure with compression or extend. In the computational analysis for a structure composed with a given number of basic modules, the flexural moment M and the of longitudinal force F_x are variable values. On the basis of comprehensive computational analysis, both the lower and upper belt of the truss structure were prestressed by a force of 1370 kN, using four-pass strings.

The cross-bones made of steel with a cross-section of round tubes RO101.6x12.5 mm are subjected to compression or crack. The strength of steel was assumed to be $f_y = 275$ MPa; cross-sectional area of steel elements $A_s = 17.5$ cm²; the compressive / tensile strength is $N_{Rd} = 481.25$ kN.



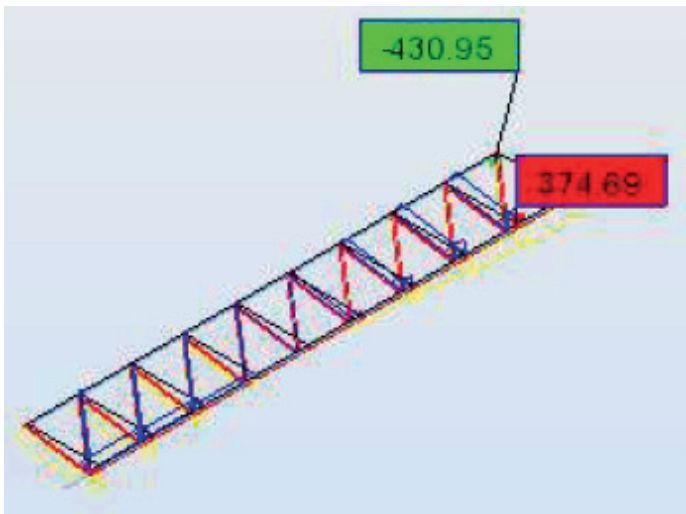
Rys. 7. Wykres siły podłużnej i momentu zginającego dla belek górnych, przy połączeniu 9 segmentów

Fig. 7. Diagram of longitudinal force and flexural moment for upper beams, with a combination of 9 segments



Rys. 8. Wykres siły podłużnej i momentu zginającego dla belki dolnej, przy połączeniu 9 segmentów

Fig. 8. Diagram of longitudinal force and flexural moment for the lower beam, with a combination of 9 segments



Rys. 9. Wykres sił podłużnych dla krzyżulców przy połączeniu 9 segmentów
Fig. 9. Diagram of longitudinal forces for struts with a combination of 9 segments

na rozciąganie $f_{ctm} = 5$ MPa, dopuszczalne odkształcenie włókien ściskanych $\epsilon_t = 0,004$ oraz dopuszczalne odkształcenie włókien rozciąganych $\epsilon_b = 0,01$ [rysunek 4].

W wybranym rozwiązaniu konstrukcyjnym, z dźwigarem nośnym kratownicowym, belki betonowe z BPR poddane są zginaniu – ze ściskaniem lub rozciąganiem. W analizie obliczeniowej dla konstrukcji złożonej z zadaną ilością modułów podstawowych, wartość momentu zginającego M oraz wartość siły podłużnej F_x są wartościami zmiennymi. Na podstawie kompleksowej analizy

