

Sprężystość lekkich betonów kruszywowych modyfikowanych dodatkiem włókien stalowych

Elasticity of lightweight aggregate concrete modified with steel fibres

1. Wstęp

Lekkie betony kruszywowe, pomimo swych licznych zalet, charakteryzują się gorszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu z betonami zwykłymi tej samej klasy wytrzymałości, a mianowicie: niższym modułem sprężystości, niższą wytrzymałością na ścinanie, zginanie i rozciąganie oraz większą kruchością, co manifestuje się eksplozywnym charakterem zniszczenia. Pogorszenie tych właściwości wskutek zastosowania kruszywa lekkiego jako wypełniacza w betonie jest tym większe im wyższa jest jego wytrzymałość na ściskanie. Ponadto betony lekkie mogą wykazywać większy skurcz, wynikający zarówno z mniejszej sztywności porowatych ziaren kruszywa jak i z reguły większych zawartości cementu.

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego do lekkich betonów kruszywowych może zatem przynieść poprawę wymienionych powyżej charakterystyk betonu lekkiego. Z analizy literatury tematycznej wynikają jednak istotne rozbieżności dotyczące wpływu dodatku włókien stalowych na kształtowanie właściwości betonu. W przypadku oceny modułu sprężystości mają one charakter nie tylko ilościowy, ale i jakościowy.

2. Moduł sprężystości lekkich betonów kruszywowych

Moduł sprężystości betonu, będącego kompozytem dwufazowym, uzależniony jest od modułów sprężystości obu faz (kruszywa i matrycy), ich udziałów objętościowych i przyczepności. Oczywiście zatem wydaje się fakt, iż moduł sprężystości betonów z kruszywem porowatym, a więc o niższym module sprężystości, jest niższy w porównaniu z betonami zwykłymi. W zależności od składu betonów lekkich ich moduł sprężystości stanowi około 50 do 75% wartości wyznaczanych dla betonów zwykłych o identycznej wytrzymałości (1, 2). Inne pozycje literatury wskazują na jeszcze niższe jego wartości, średnio na poziomie ok. 25 do 50% wartości uzyskanych dla betonów żwirowych (3).

1. Introduction

Lightweight aggregate concrete (LWAC), despite its numerous advantages, is characterised by lower mechanical properties in comparison with normal concrete of the same strength class (NWAC), namely: lower modulus of elasticity, lower shear, tensile and flexural strength, as well as higher brittleness that often means explosive nature of destruction. Reduction of these characteristics, as a result of application of lightweight aggregate as a filler in concrete, is more pronounced in the case of LWAC with higher compressive strength. Moreover, lightweight aggregate concrete may reveal higher shrinkage, resulting from both: less stiffness of porous aggregate grains and usually higher cement content.

Therefore addition of dispersed reinforcement to lightweight aggregate concrete may cause enhancement of mentioned above characteristics of LWAC. Nevertheless, the analysis of literature shows essential discrepancies concerning the influence of steel fibres addition on concrete properties. In the case of modulus of elasticity this divergence is not only of quantitative nature but qualitative one.

2. Modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete

Modulus of elasticity of concrete, being a two-phase composite material, is dependent on modulus of elasticity of both components (aggregate and matrix), their volume shares and their adhesion. Therefore it seems obvious, that modulus of elasticity of concrete with porous aggregate, thus aggregate of low modulus, is lower in comparison with normal weight concrete. Depending on composition of LWAC its modulus of elasticity is about 50 to 75% of typical values for NWAC of the same strength (1, 2). Others papers give even lower values, on average the level of about 25 to 50% of this modulus for gravel concrete (3).

