

## **Wytrzymałość i odkształcalność prefabrykowanych, cienkościennych elementów betonowych,**

## **Concrete strength and elasticity of precast thin-walled elements**

### **1. Wprowadzenie**

We współczesnym budownictwie coraz częściej wykorzystuje się cienkościenne prefabrykaty betonowe, na przykład elementy przykryć dachowych (płyty, powłoki, dźwigary), stropów, schodów, elewacji oraz szereg innych. Bardzo często wykonywane są one z betonów o dużej wytrzymałości, niejednokrotnie z betonu samozagęszczającego się (2, 4). Najczęściej zbrojone są siatkami z prętów stalowych lub włóknami rozproszonymi. Zdarzają się jednak również elementy niezbrojone.

Jednym z najczęściej stosowanych na świecie prefabrykowanych elementów stropowych są strunobetonowe płyty kanałowe. Ze względu na ich technologię produkcji (ślizgową lub wyciskaną), nie mają zbrojenia poprzecznego, a jedyne ich zbrojenie stanowią podłużne cięgna sprężające. W płytach kanałowych o dużej wysokości przekroju poprzecznego, szczególnie wykonywanych z zastosowaniem technologii ślizgowej, kanały mają kształt przekroju zbliżony do prostokątnego, a żeberka przyjmują postać cienkościennych beleczek – przekrój poprzeczny przykładowej płyty kanałowej PK500 pokazano na rysunku 1. W przypadku takich elementów o nośności zazwyczaj decyduje nośność ścinania żeber prefabrykatu. Ponieważ stropy kanałowe projektuje się zazwyczaj przy założeniu pracy płyt jako elementów jednoprzesięwowych, wolnopodpartych, to przy obciążeniu równomiernie rozłożonym strefy podporowe znajdują się w obszarach niezarysowanych przez zginanie. W takiej sytuacji, nośność na ścinanie wynika z warunku ograniczenia głównego naprężenia roztciągającego do wytrzymałości betonu na rozciąganie. Zatem o bezpieczeństwie użytkowania tych stropów decyduje zarówno precyzja określenia stanu naprężenia w przekroju (bardzo często stanu złożonego, uwzględniającego zmienność siły sprężającej na długości transmisji oraz efekty skręcania, niezamierzonego zamocowania płyt na podporach i odkształcalności samych podpór), jak i znajomość rzeczywistej wytrzymałości betonu w żeberkach płyt (3).

W procesie projektowania konstrukcji, dla przyjętej klasy betonu, obliczeniową wytrzymałość przyjmuje się zazwyczaj na podstawie danych normowych. Wytrzymałość ta odnosi się jednak do

### **1. Introduction**

In the modern precast concrete thin-walled elements, such as roof covers – slabs, girders, shells, as well as floors, stairs, facades, are gaining increasing application. Usually, these elements are cast from high strength concrete, very often taking advantage of the self-compacting technology (2, 4). Generally, the reinforcement of these elements has the form of meshes or fibers. In some cases the thin-walled precast concrete elements are without any reinforcement.

One of the most popular worldwide precast floor elements are pretensioned hollow core slabs. Due to their production technology – slip-forming or extrusion, there is no transverse reinforcement, and the only reinforcement in these elements are longitudinal prestressing strands. In hollow core slabs, with relatively large cross-section height, particularly in elements made in slip-forming technology, the cores have a quasi-rectangular shape, and the ribs take the form of thin-walled beams. The cross section of a HC500 slab, as an example, is shown in Fig. 1.

In the case of these aforementioned elements, the bearing capacity of the whole slab is determined by the shear capacity of these thin-walled ribs. Since hollow core slabs are usually designed as single-span, simply supported elements, then under the assumption of uniformly distributed loading, the support zones are located in the areas free from cracking induced by bending moments. In such cases, shear capacity results from the limitation of principal stresses to the value of concrete tensile strength (3). The safety of functional usability is then determined both by the precision of estimation of the complex stress state in the cross-section, taking into consideration possible torsional effects, unintended fixing of slabs at supports as well as deformability of supports, and the awareness of the actual concrete strength of hollow core slab ribs.

In the process of structure designing, for the assumed concrete class, the design strength is adopted on the basis of standard value. This value is related to the ordinary concrete, tested on standard specimens with adequate, normalized size and geometry of cross-section.

betonów zwykłych, badanych na znormalizowanych próbkach (walcowych lub sześciennych), posiadających odpowiednie wymiary przekroju.