Tablica 5 / Table 5

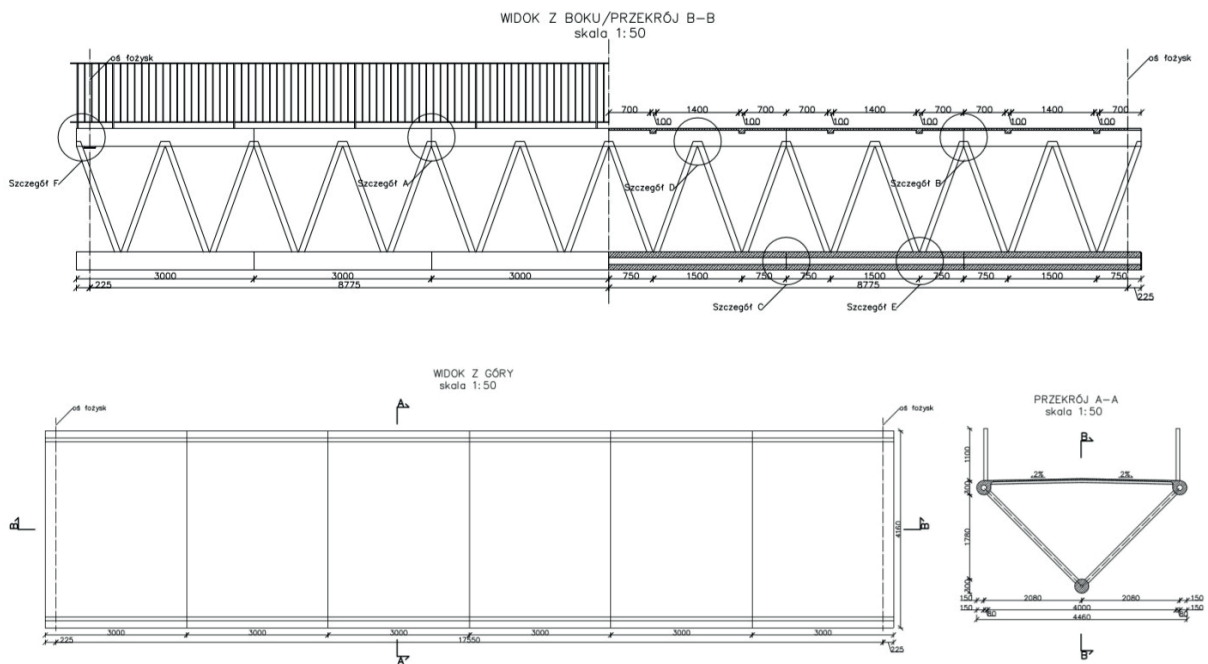
WYNIKI ANALIZY PRZY POŁĄCZENIU 9 SEGMENTÓW, O ROZPIĘTOŚCI 3 m KAŻDY

ANALYSIS RESULTS FOR THE COMBINATION OF 9 SEGMENTS, WITH A SPAN OF 3 m EACH

przekrój <i>section</i> moment <i>moment</i> M [kNm]		Pas górny / Upper strip			Pas dolny / Bottom strip			Krzyżulce / Struts	
		siła podłużna <i>longitudinal force</i> F [kN]	wyężenie [%]	moment M [kNm]	siła podłużna <i>longitudinal force</i> F [kN]	Wyężenie effort [%]	siła podłużna <i>longitudinal force</i> [kN]	wyężenie effort [%]	
maksymalna siła <i>maximum strength</i>	włókna dolne <i>bottom fibers</i>	-10,38	1608,68	11,43	-57,53	1717,93	2,77	374,69	77,86
	włókna górne <i>upper fibers</i>	10,38	1608,68	15,27	57,53	1717,93	51,00		
minimalna siła <i>minimal strength</i>	włókna dolne <i>bottom fibers</i>	15,87	-63,29	3,47	0,00	0,00	0,00	-430,95	89,55
	włókna górne <i>upper fibers</i>	-15,87	-63,29	43,24	0,00	0,00	0,00		
maksymalny mo- ment <i>maximum moment</i>	włókna dolne <i>bottom fibers</i>	-70,01	780,66	89,20	61,18	1585,42	50,45	-	-
	włókna górne <i>upper fibers</i>	70,01	780,66	20,95	-61,18	1585,42	14,96		

