

Odkształcalność ściskanego osiowo betonu z kruszywem styropianowym

Strain of axially compressed concrete with styrofoam aggregate

1. Wstęp

Beton z kruszywem styropianowym, zwany styrobetonem, zaliczany jest do betonów lekkich, o gęstości objętościowej mniejszej od 2000 kg/m³. Zgodnie ze Świadectwem ITB nr 301/77 z 1978 r., jest to beton lekki izolacyjny i izolacyjno-konstrukcyjny o klasie wytrzymałości: B2,5; B3,5 i B5,0 oraz gęstości objętościowej ≤ 1100 kg/m³ w stanie powietrzno-suchym. W budownictwie, styrobeton znalazł zastosowanie, nie tylko jako materiał izolacyjny, lecz także jako beton konstrukcyjny.

W wcześniejszej publikacji autorów (1), przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych betonu z kruszywem styropianowym o gęstościach objętościowych należących do odmian D1,2; D1,4 oraz D1,6 (wg PN-EN 206-1:2003) i ich wzajemne współzależności w zakresie: gęstości, wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, modułu sprężystości oraz wytrzymałości na przecinanie. Wyniki tych badań wykazują, że styrobetony mają korzystniejszą zależność wytrzymałości na rozciąganie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu do betonów zwykłych. Podobnie jak w przypadku betonów z kruszywem kamiennym, współczynnik kruchości styrobetonów wyrażany jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie do wytrzymałości na ściskanie f_t/f_c maleje w miarę wzrostu wytrzymałości na ściskanie. Moduł sprężystości styrobetonów jest wyraźnie mniejszy, a ich wytrzymałość na przecinanie jest zbliżona do wytrzymałości na przecinanie betonów zwykłych, w porównywalnym zakresie ich wytrzymałości na ściskanie. Te różnice właściwości styrobetonów w porównaniu z betonami zwykłymi związane są z ich budową wewnętrzną. Jak wiadomo, najważniejszymi elementami w składzie betonów są ziarna kruszywa stanowiące fazę rozproszoną, oraz matryca cementowa stanowiąca fazę ciągłą, a także strefa przejściowa kruszywo – zaczyn (2, 3). W przypadku styrobetonów kruszywo grube ($\varnothing > 2$ mm) jest zastąpione granulkami styropianowymi. Ilość zaprawy wpływa na gęstość objętościową oraz klasę wytrzymałości tego betonu.

1. Introduction

Concrete with styrofoam aggregate, called styrofoam concrete, is qualified as a light-weight concrete with bulk density lower than 2000 kg/m³. According to Institute of Building Technology (ITB) Certificate No 301/77 from 1978, it is a light-weight insulating concrete and insulating-construction concrete of B2.5, B3.5 and B5.0 strength classes and of the bulk density in air-dried condition ≤ 1100 kg/m³. In the construction practice, styrofoam concrete was applied as insulating material, but also as a construction concrete.

The results of mechanical properties of concrete with styrofoam aggregate of D1.2, D1.4 and D1.6 bulk density types (according to PN-EN 206-1:2003 Standard) were presented in the prior paper of the authors (1). The relationships in the range of density, compressive and tensile strength, modulus of elasticity and resistance to cutting were presented in this paper. The results indicate that styrofoam concretes are characterized by better relationship between tensile strength and compressive strength comparing to ordinary concretes. Similarly like in the case of concrete with crushed stone aggregate, the brittleness index of styrofoam concretes, defined as a tensile strength to compressive strength ratio f_t/f_c , is decreasing with the compressive strength increase. The elastic modulus of styrofoam concretes is significantly lower and their resistance to cutting is similar to that one of ordinary concretes, in comparable range of their compressive strength. Indicated behaviour differences of styrofoam and ordinary concretes are related to their internal structure. It is composed of the aggregate grains being a dispersed phase, the cement matrix being a continuous phase, as well as the interfacial aggregate-cement matrix transition zone are the most important elements of this structure (2, 3). The coarse aggregate ($\varnothing > 2$ mm) was substituted by styrofoam granules in the composition of styrofoam concretes. Mortar content influences on the bulk density type and the strength class of this material.

The stress-strain diagram of ordinary concretes at compression is distinctly non-linear, although its main constituent – aggregate

Wykres naprężenie-odkształcenie betonów zwykłych jest przy ściskaniu wyraźnie nieliniowy, chociaż jego zasadniczy składnik – kruszywo oraz stwardniała zaprawa cementowa – wykazują quasi-liniową zależność $\sigma - \epsilon$, prawie w całym zakresie zmian naprężenia. Nieliniowość związku $\sigma - \epsilon$ betonu wynika ze stopniowej inicjacji i propagacji rys wewnątrz betonu, w miarę wzrostu nominalnej wartości naprężenia w przekroju materiału. Szczególne znaczenie ma obecność stref przejściowych matrycy cementowej z kruszywem, stanowiących obszary koncentracji naprężeń oraz lokalnej inicjacji rys. Kształt krzywej naprężenie-odkształcenie betonu przy ściskaniu zależy od ich budowy, a przede wszystkim od rodzaju stosowanego kruszywa oraz mikrostruktury stwardniałego zaczynu (2, 4 – 8).

W artykule przedstawiono wyniki badań odkształcalności betonów z kruszywem styropianowym o różnej klasie wytrzymałości oraz gęstości objętościowej, poddawanych jednoosiowemu ściskaniu.