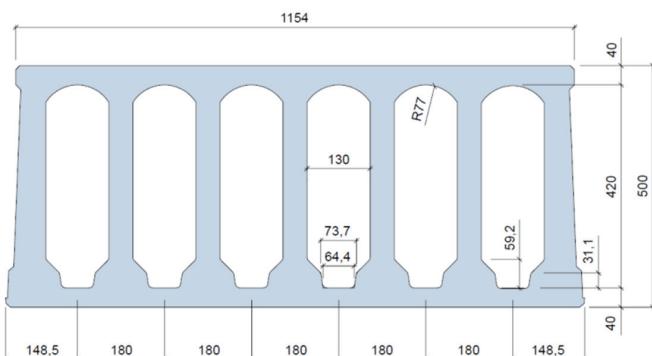
Należy podkreślić, iż w produkcji sprężonych płyt kanałowych mieszance betonowej stawiane są specjalne wymagania, a mianowicie natychmiastową zdolność utrzymania kształtu prefabrykatu bez stosowania szalunków, dużą wczesną wytrzymałość betonu, duży moduł sprężystości i niewielkie odkształcenia reologiczne. Z tych właśnie powodów nie znajdują tu zastosowania konwencjonalne betony zwykłe, a wykorzystywane są betony o stosunkowo dużej wytrzymałości, o stosunkowo małym stosunku wodno-cemento-wym (klasa konsystencji V0 dla metody Vebe, według normy PN-EN 206-1, co według starej normy PN-88/B-06250 odpowiadało konsystencji wilgotnej – stopień ciekłości K-1), w których szybki przyrost wytrzymałości uzyskuje się dzięki stosowaniu odpowiednich cementów i domieszek oraz podgrzewania elementu w pierwszych godzinach po jego uformowaniu. Taki proces technologiczny, w połączeniu z elementami cienkościennymi, w których na grubości ścianek elementu może mieścić się tylko kilka ziaren kruszywa grubego, może powodować znaczną różnicę między rzeczywistą wytrzymałością betonu danej klasy, a wartościami podawanymi w odpowiednich normach.

W artykule zostaną omówione badania betonu, zastosowanego do produkcji strunobetonowych płyt kanałowych, przeprowadzone w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej, a także analiza uzyskanych wyników.

## 2. Materiały

Badania betonu przeprowadzono na elementach o nominalnej wysokości 320 mm, wykonanych podczas bieżącej produkcji typowych płyt kanałowych w zakładzie prefabrykacji. Według dokumentacji projektowej prefabrykatów, mieszanka betonowa powinna spełniać wymagania betonu o klasie wytrzymałości C50/60. Beton wykonano na łamany kruszywie granitowym o maksymalnym uziarnieniu 16 mm i z cementu klasy CEM I 52,5R. Zastosowano mieszankę betonową o klasie konsystencji V0 i stosunku w/c = 0,42.

Płyty kanałowe produkowano na długim torze naciągowym, z wykorzystaniem technologii ślizgowej, w której następuje dwuetapowy proces betonowania: krok 1 – formowanie warstwy betonu półki dolnej, w której mieścią się cięgna sprężające, krok 2 – formowanie żeberek i półki górnej. Oba kroki wykonuje specjalne urządzenie formujące, poruszające się wzdłuż toru naciągowego, w odstępach czasowych nie większych niż 1 min. Zagęszczanie betonu w obu warstwach następuje za pomocą układu wibratorów powierzchniowych. W celu przyspieszenia procesu dojrzewania betonu, elementy po zabetonowaniu pozostawały przykryte folią izolacyjną i podgrzewane od spodu poprzez ogrzanie stalowego stołu naciągowego do temperatury około 34°C. Zwolnienie naciągu i przekazanie siły sprężającej na beton nastąpiło po około 13 godzinach od zabetonowania, to jest przy średniej wytrzymałości



Rys. 1. Przekrój poprzeczny płyty kanałowej PK500

Fig. 1. Cross-section of a hollow core slab HC500

It should be noted that in the process of casting hollow core slabs the concrete mix has to meet the specific requirements such as instantaneous ability to maintain the required shape of element without any formwork, to assure high early strength of concrete, high value of modulus of elasticity and low rheological strain. Therefore, conventional common concrete is not applicable as inadequate from the technological reasons. Thus applicable is the relatively high strength concrete, with V0 consistency according to the VeBe method defined in PN-EN 206-1 standard, that corresponds to dump consistency - flow class of fresh concrete: K-1 – according to PN-88/B-06250, in the case of relatively low water/cement ratio. This concrete fast increase of early strength, independently of the ordinary cement usage, must assure. However, the heat treatment of the elements in the first hours after casting is also applied. Both the technological process and the presence of thin-walled elements – hollow slab ribs, which at the width of their cross-section can contain only a few coarse aggregate grains, might cause a significant difference between the real strength of concrete and the value given by standard for this concrete class.