In the case of lightweight aggregate concrete its modulus of elasticity to a large degree is determined by elastic properties of ap-

W przypadku lekkich betonów kruszywowych moduł sprężystości w głównej mierze zdeterminowany jest właściwościami sprężystymi zastosowanego kruszywa, których wpływ, ze względu na bardzo dobrą przyczepność obu składników, okazuje się być bardziej istotny niż dla betonów zwykłych. Z uwagi natomiast na bardziej zbliżone wartości modułów obu składników betonów lekkich, udział objętościowy kruszywa ma tu mniejsze znaczenie niż w przypadku betonów zwykłych. Z drugiej jednak strony wpływ proporcji między tymi składnikami na moduł sprężystości betonów lekkich jest mniej jednoznaczny niż w przypadku betonów z kruszywami zwykłymi. Podczas gdy zwiększenie w jednostce objętościowej betonu zawartości kruszywa zwykłego o odpowiedniej przyczepności zawsze wpływa na wzrost jego modułu sprężystości, o tyle dla betonów lekkich, zależnie od wzajemnych relacji modułów sprężystości obu faz, wzrost udziału kruszywa lekkiego może nie wywołać żadnej zmiany modułu, spowodować jego spadek (w szczególności w betonach lekkich wysokiej wytrzymałości), a nawet nieznaczny wzrost (co ma jednak niezwykle rzadko miejsce np. gdy zastosowano kruszywo lekkie wysokiej wytrzymałości i bardzo słabą matrycę).

Ze względu na przedstawione powyżej mechanizmy kształtowania modułu sprężystości lekkich betonów kruszywowych, szacowanie jego wartości najczęściej uzależnia się nie tylko od samej wytrzymałości na ściskanie, jak z reguły ma to miejsce w przypadku betonów zwykłych, ale i gęstości betonu. Przykładowe wzory na obliczanie modułu Younga betonów lekkich przedstawiono poniżej.

Dla betonów lekkich wysokich wytrzymałości (LBWW):

$$E_c = 1.344\sqrt[3]{f_c^2} \quad (4) \quad [1]$$

$$E_c = 1.19\sqrt[3]{f_c^2} \quad (5) \quad [2]$$

$$E_c = 9.5f_c^{0.3}(\rho_c / 2400)^{1.5} \quad (6) \quad [3]$$

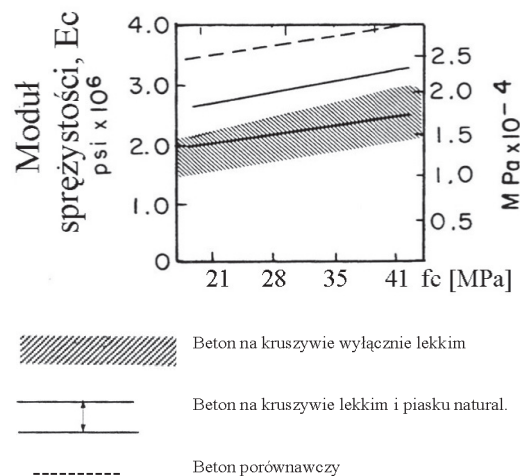
Dla betonów lekkich umiarkowanych wytrzymałości (LB):

$$E_c = \rho_c^{1.5} 0.043\sqrt{f_c} \quad (1) \quad [4]$$

$$E_{lc} = E_{nc}(\rho_c / 2200)^2 \quad (7) \quad [5]$$

gdzie: $E_{nc} = 9500(f_{ck} + 8)^{1/3}$ [EC2] moduł betonów zwykłych tej samej wytrzymałości, f_c – wytrzymałość betonu na próbkach walcowych.

Przy obliczaniu i projektowaniu konstrukcji betonowych, żelbetonowych i sprężonych z betonów lekkich kruszywowych polska norma PN-B-03263: 2000 (8) zaleca również szacowanie wartości modułu sprężystości betonu z uwzględnieniem wytrzymałości (klasy wytrzymałości) betonu oraz jego gęstości (klasy gęstości), z tym, że odwołuje się nie do wzoru, a do danych stabilizowanych. Norma jednak zastrzega, że podane wartości należy traktować jako przybliżone, a dokładne określenie modułu sprężystości wymaga przeprowadzenia badań. Takie założenie wydaje się zasadne, co potwierdzają badania modułu Younga realizowane



Rys. 1. Zależność modułu sprężystości od wytrzymałości na ściskanie dla lekkich betonów kruszywowych (1)