2. Program i metody badań

Mieszanki betonowe z kruszywem styropianowym zaprojektowano przy zachowaniu stałego stosunku $w/c = 0,34$. Stosowano cement CEM III/A 32,5 NA, w ilości 450 kg/m^3 . Mieszanki betonowe oznaczone symbolami S1, S2 i S3 różniły się zawartością granulek styropianowych ($\varnothing \leq 3 \text{ mm}$), która wynosiła odpowiednio $900, 800$ i $650 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ oraz piasku: $502, 650$ i 880 kg/m^3 . Do wykonania mieszanek stosowano domieszki chemiczne – stabilizator ADDIMENT ST3 (do zapraw i pianobetonu, zmniejszający tendencję do segregacji) dodawany w ilości $0,4\%$ masy cementu oraz plastyfikator ADDIMENT FM34 (główny składnik: eter polikarboksyłanowy) dodawany w ilości $0,5\%$ masy cementu w mieszankach S1 i S2 oraz 1% w mieszance S3. Konieczność stosowania stabilizatora wynikała ze znacznej różnicy gęstości objętościowej granulatu styropianowego w stosunku do pozostałych składników, co powodowało trudności w uzyskaniu jednorodnej mieszanki, bez segregacji granulek. Betony oznaczone symbolami S1, S2 oraz S3 miały gęstość objętościowa odpowiednio: $1080, 1220$ i 1450 kg/m^3 , czemu zgodnie z PN-EN 206-1:2003 odpowiadają następujące odmiany gęstości objętościowej w stanie suchym: D1,2; D1,4 i D1,6.

Wszystkie badane próbki betonu zagęszczano w formach metodą sztychowania, a następnie, z uwagi na wydłużony czas wiązania cementu hutniczego, przechowywano w formach przez 3 dni. Do czasu badania próbki przechowywano w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pod przykryciem z folii.

Ustalenie zależności $\sigma - \epsilon$ betonów poprzedziło oznaczenie ich wytrzymałości i modułów sprężystości. Badania te przeprowadzono na próbkach o wymiarach $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$, po 28 dniach twardnienia. Odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu mierzono za pomocą mostka MGCplus oraz tensometrów elektrooporowych typu RL 300/50 naklejonych w połowie wysokości badanych próbek w kierunku równoległym – x , i prostopadłym – y , do kierunku ich ściskania. Mostek pomiarowy podłączono do czterech tensometrów, z których dwa tworzyły układ pomiarowy, natomiast dwa

and hardened cement mortar – show quasi-linear $\sigma - \epsilon$ relationship, almost in the entire range of stress changes. Non-linearity of concrete $\sigma - \epsilon$ relationship results from gradual initiation and propagation of cracks inside the material with the increase of nominal stress value in the material cross-section. Presence of interfacial transition zones of aggregate and cement matrix, being areas of stress concentration and local cracks initiation, has a special importance. Shape of stress-strain diagram of concrete at compression is dependent on their structure, first of all on the type of used aggregate and the microstructure of hardened cement paste (2, 4 – 8).

The results of strain investigations of concretes with styrofoam aggregate of different strength classes and bulk densities subjected to uniaxial compression were presented in the paper.

2. Materials and methods

Concrete mixes with styrofoam aggregate were designed with constant cement to water ratio $w/c = 0.34$. CEM III/A 32.5 NA cement was used in the quantity of 450 kg/m^3 . Concrete mixes designated as S1, S2 and S3 were differentiated by styrofoam granules content ($\varnothing \leq 3 \text{ mm}$), which was $900, 800$ and $650 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ respectively and by the sand content: $502, 650$ and 880 kg/m^3 respectively. Chemical admixtures were added to the concrete mixes – ADDIMENT ST3 stabilizer (for decreasing segregation tendency), which dosage was 0.4% by mass of cement and ADDIMENT FM34 plasticizer (based on the polycarboxyl ether) in the quantity of 0.5% by cement mass in the concrete mixes S1 and S2 and 1% in S3 concrete mix. Necessity of stabilizer addition resulted from significant difference in bulk density of styrofoam granules comparing to other constituents, which caused the problems in maintaining homogenous mix, without segregation effect. Concretes designated as S1, S2 and S3 had a bulk density of $1080, 1220$ and 1450 kg/m^3 respectively, to which, according to PN-EN 206-1:2003, the following bulk density types in dry condition are corresponding: D1.2, D1.4 and D1.6.

All tested concrete samples were hand compacted in moulds, next, because of extended setting time of slag cement, they were kept in moulds for 3 days. Samples covered by foil were stored at $20 \pm 2^\circ\text{C}$, until the testing time.