In this paper the experimental results of the concrete tests, used in the industrial production of the hollow core slabs, conducted in the Testing Laboratory for Building Materials and Structures of the Cracow University of Technology, are presented.

## 2. Materials

The tested concrete elements were 320 mm high and were cast during the industrial production of typical hollow core slabs. According to the project documentation of the precast elements, the concrete mix had to meet the requirements of the strength class C50/60. The grading of crushed granite aggregate was 4/16 mm and cement used was CEM I 52.5R. The applied concrete mix had V0 consistency and water/cement ratio = 0.42.

The hollow core slabs were cast on long straining line, in the slip form technology, with application of two-stage casting process. Stage 1 – bottom flange layer of concrete, stage 2 – ribs and top flange layer of concrete. Both stages were executed by a special forming device, which moved along the straining lines, at time intervals not higher than 1 minute. In both layers the concrete

betonu na ściskanie  $f_{cm}$ , mierzonej na kostkach sześciennych, nie mniejszej niż 70% wytrzymałości betonu na ściskanie, po 28 dniach.

Doświadczenia wykonano na wyciętym krótkim fragmencie płyty kanałowej o wysokości 320 mm i długości 1,20 m. Po 28 dniach od betonowania wykonano dwanaście cylindrycznych odwiertów rdzeniowych o średnicy 150 mm [rysunek 1], usytuowanych centralnie wzdłuż osi żeberek. Uzyskano próbki o przekroju podłużnym w kształcie „wioselka”, o stałej grubości w części środkowej, poszerzającego się w obszarach połączenia z półkami. W celu wyeliminowania wpływu ewentualnego braku osiowości próbek, którą mogło spowodować niewielkie odstępstwo od idealnie osiowego umiejscowienia odwiertu w stosunku do osi żeberka, odcięto górne i dolne części żeberka wraz z półkami. Dzięki temu uzyskano betonowe próbki o quasi-prostokątnym przekroju poprzecznym 48x140 mm [wymiary w miejscach o najmniejszej szerokości] oraz o wysokości 140 mm, co dawało smukłość próbki  $\lambda = h/b = 2,91$ . W dalszej części artykułu elementy te nazywane będą próbками wycinkowymi.

W trakcie produkcji płyt kanałowych, z podajnika urządzenia formującego, pobrano dziesięć próbek walcowych ( $\varnothing 150/300$  mm) oraz pięć próbek sześciennych (150x150x150 mm), przeznaczonych do przeprowadzenia badań porównawczych. Beton zagęszczano w formach układając je na wibrująccej powierzchni urządzenia formującego. Następnie próbki dojrzewały pod przykryciem przez około 12 h, w tych samych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych, jak prefabrykaty na torze naciągowym.

### 3. Badania

#### 3.1. Wytrzymałość betonu na rozciąganie

Wytrzymałość na osiowe rozciąganie zbadano na trzech walcach  $\varnothing 150/300$  mm oraz pięciu próbkach wycinkowych. W środku wysokości próbek walcowych wykonano obwodowe nacięcie o głębokości 10 mm, dzięki czemu narzucono miejsce zniszczenia próbki. Z uwagi na małą szerokość nominalną próbek wycinkowych, badano je bez nacięcia kontrolnego.

Stalowe uchwyty, przyklejone do górnej i dolnej powierzchni próbek, zamocowano w osi obciążenia maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roel Z1200, za pomocą dwóch przegubów. Siłę obciążającą zwiększano ze stałą szybkością, wynoszącą 500 N/s w przypadku walców i 120 N/s dla próbek wycinkowych. W czasie badania rejestrowano siłę zrywającą oraz formę zniszczenia próbek. Wszystkie badane próbki uległy zniszczeniu poprzez rozerwanie w przybliżeniu w środku ich wysokości [rysunek 3]. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 1.

#### 3.1. Wytrzymałość betonu na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie badano na trzech walcach  $\varnothing 150/300$  mm, trzech kostkach 150x150x150 mm oraz pięciu



Rys. 2. Miejsca pobierania próbek wycinkowych z fragmentu płyty PK500

Fig. 2. Drilling of cutout samples with quasi-rectangular cross-section from HC500 slab

was compacted by the surface vibrators, placed inside the forming device. In order to accelerate the process of concrete hardening, the elements after casting, were covered with non-permeable foils and their bottom surface was heated at 34°C. Releasing the strands and transfer of the prestressing force on the concrete took place thirteen hours after casting of the elements, with the mean concrete compressive strength  $f_{cm}$ , not lower than 70% of the compressive strength, determined after 28 days of hardening.