Fig. 1. Relationship between modulus of elasticity and compressive strength for lightweight aggregate concrete [1]

plied aggregate. The influence of these properties, for the sake of perfect adhesion of aggregate and cement matrix, turns out to be more essential than for normal concrete. However owing to more similar values of modulus of elasticity for these two components of LWAC, the volume content of aggregate is of less importance than in the case of NWAC. On the other hand the influence of volume proportion between the both components on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete is less important than for normal weight concrete. While increasing of classic aggregate volume in concrete always results in the increase of its modulus of elasticity, in the case of lightweight concrete higher aggregate content, depending of relation of both components' modulus of elasticity, may have no impact on concrete modulus, may cause its decrease (in particular for high strength concrete), or even may result in its certain increase. The latter case takes place very seldom i.e. when lightweight aggregate of high strength is applied in concrete with very poor matrix.

Taking into consideration presented above mechanisms of modeling of modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete, estimation of its values the most often is dependent not only on compressive strength, as it is usually for normal concrete, but additionally of concrete density. Formulae for estimation of Young's modulus of elasticity of structural lightweight concrete are presented below:

For high strength lightweight aggregate concrete (HSLWAC):

$$E_c = 1.344\sqrt[3]{f_c^2} \quad (4) \quad [1]$$

$$E_c = 1.19\sqrt[3]{f_c^2} \quad (5) \quad [2]$$

$$E_c = 9.5f_c^{0.3}(\rho_c / 2400)^{1.5} \quad (6) \quad [3]$$

For lightweight aggregate concrete of moderate strength (LWAC):

na betonach lekkich z różnymi kruszywami. Przykładowo dla betonów z kruszywem lytag wyznaczone wartości modułów sprężystości dla betonów różnych klas gęstości i wytrzymałości okazują się być istotnie niższe (9) (nawet o 10 GPa) niż wynika to z PN-B-03263: 2000.

3. Wpływ dodatku włókien stalowych na właściwości betonu

Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych w ogólnym przypadku ma na celu opóźnienie momentu pojawienia się pierwszych rys w betonie pod obciążeniem, redukcję długości i szerokości powstających rys oraz ograniczenie ich propagacji. Korzystny wpływ wprowadzenia zbrojenia rozproszonego w strukturę matrycy betonu w szczególności uwidacznia się poprzez: redukcję skurczu, poprawę charakterystyk pęknięcia, wzrost wytrzymałości na zginanie, rozciąganie, ścinanie, skręcanie i zmęczenie, wzrost odporności na uderzenia, wzrost mrozoodporności i ognioodporności oraz obniżenie ścieralności. Jednoznaczna ocena ilościowa wpływu fazy włóknistej na wymienione powyżej parametry jest problematyczna z uwagi na stosowanie przez badaczy włókien w różnych ilościach oraz o bardzo zróżnicowanych charakterystykach zarówno materiałowych jak i geometrycznych do betonów o nieporównywalnych składach.

Analiza obszernej literatury dotyczącej wpływu włókien stalowych na moduł sprężystości betonu oraz wytrzymałość na ściskanie wykazała istotne rozbieżności. Zastosowanie włókien stalowych, zależnie od ich zawartości i charakterystyk geometrycznych, najczęściej nie powoduje zmian tych parametrów (pomimo istotnie wyższego modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie stali w porównaniu z betonem) Przy większych zawartościach włókien (2-3%) w niektórych przypadkach obserwuje się wzrost modułu sprężystości. Często jednak pojawiają się również informacje o możliwym spadku wytrzymałości i modułu sprężystości betonów z dodatkiem włókien stalowych, szacowanym na poziomie nawet 10 do 30% (10). W tych przypadkach obniżenie tych charakterystyk prawdopodobnie należy tłumaczyć niewłaściwą technologią wykonania fibrobetonu, niezapewniającą jego szczelnej struktury (np. wskutek spadku urabialności, będącego wynikiem przekroczenia pewnej granicznej zawartości włókien lub zbyt małej dawki plastyfikatora). Ponieważ zastosowanie fazy włóknistej do lekkich betonów kruszywowych jest bardziej efektywne z uwagi na poprawę niektórych charakterystyk wytrzymałościowych w porównaniu z betonami zwykłymi (11), może okazać się, że również ze względu na moduł sprężystości będzie ono korzystniejsze dla betonów lekkich.