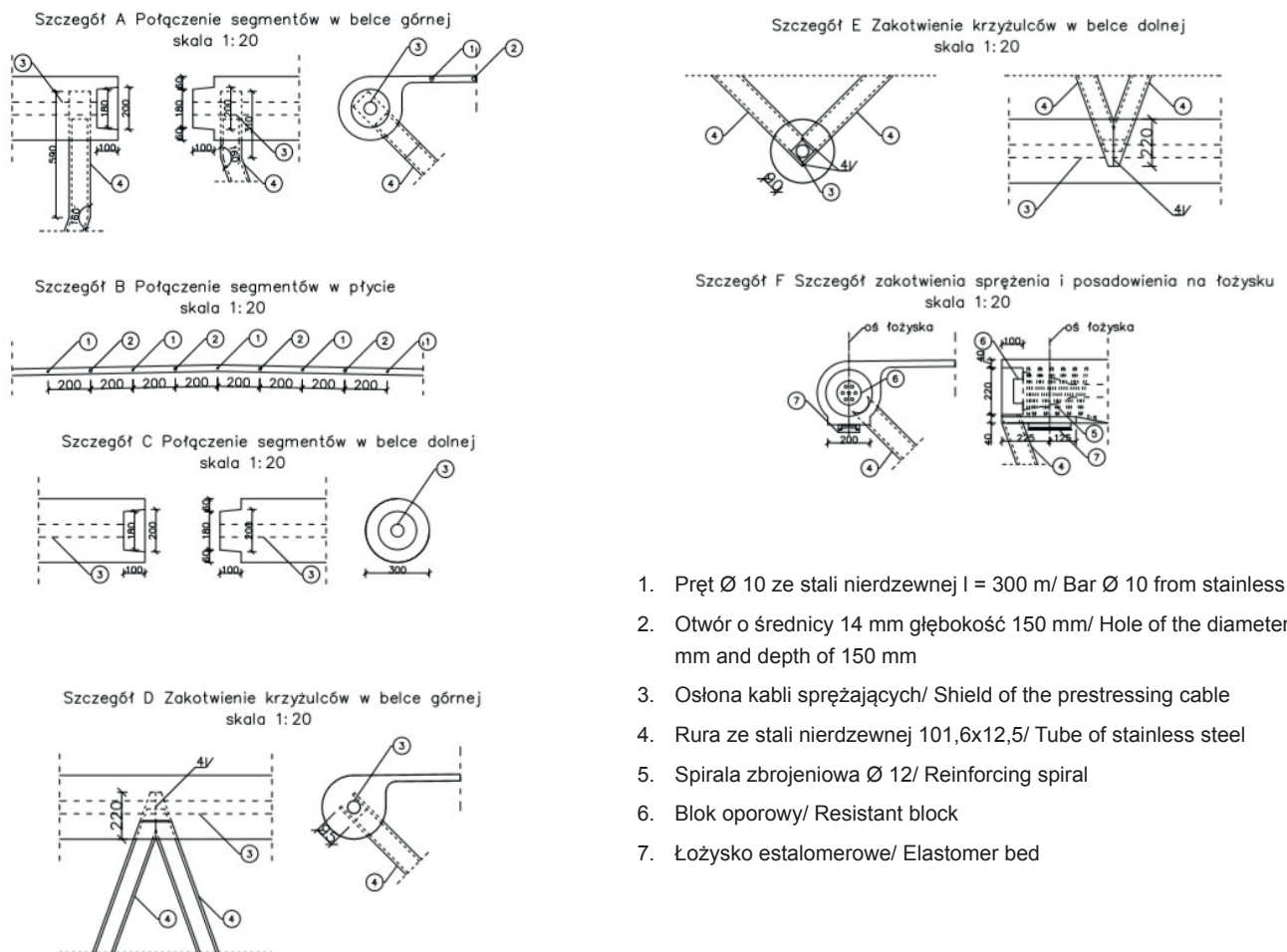
The numerical analysis was performed using Robot Structural Analysis Professional 2014. As load, it was assumed, apart from the own mass, also a pedestrian crowd load of 5 kN/m². The construction of the footbridge is based on articulated supports. The computational model made adopting Robot Structural Analysis program was used to check what maximum number of 3-meter segments can be combined with each other. Selected results of static and strength calculations, based on numerical analysis, are given in Table 5. The results shown in Figs. 7 - 9 and Table 5 indicate that the footbridge made of 9 modular truss segments can achieve a total span of 27 meters i.e. 9 modules, with a span of 3 m each. The limitation of this span is due to the limiting tensile stress of the upper belt.