The specimens for the experimental tests, were cut as a short section of the hollow core slab, with the nominal height of 320 mm and length of 1200 mm. After 28 days from casting of the elements, twelve cylindrical core-specimens, with the diameter of 150 mm [Fig. 2], were drilled along the axis of the ribs. The obtained samples had the longitudinal oar-shape cross-section, consisting of a web of a constant width, widening at the flange connection zone. In order to eliminate the effect of possible misalignment of the specimens, that might have resulted as an effect of non-axial localization of the drill, relative to the axis of the rib, the top and bottom parts of the rib, together with the flanges, were cut off. As a result, quasi-rectangular specimens, of the cross-section of 48x140 mm [the narrowest dimensions] and the height of 140 mm, with slenderness  $\lambda = h/b = 2.91$  were obtained. These elements are designed as cutout samples.

For the comparative tests, during the production of the hollow core slabs, from the feeder of the forming device, 10 standard cylindrical  $\varnothing 150/300$  mm and 5 cubic 150x150x150 mm specimens were sampled. Specimens of concrete were compacted by placing them



Rys. 3. Formy zniszczenia próbek w badaniu osiowego ściskania na próbkach walcowych (1), kostkowych (2) oraz wycinkowych (3)

Fig. 3. Compressive strength tests – failure mode – for cylindrical (1), cubic (2), and cutout samples (3)

próbkach wycinkowych. Do osiowego ściskania zastosowano uniwersalną maszynę wytrzymałościową Zwick/Roel Z400. Siłę obciążającą zwiększano ze stałą szybkością, wynoszącą 500 N/s w przypadku walców i 120 N/s dla próbek wycinkowych. W czasie badania rejestrowano siłę rozrywającą oraz formę zniszczenia próbek. Wyniki badań zebrane w tablicy 2.

### 3.3. Badanie modułu sprężystości

Moduł sprężystości oznaczono na trzech walcach Ø150/300 mm oraz trzech próbkach wycinkowych. Do określenia siecznego modułu sprężystości przyjęto dolną wartość naprężeń ściskających równą 5 MPa oraz górną wartość równą 1/3 wytrzymałości betonu na ściskanie  $f_{cm}$ , określoną na odpowiednich próbkach. Odkształcenia betonu w przypadku próbek walcowych mierzone za pomocą układu 3 czujników, o bazie pomiarowej 150 mm i dokładności pomiaru  $1 \times 10^{-5}$  mm, równomiernie rozmieszczonych wzdłuż pobocznic walca, równolegle do jego tworzącej. W przypadku próbek wycinkowych zastosowano dwa ekstensometry, usytuowane symetrycznie po obu stronach próbki. Dla każdej z próbek wykonano trzy cykle obciążania i odciążania. Współczynnik sprężystości betonu E określono jako tangens kąta nachylenia siecznej krzywej naprężenie – odkształcenie, w przyjętym zakresie. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 1 / Table 1

WYTRZYMAŁOŚĆ PRÓBEK BETONU NA OSIOWE ROZCIĄGANIE  $f_{ctm}$

RESULTS OF CONCRETE AXIAL TENSILE STRENGTH  $f_{ctm}$  TESTING

	$f_{cti}$ , MPa	ilość próbek,	odchylenie standard.	Współcz. zmienności	$f_{ctm}$ , MPa
walce Ø150/300	3,41	3	0,12	3,5%	<b>3,28</b>
	3,31				
	3,13				
próbki wycinkowe 48x140x140	2,15	5	0,09	4,2%	<b>2,24</b>
	2,32				
	2,12				
	2,26				
	2,36				

Tablica 2 / Table 2

WYTRZYMAŁOŚĆ PRÓBEK BETONU NA OSIOWE ŚCISKANIE  $f_{cm}$

RESULTS OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH  $f_{cm}$  TESTS

	$f_{ci}$ MPa	ilość próbek	odchylenie standard.	współcz. zmienności	$f_{cm}$ MPa
kostki 150x150x150	82,6	3	0,61	0,7%	<b>83,0</b>
	82,7				
	83,9				
walce Ø150/300	69,4	3	1,84	2,6%	<b>71,8</b>
	72,0				
	73,9				
próbki wycinkowe 48x140x140	35,3	5	2,28	6,3%	<b>36,1</b>
	37,7				
	39,4				
	32,7				
	35,5				