4. Badania

Celem przeprowadzonych badań było ustalenie wpływu dodatku zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych na kształtowanie modułu sprężystości lekkich betonów kruszywowych.

$$E_c = \rho_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f_c} \quad (1) \quad [4]$$

$$E_{lc} = E_{nc} (\rho_c / 2200)^2 \quad (7) \quad [5]$$

where: $E_{nc} = 9500(f_{ck} + 8)^{1/3}$ [EC2] is modulus of elasticity of normal concrete of the same strength, f_c is compressive strength of concrete determined on cylindrical specimens.

Polish Standard PN-B-03263: 2000 (8) for analysis and structural design of plain, reinforced and prestressed concrete structures also recommends estimation of the modulus of concrete elasticity considering both: its strength (strength class) and its density (density class). The estimated values are not generated from any formula but they are presented in the table form. Nevertheless the standard stipulates that these values should be treated as approximated ones and accurate determination of modulus of elasticity requires tests. This approach seems to be legitimated that is proved in some researches on Young's modulus carried out on lightweight concrete with various type of aggregate. For example: Lytag concretes of different strength and density class are characterized by considerable lower modulus of elasticity (even by 10 GPa (9)) than it is indicated in PN-B-03263: 2000.

3. The influence of fibre reinforcement on concrete properties

Generally, the main purpose of application of dispersed reinforcement in the form of steel fibres is to retard the moment of the first cracks appearance in concrete under load, to reduce their length and opening width and to limit their propagation. Particularly the advantageous influence of fibres addition to matrix structure demonstrated by: shrinkage reduction, enhancement of fracture parameters, increase of tensile, flexural, shear, torsion and fatigue strength, increase of impact, abrasion, freeze and thaw and fire resistance. Nevertheless quantitative assessment of dispersed reinforcement influence on discussed above parameters is questionable owing to application by researchers various addition of fibres of very different material and geometrical characteristics to concretes of incomparable compositions.

The analysis of extensive bibliography concerning the impact of steel fibres on concrete modulus of elasticity and on its compressive strength revealed crucial divergence. Application of steel fibres, depending on their content and geometrical characteristics, usually does not cause any changes of these parameters, despite considerably higher modulus of elasticity and strength of steel in comparison with concrete. Sometimes at higher fibre content (2-3%) some researchers achieved a certain enhancement of modulus and strength. Nevertheless, there are also data on possible decrease of these parameters, estimated even as high as 10 up to 30% (10), as a result of fibres application. In these cases the losses of mechanical characteristics should be probably explained by improper technology of fibre reinforced concrete production, which does not guarantee its compact structure (i.e. resulting from workability loss connected with too high fibre content or/and too

W ramach zrealizowanego programu badawczego wykonano dwie serie betonów o zróżnicowanych poziomach gęstości, zakładanych na poziomie 1600 oraz 1700 kg/m³, i wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania w zakresie 35 – 40 MPa i 45 – 50 MPa. Jako zbrojenie rozproszone do badań wytypowano włókna Dramix o haczykowatych zakończeniach, długości 50 mm i średnicy 0,75 mm ($l/d = 67$). Zbrojenie zastosowano w ilościach: 0; 30; 45 i 60 kg/m³, które odpowiadają zawartościom na poziomie 0; 0,4; 0,6 oraz 0,8% objętości betonu. Pozostałe składniki wykonanych betonów to: kruszywo popiołoporytowe Pollytag frakcji 4 – 8 mm, cement CEM I 42,5 R, piasek naturalny, woda oraz superplastyfikator. Dobór dawki domieszki upłynniającej (od 0 do 1,0 % masy cementu) zdeterminowany był zapewnieniem odpowiedniej urabialności, weryfikowanej doświadczalnie w ramach zarobów próbných. Składy oraz parametry charakteryzujące poszczególne mieszanki betonowe przedstawiono w tablicy 1.