Determination of concretes $\sigma - \epsilon$ relationship was preceded by tests of their strength and modulus of elasticity. These tests were performed on samples of $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ dimensions, after 28 days of hardening. Longitudinal and transverse strains of concrete were measured by MGCplus bridge and electro-resisting extensometers of RL 300/50 type, attached in the half of height of the tested samples in parallel – x and perpendicular direction – y to applied compression direction. Measuring bridge was connected to four extensometers, from which two created measuring system, while next two created compensation system (extensometers attached to the unladen samples). Unit strains ϵ in x and y directions were registered in the time of uniformly increasing compression load, at three speeds of the press grips movement – 0.125 V , 0.25 V and

następnie układ kompensacyjny (tensometry naklejone na próbkach nieobciążanych). W czasie jednostajnie wzrastającego obciążenia ściskającego, przy trzech prędkościach przesuwu zacisków prasy – 0,125V, 0,25V oraz 0,5V (gdzie V oznacza maksymalną prędkość przyrostu obciążenia, wynoszącą 200 kN/3s, przy czym najniższy poziom wynosi 20 kN/30s) rejestrowano odkształcenia jednostkowe ε w kierunkach x i y. Pomiar te pozwoliły wyznaczyć także odkształcenia objętościowe ściskanego styrobetonu ($-\Delta V/V = \varepsilon_x - 2\varepsilon_y$) oraz liczbę Poissona ($\nu = \varepsilon_y/\varepsilon_x$). Badania te przeprowadzono na 27 próbkach – po 3 próbki betonów trzech klas gęstości, badane przy trzech różnych szybkościach obciążania.

3. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki pomiarów wytrzymałości i modułów sprężystości betonów z kruszywem styropianowym oznaczonych symbolami S1, S2 i S3 podano w tablicy 1.

Na rysunkach 1÷6 przedstawiono zależności: $\sigma - \varepsilon_x$, $\sigma - \varepsilon_y$ oraz odkształceń objętościowych $-\Delta V/V$ i liczby Poissona ν od naprężenia i poziomu wyężenia badanych betonów. Na porównywane krzywe nałożono charakterystyczne punkty, a mianowicie:

- granicę sprężystości σ_i , określającą granicę quasi-liniowego przebiegu zależności: $\sigma - \varepsilon_x$, $\sigma - \varepsilon_y$, oraz $-\Delta V/V$ i $\nu = \text{const.}$, (tzw. granicę naprężenia inicjującego wzrost i propagację rys),

W zakresie zmiany naprężenia ($0 < \sigma < \sigma_i$) ważny pozostaje związek [1]:

$$d\left(-\frac{\Delta V}{V}\right)/d\sigma = \text{const} \quad [1]$$

- granicę naprężenia krytycznego σ_{cr} , określającą gwałtowną propagację rys we wnętrzu materiału.

Dla $\sigma = \sigma_{cr}$, funkcja $-\Delta V/V = f(\sigma)$ przyjmuje wartość maksymalną, a zatem:

$$d\left(-\frac{\Delta V}{V}\right)/d\sigma = 0 \quad [2]$$

Na rysunkach 1, 3 i 5 przedstawiono zmiany odkształceń liniowych badanych próbek betonów, oznaczonych jako ε_c (ε_x – kierunek ściskania), ε_{ct} (ε_y – kierunek poprzeczny do osi wzdłużnej próbki) w funkcji naprężeń σ , a także naprężeń względnych σ/f_{cm} oraz związki $-\Delta V/V_{(\varepsilon)} - f(\sigma/f_{cm})$. Rysunki 2, 4 i 5 przedstawiają zależności $\nu = |\varepsilon_y/\varepsilon_x|$ w funkcji zmiany naprężenia – σ .

Na pokazanych na rysunkach wykresach daje się zauważyć, że styrobeton mają poziom naprężenia inicjującego σ_i/f_{cm} w granicach 35÷ 45% naprężenia niszczonego, natomiast poziom

Tablica 1 / Table 1

WYTRZYMAŁOŚĆ I MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI PRÓBEK

THE STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY OF SAMPLES

Średnie wartości badanych właściwości Average values of tested properties	Beton / Concrete		
	S1	S2	S3
Odmiana gęstości objętościowej Bulk density type (PN-EN 206-1:2003)	D1.2	D1.4	D1.6
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength - $f_{cm,cube}$ (15x15x15cm), N/mm ²	8,3	12,9	18,8
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength - $f_{cm,cyl}$ (15/30cm), N/mm ²	6,5	9,5	16,9
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength - f_{cm} (10x10x40cm), N/mm ²	7,0	9,1	16,4
Moduł sprężystości / Modulus of elasticity - E, N/mm ²	5140	10620	14250

0.5V (where V means maximum speed of load increase, equal to 200 kN/3s, wherein the lowest level is 20 kN/3s). These measurements also allowed to determine volume strain of compressed styrofoam concrete ($-\Delta V/V = \varepsilon_x - 2\varepsilon_y$) and Poisson's ratio ($\nu = \varepsilon_y/\varepsilon_x$). Examinations were performed on 27 samples – 3 concrete samples of three density classes tested at three different load speeds.

3. Results and analysis

The results of strength and modulus of elasticity tests of concretes with styrofoam aggregate designated as S1, S2 and S3 are given in Table 1.