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADAŃ MODUŁU SPREŻYSTOŚCI BETONU  $E_{cm}$ CONCRETE MODULUS OF ELASTICITY  $E_{cm}$ 

	$\sigma_u$ MPa	$\sigma_o$ MPa	ilość próbek	$E_{ci}$ GPa	odchylenie standard.	współcz. zmiennosci	$E_{cm}$ GPa
walce Ø150/300	0,50	23,9	3	34,9	0,84	2,3%	<b>36,0</b>
				36,9			
				36,3			
próbki wycinkowe 48x140x140	0,50	3,60	3	29,7	1,27	4,5%	<b>27,9</b>
				27,0			
				27,0			

## 4. Analiza wyników badań

Wyniki badań wytrzymałości betonu, przeprowadzone na normowych próbkach walcowych i sześciennych oraz na próbkach wycinkowych, pobranych z wewnętrznych żeberek płyty PK, pozwalały na sformułowanie następujących uwag:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie próbek walcowych wynosi  $f_{cm.cyl} = 71,8$  MPa, natomiast próbek sześciennych  $f_{cm.cube} = 83$  MPa ( $f_{cm.cyl}/f_{cm.cube} = 0,86$ ). Wyniki te pozwalały na zakwalifikowanie betonu do klasy C60/75;
- średnia wytrzymałość na osiowe rozciąganie próbek walcowych  $f_{cm.cyl} = 3,28$  MPa odpowiada normowej klasie betonu C35/45;
- średnia wartość siecznego modułu sprężystości  $E_{cm.cyl} = 36,0$  GPa odpowiada normowej klasie wytrzymałości betonu C40/50. Uwzględniając zalecany współczynnik redukcyjny o wartości 0,8 dla określania modułu sprężystości betonów na kruszywie granitowym (8), beton ten – z uwagi na wielkość modułu mógłby być zakwalifikowany do klasy C90/105;
- średnia wytrzymałość na osiowe rozciąganie próbek wycinkowych,  $f_{cm.section}$  wyniosła 2,24 MPa i jest mniejsza o 32% od wytrzymałości badanej na walcach;
- średnia wytrzymałość na ściskanie próbek wycinkowych wyniosła  $f_{cm.section} = 36,1$  MPa i jest mniejsza aż o 57% od wytrzymałości uzyskanej na kostkach  $f_{cm.cube}$ , a o 50 % zmierzonej na walcach;
- średni moduł sprężystości próbek wycinkowych,  $E_{cm.section} = 27,9$  GPa jest mniejszy o 23% od modułu oznaczonego na walcach. Po uwzględnieniu współczynnika przeliczeniowego, biorącego pod uwagę rodzaj użytego kruszywa, moduł ten odpowiada normowej klasie betonu C35/45;

Problem różnych wytrzymałości w przypadku próbek różnych kształtów i wymiarów jest znany od bardzo wielu lat i ma bogatą literaturę (1, 7). Najczęściej podawane są empirycznie wyznaczone wartości współczynników przeliczeniowych wytrzymałości na ściskanie, po 28 dniach dojrzewania betonu w przypadku kostek sześciennych oraz walcowych. Nie udało się jednak znaleźć ogólnej zależności określającej wpływ geometrii próbki na

in the forms on the vibrating surface, of the forming device. These specimens were covered with foils and cured during approximately twelve hours, at the same temperature and humidity as the precast elements on the straining lines.

## 3. Experiments

## 3.1. Concrete tensile strength

The tensile strength, on three cylindrical specimens and five cutout samples was tested. In the middle of the height of cylindrical specimens, a circumferential indentation deep of 10 mm was made, which imposed the localization of the sample failure. Due to the small nominal width of the cutout/sliced samples, they were tested without this control indentation.

The tensile strength was measured using the universal testing machine Zwick/Roel Z1200. The steel clamps, glued to the top and bottom surfaces of the specimens, were fixed in the axis of loading, by means of two hinges. The force was applied with the constant crosshead speed of loading of 500 N/s for cylindrical specimens and 120 N/s for cutout samples. During the tests, the breaking force and failure mode were recorded. All the tested specimens were damaged by rupture in the middle height zone [Fig. 3]. The results of the tests are presented in Table 1.