Po 28 dniach dojrzewania w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz wilgotności $95 \pm 5\%$ dla wykonanych betonów przeprowadzono badania gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie według odpowiednich procedur normowych: PN-EN 12390-7 i PN-EN 12390-3. Zgodnie z przyjętymi w programie badawczym założeniami, wykonane betony kontrolne serii I (I0) oraz II (II0) charakteryzowały się istotnie zróżnicowanym poziomem gęstości (w stanie suchym odpowiednio 1580 kg/m³ i 1710 kg/m³) oraz wytrzymałości na ściskanie betonów $f_{cm,cube}$ (odpowiednio 39,0 MPa i 47,5 MPa). Szczegółowo wyniki badań wytrzymałościowych omówiono w (11).

Badania modułu sprężystości wykonano zgodnie z Instrukcją ITB 194/98 po 240 dniach od wykonania próbek. Tak długi termin badania wynikał z potrzeby wyeliminowania wpływu czasu badania próbek na wynik pomiaru. Wyniki badań gęstości próbek w stanie wilgotnym, modułu sprężystości oraz wytrzymałości na ściskanie podano w tablicy 2.

Analiza uzyskanych wyników potwierdziła wykazany wcześniej (11) brak wpływu dodatku włókien stalowych w badanym zakresie ich zawartości na wytrzymałość na ściskanie, bez względu na jej poziom. Średnie wartości wytrzymałości badanych betonów $f_{cm,cyl}$ dla serii I i II wynosiły odpowiednio 45,0 MPa przy dyspersji wyników $\pm 2,0$ MPa oraz 49,5 MPa przy dyspersji wyników $\pm 3,0$ MPa. W badaniach potwierdził się również fakt o braku wpływu efektu skali w próbie wytrzymałości na ściskanie tego typu betonów. Dla poszczególnych betonów stosunek wytrzymałości badanej na próbkach walcowych do określanej na próbkach sześciennych $f_{cm,cyl}/f_{cm,cube}$ wynosił $1,00 \pm 0,04$, średnio dając wartość 1,00. Przyrost wytrzymałości w czasie ($f_{cm,240-fcm,28}/f_{cm,28}$) okazał się znacznie istotniejszy w przypadku betonów serii I (17%) niż serii

Tablica 1 / Table 1

SKŁADY ORAZ PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE WYKONANE BETONY
COMPOSITIONS AND PARAMETERS OF CONCRETES

Seria Series	Oznaczenie Concrete	Składniki/ Components, kg/m ³					Parametry/ Parameters		
		S* F*	C*	K* LWA*	P* S*	W*	W/C*	P/C* S/C*	k/m* lwa/m*
IS IF	I0	0	345	765	414	190	0,55	1,20	1,34
	IS1/IF1	30							
	IS2/IF2	45							
	IS3/IF3	60							
IIS IIF	II0	0	446	700	458	164	0,37	1,03	1,16
	IIS1/IIF1	30							
	IIS2/IIF2	45							
	IIS3/IIF3	60							

* S – włókna stalowe, C – cement, K – kruszywo lekkie, P – piasek naturalny, W – woda, k/m – stosunek objętościowy kruszywa lekkiego i matrycy.
* F – steel fibres, C – cement, LWA – lightweight aggregate, S – natural sand, W – water, lwa/m – volume lightweight aggregate ratio to matrix ratio

less plasticizer content). Taking into consideration that application of dispersed reinforcement to lightweight aggregate concrete in comparison with normal concrete is more effective in improvement of some strength characteristics (11), it may also mean more advantageous influence on modulus of elasticity.

4. Research programme

The aim of the realised research programme was to estimate the influence of dispersed reinforcement addition in the form steel fibres on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete.

The investigation comprises two series of concretes of various density (in the range 1600 to 1700 kg/m³) and of various strength (between 35 – 40 MPa and 45 – 50 MPa after 28 days of curing). Hook ended steel fibres (Dramix) of 50 mm length and 0.75 mm diameter ($l/d = 67$) was used as a dispersed reinforcement. These fibres were applied in amounts of: 0; 30; 40 and 60 kg/m³, which correspond with volume shares of: 0; 0.4; 0.6 and 0.8% respectively. Other concrete components of concrete were as follows: sintered fly ash aggregate Pollytag of 4 – 8 mm size, natural sand, cement CEM I 42.5R, water and superplasticizer. Addition of superplasticizer (from 0 up to 1.0% of cement mass) was selected to achieve suitable workability, verified in trials. Compositions and corresponding parameters characterising concrete mixtures are presented in Table 1.