The relationships of $\sigma - \varepsilon_x$, $\sigma - \varepsilon_y$, and of volume strains $-\Delta V/V$, Poisson's ratio ν and the stress and strain level of examined concrete samples are presented in Figs. 1÷6. Characteristic points were placed in the compared curves, namely:

- limit of elasticity σ_i , defining the limit of quasi-linear relations: $\sigma - \varepsilon_x$, $\sigma - \varepsilon_y$, and $-\Delta V/V$ and $\nu = \text{const.}$, (so called limit of stress, initiating increase and propagation of cracks),

In the range of stress change ($0 < \sigma < \sigma_i$) the relationship [1] remains valid:

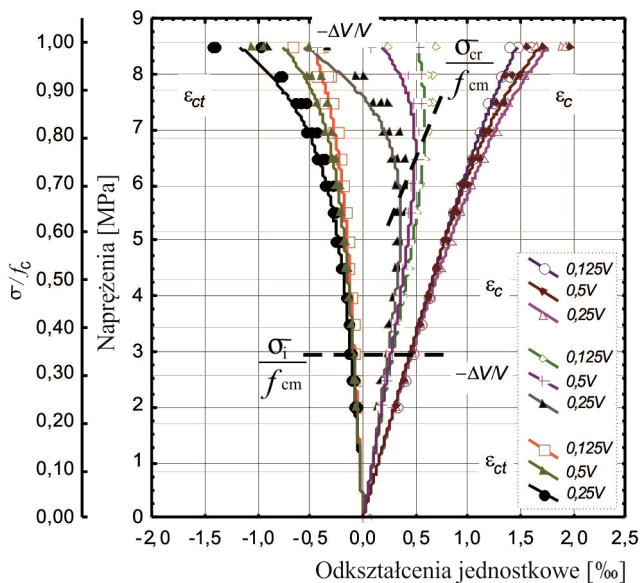
$$d\left(-\frac{\Delta V}{V}\right)/d\sigma = \text{const} \quad [1]$$

- limit of critical stress σ_{cr} , designating the rapid cracks propagation inside the material.

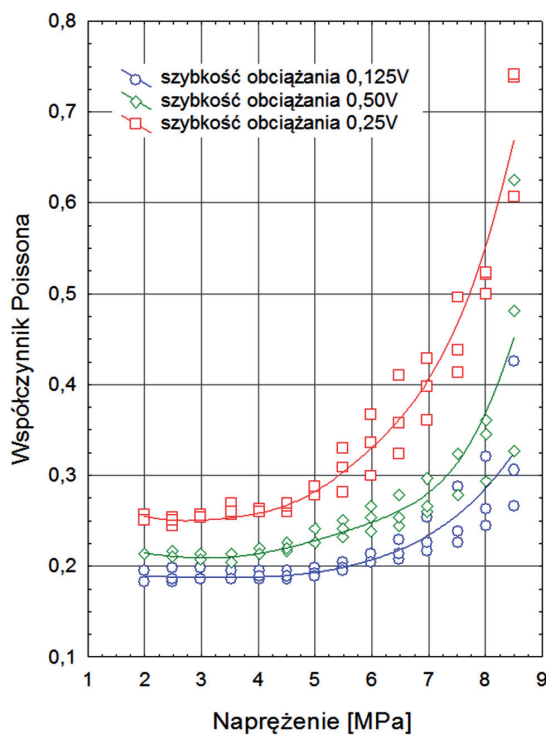
For $\sigma = \sigma_{cr}$, function $-\Delta V/V = f(\sigma)$ assumes maximum value, and therefore:

$$d\left(-\frac{\Delta V}{V}\right)/d\sigma = 0 \quad [2]$$

Changes of linear strains of tested concrete samples S1, S2, S3: designated as ε_c (ε_x – direction of compression), ε_{ct} (ε_y – transverse direction to longitudinal axis of sample) in stress σ function, as well as relative stress σ/f_{cm} and relationships $-\Delta V/V_{(\varepsilon)} - f(\sigma/f_{cm})$ are pre-



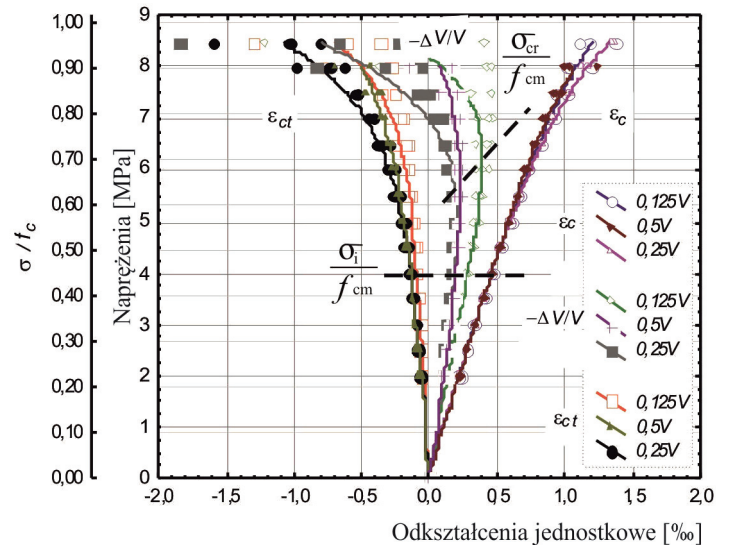
Rys. 1. Odształcenia styrobetonu S1 przy różnych szybkościach obciążenia z zaznaczonymi wartościami naprężenia inicjującego i krytycznego
 Fig. 1. Stress-strain diagrams of styrofoam concrete S1 at different load speeds with marked values of initiating and critical stress