## 3.2. Concrete compressive strength

The compressive strength, on three cylindrical, three cubic specimens and five cutout samples were tested. The compressive strength were tested on the universal testing machine Zwick/Roel Z400. The force was applied in a static way, with a constant speed of loading of 500 N/s for cylindrical specimens and 120 N/s for cutout samples. During the tests, the breaking force and manner of damage were recorded [Fig. 3]. The test results are presented in Table 2.

zmierzoną wytrzymałość betonu. Neville (6) zaproponował ogólny wzór, pozwalający na obliczenie wytrzymałości na ściskanie próbki betonu o dowolnym kształcie na podstawie wytrzymałość próbki sześciennnej o długości boku 150 mm:

$$\frac{R_c}{R_{15}} = 0,56 + 0,697 \left( \frac{d}{\frac{V}{6h} + h} \right)$$

gdzie:  $d$  jest długością boku próbki prostopadłoszciennej lub średnią całą podstawy walca,  $V$  jest objętością próbki, a  $h$  jest jej wysokością.

Stosując ten wzór do analizy wyników uzyskanych w przypadku próbek wycinkowych, uzyskuje się współczynnik przeliczeniowy wynoszący około 0,80, podczas gdy w badaniach uzyskano stosunek mniejszy od 0,50. Zatem, można stwierdzić, iż to nie tylko proporcje wymiarów próbki zdecydowały o tak znacznym zmniejszeniu wytrzymałości betonu.

Zmniejszenie wytrzymałości betonu na rozciąganie, zmierzone po 28 dniach, może występować w przypadku próbek betonowych poddawanych przyspieszonemu dojrzewaniu w podwyższonej temperaturze. Betony poddawane obróbce termicznej są narażone na powstawanie mikrouszkodzeń, wywołanych naprężeniami termicznymi i skurczowymi (5). Defekty te powstają w wyniku dużych różnic rozszerzalności cieplnej poszczególnych składników betonu, a także rozwoju niestacjonarnych pól temperatury i wilgotności, będących efektem wymiany ciepła i masy (wody) z otoczeniem.

Przyczyn zmniejszonej wytrzymałości betonu w elemencie cienkościennym w stosunku do wytrzymałości betonu wykonanego z tej samej mieszanki, lecz formowanego w postaci normowych próbek sześciennych lub walcowych, można doszukiwać się również w dużej niejednorodności materiału na przekroju o szerokości zaledwie 48 mm. Powodem zmniejszenia wytrzymałości betonu w przypadku badania próbek wyciętych z żeberka o bardzo niewielkim przekroju może być niejednorodne rozmieszczenie ziaren kruszywa. Poszczególne próbki mogą zawierać bardzo różne zawartości kruszywa, szczególnie grubego, a także różnić się zawartością matrycy cementowej.

Przy założeniu zasady płaskości przekrejów Bernoulliego średnie naprężenia rozciągające w przekrojach 1-1 i 2-2, pokazanych na rysunku 4, mogą być bardzo zróżnicowane. O wytrzymałości takiej próbki na rozciąganie decyduje wytrzymałość słabszego z tych przekrejów – w rozpatrywanym przypadku wytrzymałość przekroju 1-1.

W stanie osiowego ściskania siły wewnętrzne w przekroju rozkładają się proporcjonalnie do sztywności poszczególnych materiałów tworzących kompozyt betonowy. Ziarna kruszywa grubego przejmują największe siły ściskające. Ukośny przebieg sił pomiędzy ziarnami kruszywa, zależny od ich względnego rozmieszczenia, oznacza że oprócz głównych składowych sił równoległych do kierunku obciążenia występują również składowe prostopadłe do tego kierunku. W próbkach, w których znajduje się znaczna ilość ziaren kruszywa grubego, wpływ składowych sił prostopadłych