An important issue in the case of precast constructions is the combination of elements. In the case of the segment footbridge [Figs. 10 and 11] being the subject of the study, this task is additionally difficult due to the slenderness of the elements. The combination of elements is based on the technology of tongue and groove joints. In places where the elements are joined, the use of a high strength adhesive mortar is planned, which will be an additional fastener, under the influence of prestressed force and steel bars along the plate, which are to protect the bridge from deformation at the joint joints. A similar way of joining elements is adopted in ribbon bridges, however, in these bridges concrete prefabricates are not the main load-bearing elements. Anchoring of compression is based on standard solutions, offered by producers of prestressed systems. Compression conducted centrally in the supporting beams prevents deep anchoring, therefore, as a joint, the inside of



Rys. 10. Koncepcja modularnej, segmentowej kładki przy połączeniu 6 segmentów (w widoku z boku, w przekroju podłużnym B-B, w widoku z góry i w przekroju poprzecznym A-A)

Fig. 10. The concept of a modular, segmental footbridge with a combination of 6 segments (in side view, in longitudinal section B-B, in top view and in cross-section A-A)



Rys. 11. Wybrane detale połączeń elementów konstrukcyjnych projektowanej kładki

Fig. 11. Selected details of connections of structural elements of the designed footbridge

obliczeniowej, zarówno pas dolny jak i górny konstrukcji kratownicowej, poddane zostały sprężeniu siłą 1370 kN, za pomocą kabli czterospłotowych.

Krzyżulce wykonane ze stali o przekroju rur okrągłych RO-101,6x12,5 mm poddane są ścisaniu lub rozciąganiu. Wytrzymałość stali przyjęto o wartości $f_y=275$ MPa; pole przekroju elementów stalowych $A_s=17,5$ cm²; a nośność na ściskanie/rozciąganie wynosiła $N_{Rd}=481$ kN.

Analizę numeryczną wykonano w oparciu o program Robot Structural Analysis Professional 2014. Jako obciążenie przyjęto, poza masą własną, również obciążenie tłumem pieszych, wynoszącym 5 kN/m². Konstrukcja kładki oparta jest na podporach przegubowych. Model obliczeniowy wykonany w programie Robot Structural Analysis posłużył do sprawdzenia jaką maksymalną liczbę 3 metrowych segmentów można ze sobą połączyć. Wybrane wyniki obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, w oparciu o analizę numeryczną, zamieszczono w tablicy 5. Wyniki przedstawione na rysunkach od 7 do 9 oraz w tablicy 5 wykazują, że kładka wykonana z 9 modułarnych segmentów kratownicowych może uzyskać rozpiętość całkowitą 27 metrów – 9 modułów, o rozpiętości 3 m każdy. Ograniczenie tej rozpiętości spowodowane jest osiągnięciem granicznego naprężenia rozciągającego pasa górnego.

Ważnym zagadnieniem w przypadku konstrukcji prefabrykowanych jest połączenie elementów. W przypadku segmentowej kładki [rysunki 10 i 11], będącej przedmiotem opracowania, zadanie to jest dodatkowo utrudnione z uwagi na smukłość elementów. Połączenie elementów opiera się na technologii złączy – pióro i wpust. W miejscach spojenia elementów przewidziano stosowanie zaprawy klejowej o dużej wytrzymałości, która będzie dodatkowym łącznikiem pod wpływem siły sprężającej oraz pręty stalowe wzdłuż płyty, które mają zabezpieczać kładkę przed deformacjami na styku połączeń. Podobne metody połączenia elementów stosowane są w mostach wstęgowych, jednak w mostach tych prefabrykaty betonowe nie są głównymi elementami nośnymi. Zakotwienie sprężenia opiera się na standardowych rozwiązaniach oferowanych przez producentów systemów sprężających. Sprężenie poprowadzone centralnie w belkach nośnych, uniemożliwia głębokie zakotwienie, dlatego jako połączenie zastosowane zostanie zabetonowanie wnętrza rur. Wprawdzie zwiększy to masę konstrukcji, jednak poprawi wytrzymałość rur oraz zapewni ich stabilizację. Ponadto rury zostaną odpowiednio wyprofilowane na końcach, w celu ułatwienia betonowania i lepszego zakotwienia w belkach.