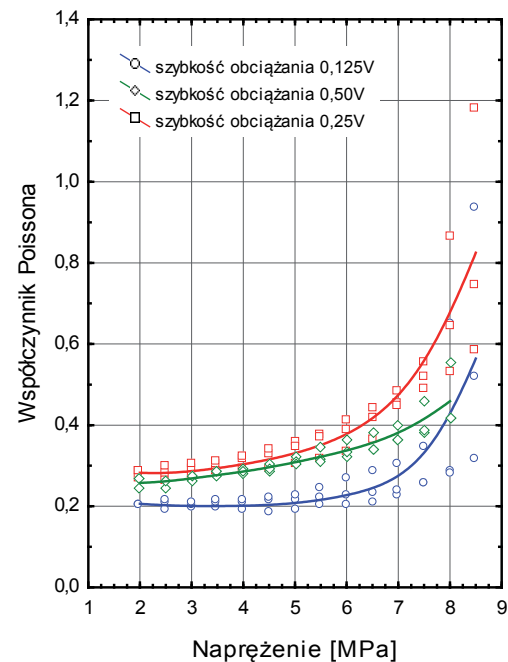
Rys. 2. Zmienność współczynnika Poissona w funkcji naprężenia; (styrobeton S1; różne szybkości obciążenia)

Fig. 2. Changes of Poisson's ratio in function of stress (styrofoam concrete S1, different load speeds)

naprężenia krytycznego σ_{cr}/f_{cm} w granicach 65 ÷ 75%. Z przebiegu krzywych na rysunkach 2, 4 i 6 wynika, że średnią wartość współczynnika Poissona styrobetonów w zakresie odkształceń liniowych ($0 < \sigma < \sigma_i$), którą można oszacować jako równą $\nu = 0,22$, na podstawie uśrednionych wartości odkształcenia podłużnego i poprzecznego, na poziomie naprężenia inicjującego.



Rys. 3. Odształcenia styrobetonu S2 przy różnych szybkościach obciążenia z zaznaczonymi wartościami naprężenia inicjującego i krytycznego
 Fig. 3. Stress-strain diagrams of styrofoam concrete S2 at different load speeds with marked values of initiating and critical stress

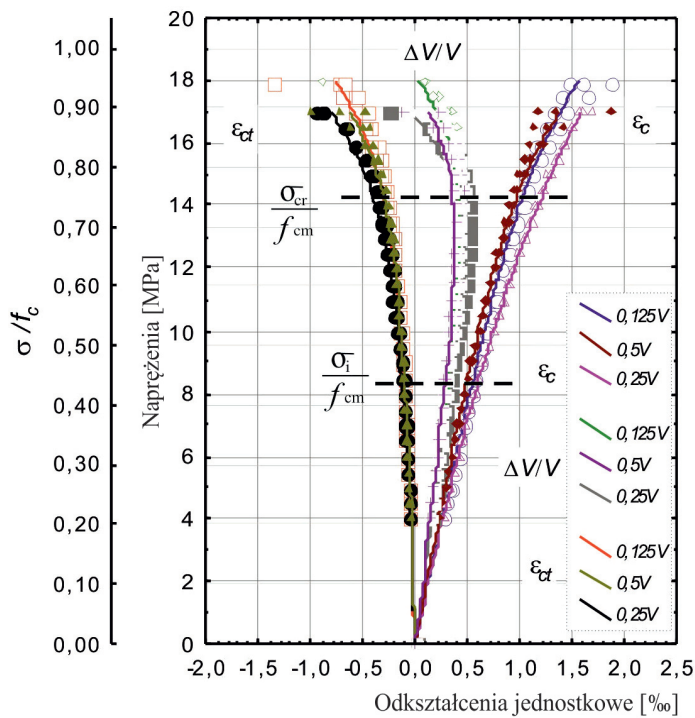


Rys. 4. Zmienność współczynnika Poissona w funkcji naprężenia; (styrobeton S2; różne szybkości obciążenia)

Fig. 4. Changes of Poisson's ratio in function of stress (styrofoam concrete S2, different load speeds)

sented in Figs. 1, 3 and 5. The relationship of $\nu = |\epsilon_y/\epsilon_x|$ in function of stress change – σ is presented in Figs. 2, 4 and 5.

It is evident from the presented diagrams that tested styrofoam concretes have σ_i/f_{cm} initiating stress level in the 35÷45% range of destructive stress, while the σ_{cr}/f_{cm} critical stress level in the range of 65 ÷ 75%. Curves on Figs. 2, 4 and 6 show that individual styrofoam concretes in the range of quasi-linear strain ($0 < \sigma < \sigma_i$) are characterized by average value of Poisson's ratio equal to $\nu = 0,22$,



Rys. 5 Odształcenia styrobetonu S3 przy różnych szybkościach obciążenia z zaznaczonymi wartościami naprężenia inicjującego i krytycznego

Fig. 5. Stress-strain diagrams of styrofoam concrete S3 at different load speeds with marked values of initiating and critical stress

Przyjmuje się, że opisy zależności $\sigma - \varepsilon$ betonu mają spełniać następujące warunki:

$$\sigma = 0 \text{ i } \varepsilon = 0 \rightarrow E_b = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_{b0} \quad [3]$$

$$\sigma = f_{cm} \text{ i } \varepsilon = \varepsilon_{c1} \rightarrow E_b = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_{b0} \quad [4]$$

gdzie:

σ - naprężenia normalne,

ε - odkształcenie jednostkowe,

E_b - sieczny moduł sprężystości betonu,

E_{b0} - początkowy moduł sprężystości betonu,

f_{cm} - wytrzymałość na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia,

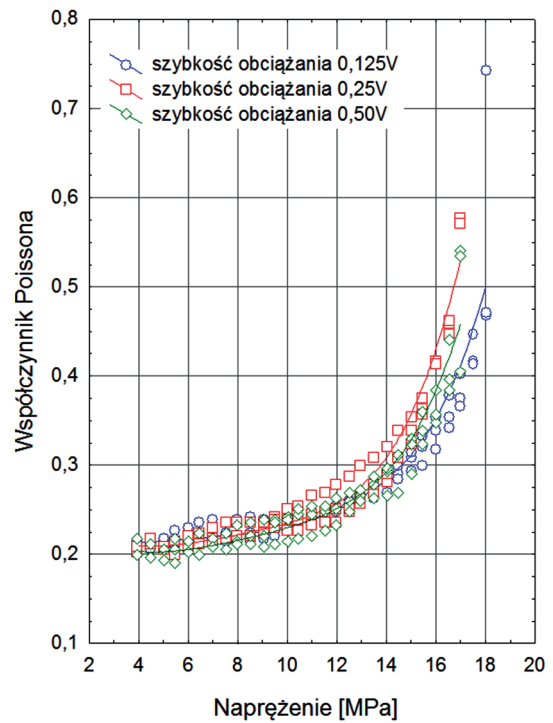
ε_{c1} - odkształcenie odpowiadające naprężeniu niszcącemu $\sigma = f_{cm}$.

Young (9) w przypadku spełnienia warunków [3] i [4] zaproponował przedstawienie zależności $\sigma - \varepsilon$ w postaci wyrażenia:

$$\sigma = E_{b0} \cdot \varepsilon \cdot \left[1 + \left(\frac{3 \cdot E_{b1}}{E_{b0}} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right) + \left(1 - \frac{2 \cdot E_{b1}}{E_{b0}} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad [5]$$

gdzie:

E_{bc1} - sieczny moduł sprężystości betonu przy wartości naprężenia niszcącego $\sigma = f_{cm}$



Rys. 6. Zmienność współczynnika Poissona w funkcji naprężenia; (styrobeton S3; różne szybkości obciążenia)

Fig. 6. Changes of Poisson's ratio in function of stress (styrofoam concrete S3, different load speeds)

which was estimated based on the average values of longitudinal and transverse strains of individual styrofoam concretes, at the initiating stress level.

It is assumed that known formulations of concrete $\sigma - \varepsilon$ relationship have to meet the following conditions:

$$\sigma = 0 \text{ i } \varepsilon = 0 \rightarrow E_b = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_{b0} \quad [3]$$

$$\sigma = f_{cm} \text{ i } \varepsilon = \varepsilon_{c1} \rightarrow E_b = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_{b0} \quad [4]$$

where:

σ - normal stresses,

ε - unit strain,

E_b - secant concrete modulus of elasticity,

E_{b0} - initial concrete modulus of elasticity,

f_{cm} - compressive strength in axial stress,

ε_{c1} - strain corresponding to destructive stress $\sigma = f_{cm}$.

Young (9), in the case of fulfilling the conditions [3] and [4] proposed to formulate the $\sigma - \varepsilon$ relationship, as follows:

$$\sigma = E_{b0} \cdot \varepsilon \cdot \left[1 + \left(\frac{3 \cdot E_{b1}}{E_{b0}} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right) + \left(1 - \frac{2 \cdot E_{b1}}{E_{b0}} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad [5]$$

where:

Przyjmując: $f_{cm} = \varepsilon_{c1} \cdot E_{bc1}$ zależność [5] można przedstawić w postaci:

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{E_{b0}}{E_{bc1}} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \cdot \left[1 + \left(\frac{3 \cdot E_{bc1}}{E_{b0}} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right) + \left(1 - \frac{2 \cdot E_{bc1}}{E_{b0}} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad [6]$$

Podstawiając do zależności [6] $\frac{E_{b0}}{E_{bc1}} = \eta$ oraz $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} = \varepsilon_w$ uzyskano:

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \eta \cdot \varepsilon_w \cdot \left[1 + \left(\frac{3}{\eta} - 2 \right) \cdot \varepsilon_w + \left(1 - \frac{2}{\eta} \right) \cdot \varepsilon_w^2 \right] \quad [7]$$

Zależność $\frac{\sigma}{f_{cm}} = f(\varepsilon_w)$ wyznaczoną dla styrobetonów o różnicowanej klasie wytrzymałości na ściskanie, przy różnych szybkościach obciążania próbek przedstawiono na rysunku 7.