### 3.3. Modulus of elasticity

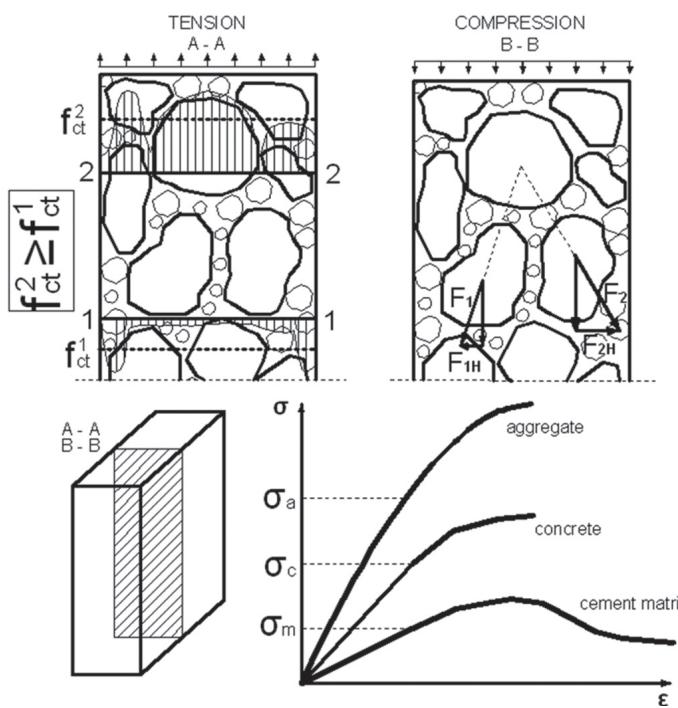
The modulus of the elasticity on three cylindrical specimens and three cutout samples were tested. To determine the secant modulus of elasticity, the lower value of compressive stress of 5 MPa and upper value of 1/3 of the compressive strength, of cylindrical concrete specimens  $f_{cm}$ , were adopted. The strains of the concrete in cylindrical specimens were measured by a set of three parallel extensometers, with the measuring base of 150 mm, placed along the side-surface of the cylinder. In cutout samples two extensometers, placed symmetrically on both sides of the specimen, were applied to measure the strains. Each of the specimens was subjected to three cycles of loading and unloading. The modulus of elasticity E of concrete was determined as a tangent of secant inclination angle for the stress-strain relationship, in the assumed range. The results of the tests are shown in Table 3.

### 4. Analysis of the tests results

From the results of concrete strength, tested on standard cylindrical and cubic samples and on cutout samples taken from internal ribs of hollow core slab, the following comments can be taken:

- mean compressive strength of concrete obtained on the cylindrical samples equals  $f_{cm.cyl} = 71.8$  MPa, while on the cubic samples is  $f_{cm.cube} = 83$  MPa [ $f_{cm.cyl}/f_{cm.cube} = 0.86$ ]. On the basis of these results the tested concrete can be rated to strength class C60/75;
- mean tensile strength of concrete, measured on the cylindrical specimens, was  $f_{ctm.cyl} = 3.28$  MPa corresponds to the standard concrete strength class C35/45;
- mean value of the secant modulus of elasticity of  $E_{cm.cyl} = 36$  GPa corresponds to the standard concrete strength class C40/50. Taking account of the recommended reduction factor equal 0.80 for the determination of the modulus of elasticity of the granite aggregate concrete (8), tested concrete – due to the value of E – might be qualified to the strength class C90/105;
- mean tensile strength of concrete measured in axial tensile tests of cutout samples is  $f_{ctm.sec.} = 2.24$  MPa, which is 32% lower than the strength tested on cylindrical specimens;
- mean compressive strength of concrete measured on cutout samples equals  $f_{cm.sec.} = 36.1$  MPa, which is 57% lower than the strength on cubic samples  $f_{cm.cube}$  and 50% lower than the value found on cylindrical specimens;
- mean modulus of elasticity found from testing of cutout samples,  $E_{cm.sec.} = 27.9$  GPa is 23% lower than the modulus measured on cylindrical specimens. After application of recalculation factor, taking into account the type of aggregate, this modulus corresponds to the concrete strength class of C35/45.

The issue of strength relationships between concrete samples of different shapes and sizes is recognized from many years and there is comprehensive literature concerning this problem (1, 7). The most often given proposition are empirically determined



Rys. 4. Schemat rozkładu naprężeń w betonowym przekroju cienkościennym poddany osiowemu ściskaniu i osiowemu rozciąganiu

Fig. 4. The stress distribution in concrete thin-walled cross-section under axial compression and tension

do kierunku obciążenia jest znikomy, ponieważ mają one różne zwroty i w dużym stopniu wzajemnie się równoważą. W próbce o bardzo małej szerokości możliwy jest taki układ ziaren kruszywa, że składowe prostopadłe do kierunku obciążenia będą powodować poprzeczne rozrywanie i przyczyniać się do wcześniejszego zniszczenia elementu betonowego [przekrój B-B na rysunku 4].

## 5. Wnioski

Uzyskane w pracy wyniki doświadczalne pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków: wytrzymałości strunobetonowych płyt kanałowych oraz ich odkształcalność mogą znacznie różnić się od właściwości normowych, przypisanych danej klasie wytrzymałości betonu. Dotyczy to przede wszystkim cienkich żeberek w płytach o bardzo heterogenicznej strukturze, poddanych oddziaływaniu współzależnych pól cieplno-wilgotnościowych, przy ich formowaniu na podgrzewanych stalowych torach naciągowych.