W obliczeniach przyjęto uproszczenie w postaci obciążenia jedynie masą własną oraz obciążenia użytkowego, zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 1991-2 – obciążenie powierzchniowe tłumem pieszych 5 kN/m². Pominięte zostały naprężenia spowodowane skurczem pęcznienia oraz obciążenia klimatyczne. Wprawdzie dla betonów z proszków reaktywnych wpływ tych obciążeń, przy odpowiedniej pielęgnacji betonu, jest niewielki, to konieczne było pozostawienie kilkuprocentowego zapasu nośności. Z kolei obciążenie wiatrem może mieć większe znaczenie tylko w przypadku wariantu, dotyczącego połączenia maksymalnej liczby 9

the pipes will be filled with concrete. Although this will increase the mass of the structure, simultaneously it will improve the strength of the pipes and ensure their stabilities. In addition, the pipes will be properly profiled at the ends to facilitate concreting and better anchorage in the beams.

In the calculations, simplification in the form of a load only with the own mass and payload in accordance with the recommendations of the PN-EN 1991-2 standard – the surface load of 5 kN/m² of pedestrian crowd was accepted. Loads from shrinkage, creep and climatic loads were omitted. Although for concrete made of reactive powders, the impact of these loads with the appropriate care is low, it was necessary to leave a few percent load capacity. Wind loads, on the other hand, can be more important only in the case of a variant, when the maximum number of 9 segments is combined. Only the bending strength was checked in the calculations. The analysis of the impact of the load on torsion and shearing has not been carried out, therefore, prior to the application of the footbridge, a design check is required and, if necessary, the design of reinforcing inserts to protect against their impact (22).

The advantages of the designed footbridge solution is the use of durable concrete, made of reactive powders in the use of stainless steel elements and modularity that allows the same precast elements to be used to a certain range, i.e. flexibility of the solution and the use of proven solutions of precast ribbon structures. In the case of precast, the contact tightness is essential for durability - it would be necessary to use a matching and sealing layer, made of polymeric resin for example of epoxy resin. The structural solution itself is extremely rigid, with a relatively low own mass, and creates an impression of lightness in the observer through openwork.

Steel fibers, added to the entire volume of reactive powders concrete, are dispersed reinforcement in concrete, and the strength of their bond depends of the geometrical parameters of the fibers and the type of fiber ends. More preferred, in comprehensive aspect are deformed, not straight ends of fibers. For concrete from reactive powders used in bridges (23), an interesting issue is how the dynamic load acting on bridge structures, affects structural elements from UHPC, or micro-changes in the fiber-cement matrix zone may occur as a result of multimillion load cycles dynamic (24). What type of steel fibers should be preferred in the design of UHPC structural bridge elements. Such analyzes will be carried out in the perspective activities

5. Conclusions

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is a promising structural material that gives great possibilities for shaping bridge concrete structures on the pattern of orthotropic steel constructions. The constructional solutions of pedestrian bridges that are adequate for this material are, on the one hand, different truss structures, on the other constructions, using a flat surface curvature to create a closed section, so as to increase the stiffness of the system. The main advantage of this material - high durability at low own

segmentów. W obliczeniach sprawdzono jedynie wytrzymałość na zginanie. Nie została przeprowadzona analiza wpływu obciążenia na skręcanie i ścinanie, w związku z czym przed przystąpieniem do realizacji kładki wymagane jest obliczeniowe sprawdzenie i w razie konieczności zaprojektowanie wkładek zbrojeniowych, zabezpieczających przed ich wpływem (22).

Zaletami rozwiązania zaprojektowanej kładki jest zastosowanie trwałego betonu z proszków reaktywnych i trwałych w eksploatacji elementów stalowych ze stali nierdzewnej oraz modularność dająca możliwość stosowania tego samego prefabrykatu do pewnego zakresu rozpiętości, czyli elastyczność rozwiązania i wykorzystanie doświadczeń ze sprawdzonych rozwiązań prefabrykowanych konstrukcji wstęgowych. W przypadku prefabrykacji ważnym, ze względu na trwałość, jest uzyskanie szczelności styków – byłoby w tym przypadku niezbędne stosowanie warstwy dopasowująco-uszczelniającej z żywicy polimerowej, na przykład epoksydowej. Samo rozwiązanie konstrukcyjne jest maksymalnie sztywne, przy stosunkowo małej masie własnej, a przez ażurowość wywołuje w obserwatorze wrażenie lekkości.