After 28 days of curing in temperature $20 \pm 2^\circ\text{C}$ and RH $95 \pm 5\%$ tests of density and compressive strength were carried out according to standard: PN-EN 12390-7 and PN-EN 12390-3. In accordance to accepted assumptions, reference concretes of series I (I0) and II (II0) were characterized by essentially different densities (in dry state 1580 kg/m³ and 1710 kg/m³) and compres-

Tablica 2 / Table 2

ŚREDNIE WARTOŚCI GĘSTOŚCI, MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI ORAZ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE
MEAN DENSITY, MODULUS OF ELASTICITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETES

Seria Series	Oznaczenie Concrete	Średnia gęstość w stanie wilgotnym Mean moist density, d_{cm} , kg/m ³	Średni moduł sprężystości Mean modulus of elas- ticity, E_{cm} , GPa	Średnia wytrzymałość na ściskanie Mean compressive strength	
				$f_{cm,cyl}$, MPa	$f_{cm,cube}$, MPa
IS IF	I0	1760	15,4	44,5	46,0
	IS1/IF1	1770	15,9	43,0	42,0
	IS2/IF2	1800	14,9	46,5	48,5
	IS3/IF3	1800	16,0	46,5	46,0
IIS IIF	I10	1840	18,3	50,5	50,0
	IIS1 IIF1	1870	18,0	47,0	47,0
	IIS2 IIF2	1900	17,0	48,0	46,5
	IIS3 IIF3	1910	18,1	52,5	50,5

II (zaledwie 3%). Fakt ten należy tłumaczyć ograniczającym wpływem kruszywa, które osłabia zdolność betonu do podwyższenia powyżej pewnej granicy swojej wytrzymałości wskutek wzrostu wytrzymałości matrycy.

Dla betonów serii I średnia wartość modułu sprężystości wyniosła 15,6 GPa przy dyspersji wyników w zakresie $\pm 0,7$ GPa, a dla betonów serii II 17,9 GPa przy dyspersji wyników w zakresie $\pm 0,9$ GPa. W obu przypadkach rozrzut wyników wynoszący do $\pm 5\%$ jest mniejszy niż rozrzut poszczególnych wyników pomiarów modułu sprężystości od średniej dla poszczególnych betonów (do $\pm 10\%$). Zatem, podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, wpływ zastosowanego dodatku włókien stalowych w ilości do 60 kg/m³, pomimo jego wielokrotnie większego modułu sprężystości ($E_s \approx 200$ GPa) w porównaniu z betonem, okazał się nieistotny.

Pomierzone wartości modułu sprężystości są nie tylko niższe (o około 50%) od przewidywanych przez PN-B-03264:2002 (12) dla betonów zwykłych o tym samym poziomie wytrzymałości ($E_{cm} = 32$ GPa dla B37, $E_{cm} = 34$ GPa dla B45), ale i niższe (o 20%) od wartości oszacowanych dla betonów lekkich na podstawie PN-B-03263:2000 (8) ($E_{cm} = 19,2$ GPa dla LB37 i $\rho_c = 1600$ kg/m³ oraz $E_{cm} = 22,4$ GPa dla LB45 i $\rho_c = 1700$ kg/m³). Uzyskane wartości modułu sprężystości dla betonów serii I i II są natomiast wyższe średnio o około 25% od wartości średnich podanych przez (9) ($E_{cm} = 12,0$ GPa dla LB37 i $\rho_c = 1600$ kg/m³; $E_{cm} = 14,6$ GPa dla LB45 i $\rho_c = 1700$ kg/m³) dla betonów z kruszywem lytag, na licencji którego produkowane jest kruszywo pollytag zastosowane do omawianych betonów. Oszacowanie modułów sprężystości badanych betonów lekkich w oparciu o przytoczone wzory [1–5] dają porównywalne niedokładności rzędu do $\pm 20\%$. Wyjątek stanowi równanie [3], dla którego wartości szacowane modułu Younga są większe jedynie o 2% w stosunku do badanych, chociaż z założenia równanie to przewidziane jest dla betonów o wytrzymałości powyżej 60 MPa.

sive strength $f_{cm,cube}$ (39.0 MPa i 47.5 MPa respectively). Strength results are discussed in details in (11).