## Literatura / References

1. Budownictwo betonowe, t. I, cz. 2 Technologia betonu, Arkady, Warszawa 1972.
2. A. van Acker, Precast concrete technology for building structures in Europe, International Seminar Prefabrication in Europe, pp. 15-30, Kraków 2007.
3. W. Derkowski, M. Surma, Complex Stress State in Prestressed Hollow Core Slabs, in: Monografia 478 Recent Advances in Civil Engineering: Building Structures, Cracow University of Technology 2015.

values of recalculation factors for concrete compressive strength, measured on the cubic or cylindrical samples, after 28 days of hardening. Till now, the satisfying general relationship between sample geometry and concrete strength does not exist. Neville (6) proposed relatively general formula, allowing the recalculation of the concrete compressive strength for any shape of samples to the strength for the cubic 150 mm sample:

$$\frac{R_c}{R_{15}} = 0.56 + 0.697 \left( \frac{d}{\frac{V}{6h} + h} \right)$$

where:  $d$  is the side length of the rectangular prism sample or the base diameter of the cylindrical sample,  $V$  is the volume and  $h$  is the height of the sample.

When applying the aforementioned formula to the analysis of the results found experimentally, the recalculation factor should be approximately 0.80. The recalculation factor obtained experimentally is higher than 0.50. Therefore, it could be asserted that not only the dimension of the samples is influencing this lower concrete strength.

Lower tensile concrete strength, determined after 28 days of hardening, was found in the case of heat treated concrete specimens. The tensile strength of concrete depends, above all, on the content of C-S-H gel and w/c ratio. However, it is known that steam cured concretes can show lower strength after longer period than the concrete which is hardening in normal condition. It is a hypothesis that the heat treatment of concrete can cause the formation of the micro-cracks due to the temperature gradients (5). These failures can also be induced by the difference in thermal expansion of various components of concrete and the development of nonstationary temperature and humidity fields, being the effect of heat and mass (water) transfer with the environment.

The reasons of the concrete strength reduction in the thin-walled cross sections in comparison to concrete strength of the concrete from the same mix, but casted in the form of standard cylindrical or cubic samples, could be attributed to the major heterogeneity of the material at the width of the cross-section, not wider than 48 mm. Additionally the causes of the reduction of the concrete strength in the samples cut out from the narrow-width cross-section ribs could be the heterogeneous distribution of coarse aggregate grains in the specimen. Individual cross-sections along the height of the sample could have a drastically different proportion of the aggregate/binder ratio. The presence of cross-sections with the higher concentration of coarse aggregate and the presence of the cross-sections with a high concentration of cement matrix are likely to occur. Under the assumption of Bernoulli's principle of flat sections, the mean tensile stresses in cross-sections 1-1 and 2-2, shown in Fig. 4, might be significantly different. The tensile strength of such specimen is determined by the strength of the weakest of these cross-sections – in the considered example – the strength of the section 1-1.

4. K. Elliott, Multi-Storey Precast Concrete Framed Structures, Wiley-Blackwell 2014.
5. K. Flaga, K. Wilk, O spadkach wytrzymałości naparzanego betonu, XX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, 1974.
6. A. M. Neville, The influence of size of concrete test cubes on mean strength and standard deviation, Mag. Concr. Res., **8**, 23 (1956).
7. K. Piwowarski, K. Flaga, Wpływ niektórych czynników na relacje pomiędzy wytrzymałościami betonu określonymi na próbkach o różnych kształtach i wymiarach, XX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, 1974.
8. A. Seruga, St. Kańska, T. Lisowicz, Moduł sprężystości betonów na kruszywie granitowym w świetle badań doświadczalnych, Czasopismo Techniczne 4-B/2012.

In the axial compression state, the forces in the cross-section of concrete element are distributed proportionally to the rigidity of the individual materials, constituting the concrete composite. Coarse aggregate grains transfer the biggest compressive forces. The slanted transmission of forces between the aggregate grains, dependent on their relative distribution, it means that apart from the principal components of forces parallel to the direction of loading, the perpendicular components will also occur. In the specimens, in which cross-section a significant content of coarse aggregate is present, the influence of the force components perpendicular to the direction of loading is negligible, due to their different senses and to the major degree they compensate one another. In the narrow-width specimens, such a distribution of aggregate grains may occur that the force components perpendicular to the direction of loading will cause the transverse bursting and lead to premature failure of concrete element [cross-section B-B, Fig. 4].

## 5. Conclusions

On the basis of the experimental results the following conclusions can be drawn: the strength and elasticity of the pretensioned hollow core concrete slabs might be significantly different from the so-called "standard" strength assigned to a specific class of concrete. This problem refers particularly to the narrow ribs in the slabs of heterogeneous structure, subjected to the influence of interrelated hydrothermal fields, during the process of casting on heated precast stands.