Włókna stalowe, występujące w całej objętości betonu z proszków reaktywnych są rozproszonym zbrojeniem zakotwionym w betonie, a siła tego zakotwienia zależy od geometrii włókien oraz ich końcówek. Korzystniejsze są odkształcone, a nie proste końcówki włókien. Dla betonu z proszków reaktywnych, wykorzystywanych w realizacjach mostowych (23), interesującym zagadnieniem jest w jaki sposób obciążenie dynamiczne, działające na obiekty mostowe, wpływa na elementy konstrukcyjne z BUWW, czy może dojść do mikro zmian w strefie włókno-matryca cementowa na skutek wielomilionowych cykli obciążenia dynamicznego (24). Jaki rodzaj włókien stalowych powinno się wybrać w projektowaniu konstrukcyjnych elementów mostowych z BUWW. Takie analizy będą prowadzone w następnych opracowaniach.

5. Wnioski końcowe

Betony ultrawysokowartościowe to interesujący materiał konstrukcyjny, dający duże możliwości kształtowania mostowych konstrukcji betonowych na wzór ortotropowych konstrukcji stalowych. Właściwe dla tego materiału rozwiązania konstrukcyjne kładek dla pieszych to z jednej strony różnego rodzaju ustroje kratownicowe, a z drugiej konstrukcje wykorzystujące zakrzywienie powierzchni płaskich w celu stworzenia przekroju zamkniętego, tak aby zwiększyć sztywność ustroju. Zasadnicza zaleta tego tworzywa – duża wytrzymałość przy małej masie własnej, jest też niestety zagrożeniem w przypadku lekkich, smukłych konstrukcji, drganiami wzbudzonymi przez pieszych lub wiatr. W projektach należy skoncentrować uwagę na ukształtowaniu konstrukcji maksymalnie sztywnej, dlatego, że tłumienie drgań, w dużym uproszczeniu, zależne jest od sztywności konstrukcji, a nie jej masy. Z uwagi na wytrzymałość na rozciąganie i możliwości montażowych większe konstrukcje, czy elementy z betonu z proszków reaktywnych zbrojonych włóknami, wymagają dodatkowego sprężenia. To zagadnienie uwzględniono w prezentowanym projekcie kon-

mass, is also a threat, in the case of light, slender constructions, vibrations excited by pedestrians or wind. The projects should focus on the construction of the maximum rigid structure, because the damping of vibrations, in a great simplification depends on the stiffness of the structure, not its mass. Due to tensile strength and assembly possibilities, long spans bridge structures or concrete elements made by RPC with fibers require additional compression. This aspect is taken into account in the construction project of the footbridge. The design analysis of the prototype modular pedestrian footbridge indicates that when minimizing the dimensions of structural elements made of designed concrete from reactive powders, the footbridge made of 9 modular truss segments can reach a total span of 27 meters. The limitation of this span is due to the limiting tensile stress of the upper belt. The general advantages of the solution of the designed footbridge is the use of durable concrete from reactive powders, in the operation of stainless steel elements and modularity giving the possibility of using the same prefabricate for different spans in the range of 15 to 27 m, that is the unmistakable flexibility of the prototype solution and the use of experience in it from proven solutions of prefabricated ribbon structures.

Acknowledgments

The authors would like to thank Prof. Stefani Grzeszczyk and PhD Aneta Matuszek-Chmurowska from the Building Materials Laboratory of the Department of Building Materials Engineering, Opole University of Technology, for providing concrete test results of RPC.

strukcyjnym kładki. Analiza projektowa prototypowej, modularnej kładki dla pieszych wykazuje, że przy zminimalizowaniu wymiarów elementów konstrukcyjnych, wykonanych z zaprojektowanego betonu z proszków reaktywnych, kładka z 9 modularnych segmentów kratownicowych może osiągnąć rozpiętość całkowitą 27 metrów. Ograniczenie tej rozpiętości spowodowane jest osiągnięciem granicznego naprężenia rozciągającego pasa górnego. Generalnymi zaletami rozwiązania zaprojektowanej kładki jest zastosowanie trwałego betonu z proszków reaktywnych i trwałych w eksploatacji elementów stalowych ze stali nierdzewnej oraz modularność, dająca możliwość stosowania tego samego prefabrykatu do różnych rozpiętości w zakresie od 15 m do 27 m, czyli niewątpliwa elastyczność rozwiązania prototypowego i wykorzystanie w nim doświadczeń ze sprawdzonych rozwiązań prefabrykowanych konstrukcji wstęgowych.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Prof. Stefani Grzeszczyk i dr Anecie Matuszek-Chmurowskiej z Laboratorium Materiałów Budowlanych Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych Politechniki Opolskiej, za udostępnienie wyników badań betonów z proszków reaktywnych.