Tests of modulus of elasticity were performed according to Instruction ITB 194/98 after 240 days from specimens moulding. Such a long age of tests resulted from necessity of elimination of time influence on measurements. The results of density (in damp state), modulus of elasticity and compressive strength are given in Table 2.

The analysis of obtained results proved the lack of steel fibres addition influence on compressive strength, regardless of its level. Mean values of compressive strength $f_{cm,cyl}$ were 45.0 ± 2.0 MPa and 49.5 MPa ± 3.0 MPa, respectively for concrete series I and II. The results of research have shown, that in the case of lightweight concrete there is no scale effect in compression tests. For particular concretes the relation between strength tested on cylindrical specimens and cube one $f_{cm,cyl}/f_{cm,cube}$ is 1.00 ± 0.04 . The strength gain with time $(f_{cm,240} - f_{cm,28})/f_{cm,28}$ was much more important in the case of series I (17%) than for series II (merely 3%). This fact should be explained by the influence of aggregate which limits concrete ability to strength increase as a result of higher matrix strength.

Mean modulus of elasticity were 15.6 GPa ± 0.7 GPa and 17.9 GPa ± 0.9 GPa, respectively for concrete series I and II. In both cases the dispersion of results, amounting up to $\pm 5\%$, is less than the dispersion of individual results from the mean value for individual concrete (up to $\pm 10\%$). Therefore, despite constantly higher modulus of elasticity of applied steel fibres ($E_s \approx 200$ GPa) in comparison to concrete itself. The influence of this addition, in amounts up to 60 kg/m³, should be assessed as unimportant.

Found moduli of elasticity are not only lower (by about 50%) than predicted in PN-B-03264:2002 (12) for normal concrete of the same strength ($E_{cm} = 32$ GPa for B37, $E_{cm} = 34$ GPa for B45), but they are even lower (by 20%) than values estimated for lightweight concrete

Znaczna rozbieżność pomiędzy podanymi tu oszacowaniami potwierdza konieczność przeprowadzania badań modułu sprężystości nie tylko przy stosowaniu różnych asortymentów kruszywa lekkich, ale i danego asortymentu o różnym uziarnieniu. Chociaż obliczenia modułu sprężystości na podstawie gęstości betonu i jego wytrzymałości, dają większą dokładność niż te opierające się wyłącznie na wytrzymałości, i one mogą również dawać wynik obarczony istotnym błędem. Jak bowiem wykazano, (13) kruszywa spiekane w zależności od frakcji mogą charakteryzować się różną wytrzymałością (modułem sprężystości) przy tej samej gęstości objętościowej.

5. Podsumowanie

Wpływ dodatku zastosowanych włókien stalowych w ilości do 60 kg/m³ okazał się nieistotny z uwagi na moduł sprężystości badanych betonów lekkich. Badania potwierdziły również brak wpływu włókien na wytrzymałość betonu na ściskanie. Nie wyklucza to jednak możliwości podwyższenia tych parametrów wskutek zastosowania włókien o większych zawartościach oraz bardziej korzystnych charakterystykach geometrycznych (lepszym sposobie zakotwienia i/lub większym l/d).

Zbadane wartości modułu sprężystości dla obu serii betonów ($E_{cmI} = 15,6$ GPa dla $f_{cm} = 45,0$ MPa i $\rho_c \approx 1600$ kg/m³ oraz $E_{cmII} = 17,9$ GPa dla $f_{cm} = 49,5$ MPa i $\rho_c \approx 1700$ kg/m³) okazały się niższe o 50% od wartości normowych przewidywanych dla betonów zwykłych i o 20% od betonów lekkich tej samej klasy wytrzymałości i gęstości. Rozbieżności te potwierdzają konieczność przyjmowania do obliczeń wartości modułu sprężystości określonych na podstawie przeprowadzanych badań, a nie oszacowań normowych.