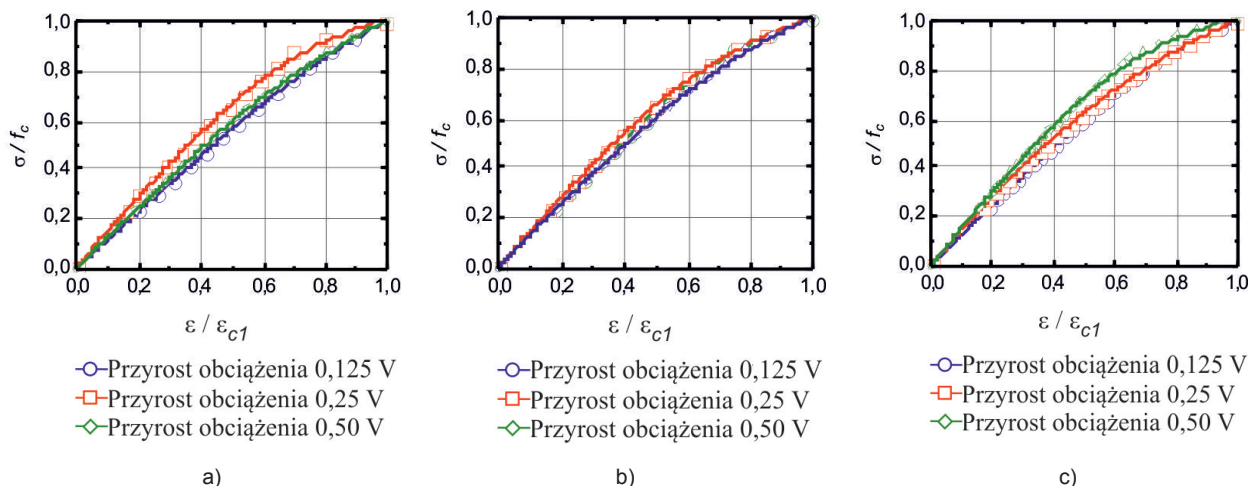
Według danych literaturowych, w przypadku betonów zwykłych

można przyjąć $\eta = \frac{E_{b0}}{E_{bc1}} = 2$ (2), natomiast dla betonów wysoko-

kwartościowych $\eta = \frac{E_{b0}}{E_{bc1}} = 1,1 \div 1,5$. Na podstawie uzyskanych

wyników badań zależności σ - ε w przypadku styrobetonów różnych klas wyznaczono następujące wartości współczynników η :

- styrobeton D1,2 - $\eta = 1,26$,
- styrobeton D1,4 - $\eta = 1,18$,
- styrobeton D1,6 - $\eta = 1,32$.



Rys. 7. Zależności $\sigma / f_{cm} = f(\varepsilon / \varepsilon_{c1})$ badanych styrobetonów pod obciążeniem doraźnym wprowadzanym ze zmienną prędkością przesuwu zacisków prasy; a) styrobeton S1, b) styrobeton S2, c) styrobeton S3.

Fig. 7. Relationships $\sigma / f_{cm} = f(\varepsilon / \varepsilon_{c1})$ of examined styrofoam concretes with extemporary load applied at different speed of press grips movement; a) styrofoam concrete S1, b) styrofoam concrete S2, c) styrofoam concrete S3.

E_{bc1} - secant concrete modulus of elasticity at destructive stress
 $\sigma = f_{cm}$.

Assuming: $f_{cm} = \varepsilon_{c1} \cdot E_{bc1}$ the formula [5] can be written as follows:

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \frac{E_{b0}}{E_{bc1}} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \cdot \left[1 + \left(\frac{3 \cdot E_{bc1}}{E_{b0}} - 2 \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right) + \left(1 - \frac{2 \cdot E_{bc1}}{E_{b0}} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad [6]$$

Introducing in formula [6] the relations: $\frac{E_{b0}}{E_{bc1}} = \eta$ and $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}} = \varepsilon_w$ we obtaine:

$$\frac{\sigma}{f_{cm}} = \eta \cdot \varepsilon_w \cdot \left[1 + \left(\frac{3}{\eta} - 2 \right) \cdot \varepsilon_w + \left(1 - \frac{2}{\eta} \right) \cdot \varepsilon_w^2 \right] \quad [7]$$

Relation $\frac{\sigma}{f_{cm}} = f(\varepsilon_w)$ applied for tested styrofoam concrete

samples, with differentiated compressive strength classes and at different load speeds, are presented in Fig. 7.

According to the literature, in the case of ordinary concretes it can

be assumed that $\eta = \frac{E_{b0}}{E_{bc1}} = 2$ (2) while for high-performance con-

cretes $\eta = \frac{E_{b0}}{E_{bc1}} = 1,1 \div 1,5$. Based on the obtained σ - ε relationship

for styrofoam concretes of different classes the following values of η factors were determined:

- styrofoam concrete of D1.2 density class - $\eta = 1.26$,
- styrofoam concrete of D1.4 density class - $\eta = 1.18$,
- styrofoam concrete of D1.6 density class - $\eta = 1.32$.

Wartość średnia $\eta = 1,25$ wykazuje, że przebieg krzywych σ - ε styrobetonów na rysunkach jest bardziej zbliżony do analogicznej zależności betonów wysokowartościowych niż betonów zwykłych.

Uzyskane wyniki badań zależności σ - ε styrobetonów klas gęstości D1,2; D1,4 i D1,6 porównano z wynikami badań betonów zwykłych i BWW przeprowadzonych przez Stawiarskiego (10) (rysunek 8).