Literatura / References

1. P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, **25**, 1501-1511, (1995).
2. J. D. Birchall, Cement in the contest of new materials for an energy-expensive future, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1983, A310, 31-39.
3. Y.-W. Chan, S.-H. Chu, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristic in reactive powder concrete. *Cem. Concr. Res.*, **34**, 1167-1172, (2004).
4. A.M. Neville, *Właściwości betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków (2012).
5. P.-C. Aitcin, The art and science of durable high-performance concrete. Conference Concrete on the eve of the New Millennium 2000, Polish Cement Association, Cracow, 2000.
6. A. Nonat, C-S-H i właściwości betonu. *Cement Wapno Beton* **6**, 65-73, (2010).
8. Locher F.M., Richartz., 6th ICCO Moskwa, t. II/1, s. 122, Moskwa 1974
9. A. M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Compos. Struct.* **86**, 3–9, (2008).
10. D.Y. Yoo, N. Banthia, Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review *Cement and Concrete Composites*, **73**, 267-280, (2016).
11. S. Yu, L. Jun, W. Chengqing, W. Pengtao, L. Zhong-Xian Effects of steel fibres on dynamic strength of UHPC *Construction and Building Materials* **114**, 708–718, (2016).
12. C.M. Tam, V.W. Tam, K.M. Ng, Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong, *Constr. Build. Mater* **26** (1), 79- 89, (2012).
13. S. Rigaud, G. Chanvillard, J. Chen, Characterization of bending and tensile behavior of ultra-high performance concrete containing glass fibers, in: G. Parra-Montesinos, H. Reinhardt, A.E. Naaman (Eds.), *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* **6**, Springer, Netherlands, 373–380, (2012).
14. B. Stankiewicz, Composite material GFRP and Ductal in decks of bridge structures. *Journal of Materials Science and Engineering A*, **4** (9), 282-289, (2014).
15. Blais R.Y., Couture M., Prestressed Pedestrian Bridge – World's First Reactive Powder Concrete Structure, *PCI Journal*, 1999.
16. E. Fehling, K. Bunje, M. Schmidt, Gärtnerplatz – bridge over river Fulda in Kassel: multispan hybrid UHPC-steel bridge, in: *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, Inc., 0–136, (2013).
17. Gärtnerplatz Bridge in Kassel, *Sika at Work*, **4**, (2007).
18. <http://ipvdelft.com/portfolio-item/uhpc-bridge-texel/>
19. W.J. Chin, Y.J. Kim, J.-R. Cho, J.S. Park, Dynamic Characteristics Evaluation of Innovative UHPC Pedestrian Cable Stayed Bridge, *Engineering*, **4**, 869-876, (2012).
20. S. Grzeszczyk, A. Matuszek-Chmurowska, R. Cerny, E. Vejmelkova, Mikrostruktura betonów z proszków reaktywnych, *Cement Wapno Beton* **1**, 1-15, (2018).
21. N. Gowripalan, R. I. Gilbert, Design Guidelines for Ductal Prestressed Concrete Beams (2000).
22. A. Rabiniak, *Modularna kładka sprężona z betonu Ductal®*. Praca dyplomowa pod kierunkiem W. Średniawy, Politechnika Krakowska (2017).
23. B. Stankiewicz, Kompozyty cementowe Ductal w konstrukcjach mostowych. *Mosty* **6**, 50-54, (2015).
24. A. Spasojevic, Structural implications of ultra-bridge performance fibre-reinforced concrete in bridge design. These N° 4051, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (2008).
25. Hannant D.J., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley and Sons, Chichester 1978.
26. Powers T., Proc. Conf. Structure of Concrete and its Behaviour under Load, p. 319, Cem.Concr. Ass., London 1968.