Literatura / References

1. ACI 213 R – 87: Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI, Farmington Hills, 1997.
2. Concrete Society data Sheets 1980: Lightweight aggregate for structural concrete. Concrete, No. 8, 1980, s. 29-30.
3. S. Bastian, Cechy charakterystyczne lekkiego kruszywa Pollytag oraz możliwości jego stosowania w budownictwie. Gdańsk 1995.
4. F. Curcio, D. Galeota, A. Gallo, High-performance lightweight concrete for the precast prestressed concrete industry. IV CANMET/ACI/JCI International Conference, Tokushima 1998, s. 389-406.
5. M. Zhang, O. Gjør, Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. ACI Materials Journal, V. 88, No. 3, 1991, s. 240-247.
6. A. M. Neville, Properties of Concrete. Longman 1999.
7. F. Larrard, Concrete Mixture Proportioning. Routledge 1999.
8. PN-B-03263:2000: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone wykonywane z kruszywowych betonów lekkich.
9. Lekki beton konstrukcyjny z kruszywem lytag, Gdańsk 2003.
10. Z. Jamróży, Beton i jego technologie, Arkady 2005.
11. L. Domagała, Właściwości wytrzymałościowe lekkich betonów kruszynowych z włóknami stalowymi, Konferencja Dni Betonu, Wisła 2006, s. 303 - 314.
12. PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone.
13. L. Domagała, O przydatności krajowych kruszyw lekkich do betonów wysokich wytrzymałości. XVIII Konferencja Naukowo-Techniczna, Jadwisin 2002, s. 69 - 76.

according to PN-B-03263:2000 (8) ($E_{cm} = 19.2$ GPa for LB37 and $\rho_c = 1600$ kg/m³, $E_{cm} = 22.4$ GPa for LB45 and $\rho_c = 1700$ kg/m³). However, the obtained values of modulus of elasticity for concretes series I and II are higher on average by 25% in relation to the values given in (9) ($E_{cm} = 12.0$ GPa for LB37 and $\rho_c = 1600$ kg/m³; $E_{cm} = 14.6$ GPa for LB45 and $\rho_c = 1700$ kg/m³) for concrete with Lytag aggregate, which licence was applied to Pollytag production. Estimation of modulus of elasticity of examined concretes on the basis of given formulae [1–5] results in comparable inaccuracy in the order of $\pm 20\%$. The only exception is equation [3], which gives estimated of Young's modulus merely higher by 2% in relation to the found value, although this formula is assumed to be applied for lightweight concrete of strength higher than 60 MPa.

Considerable discrepancy between estimated and measured values proves that it is necessary to carry out tests of modulus of elasticity not only in the case of application of different type of lightweight aggregate but even in the case of different grading of the same type of aggregate. Although calculation of Young's modulus on the basis of concrete density and strength gives better accuracy than those based only on strength, it also may cause a considerable error. Since as it was revealed in our earlier paper (13) sintered aggregate, depending on its grading, may be characterised by different strength (modulus of elasticity) at the same density.

5. Conclusions

The addition of steel fibres in amounts up to 60 kg/m³ has no influence on modulus of elasticity of examined lightweight concrete. The experiments proved also that the addition of fibres has no influence on compressive strength. It does not preclude the possibilities of improvement of these parameters as a result of application of higher content of fibres and of more advantageous geometrical characteristics (of better adhesion and/or higher l/d).

The measured values of modulus of elasticity for both concrete series ($E_{cmI} = 15.6$ GPa for $f_{cm} = 45.0$ MPa and $\rho_c \approx 1600$ kg/m³; $E_{cmII} = 17.9$ GPa for $f_{cm} = 49.5$ MPa and $\rho_c \approx 1700$ kg/m³) were lower by 50% and 20% in comparison to standard values predicted for normal concrete and lightweight concrete respectively. This discrepancy of results proves that in structural design of lightweight concrete structures it is necessary to apply values of modulus of elasticity which are rather found experimentally than obtained from standard estimations.