4. Podsumowanie

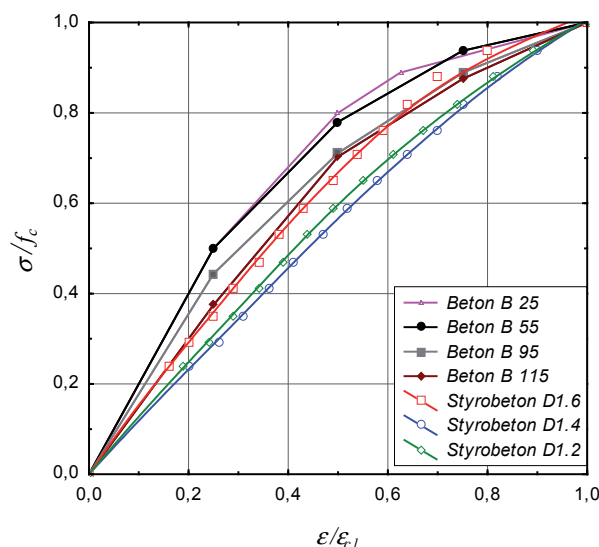
Przedstawione wyniki badań wykazują, że poziom naprężenia inicjującego styrobetonów σ/f_{cm} mieści się w granicach 35% ÷ 45% naprężeń niszczących, podobnie jak w przypadku betonów zwykłych (30% ÷ 50%). Natomiast poziom naprężenia krytycznego σ_{cr}/f_{cm} (60% ÷ 75%) jest nieco niższy, w porównaniu z betonem zwykłym (70% ÷ 85%). W przypadku styrobetonów, w zakresie naprężeń większych od naprężenia inicjującego, krzywe są w dużej mierze quasi-liniowe. Wskazuje to na mały udział odkształceń plastycznych materiału w miarę wzrostu jego obciążenia. Można to tłumaczyć tym, że obciążenie w całości jest przenoszone przez zaprawę. Ustalony doświadczalnie współczynnik Poissona styrobetonów – wartość średnia $\nu = 0,22$, jest zbliżony do wartości współczynnika Poissona betonów zwykłych $-\nu = 0,15-0,20$.

Literatura

1. T. Rucińska, W. Kiernożycki, Właściwości mechaniczne betonu z kruszywem styropianowym i ich wzajemne zależności, Cement Wapno Beton, **77**, 289-295 (2010).
2. T. Godycki-Ćwirko, Mechanika betonu, Arkady, Warszawa 1982 (in Polish).
3. M. Lusche, Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchten Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge, Ruhruniversität, Dissertation, Bochum 1971.
4. Budownictwo ogólne, Materiały i wyroby budowlane, Tom 1, Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. dr inż. B. Stefańczyka, Arkady 2005 (in Polish).
5. F. O. Slate, K. C. Hover, Microcracking in concrete, In A. Carpinteri & A. R. Ingraffea (eds), Fracture Mechanics of Concrete: 137-159, Material Characterization and Testing, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague 1984.
6. P. T. Wang, S. P. Shah, A. E. Naaman, Stress-strain curves of normal and lightweight concrete in compression, J. Amer. Concr. Inst., **75**, 603-611 (1978).
7. A. M. Brandt, Zastosowanie doświadczalnej mechaniki zniszczenia do kompozytów o matrycach cementowych, Mechanika kompozytów betonopodobnych, s. 449-501, Ossolineum 1982 (in Polish).
8. S. Mindess, Zastosowanie mechaniki zniszczenia do zaczynu cementowego, zaprawy i betonu, Mechanika kompozytów betonopodobnych, s. 377-407, Ossolineum 1982 (in Polish).
9. L. E. Young, Simplifying ultimate flexural theory by maximizing the moment of the stress block, ACI Journal, **11**, 549-556 (1960).
10. P. Stawiarski, Betony wysokowartościowe, Współczesne osiągnięcia w technologii betonów, Cz. I-III., <http://www.muratorplus.pl>, 06.2007.

The average value, equal $\eta = 1.25$ indicates that the curves of $\sigma - \varepsilon$ relation on Figs. 1, 3, 5 of styrofoam concretes are more similar to the $\sigma - \varepsilon$ relationship of high-performance concrete than that of ordinary concretes.

Obtained results of σ - ε relationship investigation of styrofoam concretes with D1.2, D1.4 and D1.6 density classes were compared with the results of ordinary and high-performance concretes reported by Stawiarski (10) [Fig. 8].



Rys. 8. Zależności naprężenie-odkształcenie $\sigma/f_c = g(\varepsilon/\varepsilon_{c1})$ przy ścisnieniu osiowym: betonów z kruszywem kamiennym [B25, B55, B95 i B115] – według Stawiarskiego (10) oraz styrobetonów: D1.6; D1.4 i D1.2

Fig. 8. Stress-strain relationship $\sigma/f_c = g(\varepsilon/\varepsilon_{c1})$ at axial compression of: concretes with stone aggregate [B25, B55, B95 and B115] – according to Stawiarski (10), and styrofoam concretes: D1.6; D1.4 i D1.2

4. Conclusions

Presented results indicate that the initiating stress level of styrofoam concretes σ/f_{cm} is in the 35% ÷ 45% range of destructive stress, similarly like in the case of ordinary concretes (30% ÷ 50%), while the critical stress level σ_{cr}/f_{cm} (60% ÷ 75%) is slightly lower comparing to ordinary concrete (70% ÷ 85%). In the case of examined styrofoam concretes, the curves on the diagram largely retain quasi-linear character in the range of stress higher than initiating cracking. It indicates the little contribution of material plastic strain with its load increase. It can be due by the fact that load is totally transferred by mortar. Experimentally established Poisson's ratio of styrofoam concretes – average value $\nu = 0.22$, is similar to the Poisson's ratio of ordinary concretes – $\nu = 0.15-0.20$.