VPLYV ASYMETRICKÉHO USPORIADANIA INKLÚZIÍ V BETÓNOVÝCH TELESÁCH NAMÁHANÝCH OSOVÝM TLAKOM

THE EFFECT OF ASYMMETRICAL INCLUSION ARRANGEMENT ON CONCRETE SPECIMENS SUBJECTED TO UNIAXIAL COMPRESSION

Maroš Kováč^{*,1}, Peter Sabol¹

^{*}maros.kovac@tuke.sk

¹Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice

Abstrakt

Betón je charakteristický rôznorodosťou svojho zloženia – heterogenitou. Predpokladá sa, že heterogénna povaha betónu, v ktorej prevládajú veľké zrná kameniva, riadi proces šírenia trhlin v betóne. V prípade obyčajného betónu pôsobia veľké zrná kameniva ako významné koncentratory napätia, ktoré usmerňujú priebeh silového toku a ovplyvňujú tak mechanické vlastnosti betónu. Cieľom výskumu bolo analyzovať vplyv početnosti veľkých zrn kameniva (inklúzií) pri ich asymetrickom usporiadaní na sérii skúšobných vzoriek o troch rôznych veľkostiach. Pozornosť bola venovaná úrovni dosiahnutého medzného napätia skúšobných vzoriek, ktoré boli namáhané osovým tlakom.

Kľúčová slova

Obyčajný betón, osový tlak, inklúzia, matrica

Abstract

Concrete is characterized by the diversity of its composition - heterogeneity. It is considered that the heterogeneous nature of concrete, in which coarse aggregate grains dominate, controls the process of crack propagation in concrete. In the case of normal concrete, coarse aggregate grains act as the significant stress concentrators, which determine the course of the force flow and thus influence the mechanical properties of the concrete. The aim of the research was to analyse the effect of the number of coarse aggregate grains (inclusions) in their asymmetrical arrangement on a series of test specimens of three different sizes. Attention was paid to the level of the ultimate stress value achieved by the specimens' failure under uniaxial compression.

Key words

Normal concrete, uniaxial compression, inclusion, matrix

1 ÚVOD

Cieľom tohto experimentálneho výskumu bolo preskúmať, či rôzny počet inklúzií v skúšobnej vzorke ovplyvňuje dosahovanú normovanú pevnosť telies pri ich asymetrickom usporiadaní vzhľadom na smer pôsobenia zaťaženia. Výslednú normovanú pevnosť skúšobných vzoriek nemusí ovplyvňovať iba počet inklúzií, ale aj typ materiálu inklúzie a kvalita rozhrania inklúzie a cementovej matrice – poloha, počet a veľkosť rozhraní. Tieto vstupné premenné parametre môžu ovplyvňovať dosahovanú normovanú pevnosť skúšobných vzoriek a tvar krivky $\sigma - \varepsilon$. Pozornosť bola venovaná výberu vhodného normovacieho parametra, ktorý zohľadní rozdielnu kvalitu betónových skúšobných vzoriek. Analýza výsledkov teda bola vykonaná na normovanej pevnosti vzoriek prostredníctvom vhodného normovacieho parametra.

V príspevku sú prezentované čiastočne výsledky výskumu, ktorý pozostával zo 6 sérií experimentálnych skúšok. Každá séria pozostávala z 18 skúšobných vzoriek, kde sa menil počet inklúzií od 1 do 5, pričom súbor vzoriek obsahoval jednu vzorku bez inklúzie. Na prípravu vzoriek bola použitá suchá betónová zmes triedy C16/20. Testovacie vzorky sa odliali do oceľovej formy, kde boli predtým nalepené inklúzie v požadovanej polohe. Súčasne boli vybetónované vzorky pre stanovenie materiálových vlastností betónovej matrice. Pevnostné charakteristiky betónu sa zisťovali v 7. deň od betonáže.

V širšom experimentálnom výskume boli použité dva druhy rozhrania – bola vytvorená dvojaká súdržnosť oceleových inklúzií v tvare valčiek a betónovej matrice. Tento článok sa zameriava na prezentáciu vybraných výsledkov na skúšobných vzorkách, kde bolo použité rozhranie typu (S) – oceľová inklúzia/betónová matrica pri asymetrickom usporiadaní inklúzií vzhľadom na smer pôsobenia zaťaženia.

Výška oceleových inklúzií bola identická s hĺbkou skúšobných vzoriek t. j. 50 mm. Pomer strany skúšobnej vzorky a priemeru inklúzie (pomer h/ϕ) bol konštantný o hodnotu 5. Priemer inklúzií bol 40, 30 a 20 mm. Skúšky v osovom tlaku boli vykonané na skúšobných vzorkách troch rôznych veľkostí, kde sa menila štihlosť (pomer h/d) skúšobných vzoriek:

- $200 \times 200 \times 50$ mm, $h/d = 4,0$, $\phi = 40$ mm,
- $150 \times 150 \times 50$ mm, $h/d = 3,0$, $\phi = 30$ mm,
- $100 \times 100 \times 50$ mm, $h/d = 2,0$, $\phi = 20$ mm.

2 POPIS SÚČASNÉHO STAVU

V betónových konštrukciách identifikujeme deformačné polia uzlov s pôsobiacim sústredeným namáhaním, ktoré sú sprevádzané zmenou hustoty a tvaru silových trajektórií. Tieto zmeny sú spôsobené prítomnosťou veľkých zŕn kameniva a/alebo výstužných prútov (inklúzií) v betóne, zhlukov zŕn bežnej veľkosti, alebo prítomnosťou kaverny v okolí zrna kameniva. Tieto vnútorné imperfekcie patria medzi dôležité parametre, ktoré ovplyvňujú proces porušovania betónových skúšobných telies, a teda aj iniciáciu a rozvoj trhlin v betóne a môžu mať negatívny vplyv na odolnosť betónových prvkov [1].

Vzájomne usporiadanie inklúzií v betónovej matrici usmerňuje priebeh silového toku, pričom slabé spojenie medzi inklúziou a matricou vedie k iniciácii trhliny na ich rozhraní. Rozhrania zŕn a cementovej matrice sú teda, na jednej strane, prekážkami šírenia trhlin, ale na strane druhej, sú súčasne aj zdrojom ich iniciácie [2].

Zistilo sa, že zmena zakrivenia tlakových trajektórií spôsobí lokálny priečny ťah a zmena hustoty trajektórií spôsobí miestne zvýšenie tlaku, teda stlačenie. Zároveň sa zistilo, že šmykové napätie sa rozvíja vo vrchole inklúzie a v spodnej časti inklúzie. V týchto oblastiach, ktoré majú približne tvar kužeľov vzniká priestorový tlak, čo spôsobí, že matrica v týchto oblastiach nezlyhá [3].

Okrem vyššie uvedených parametrov ovplyvňujúcich pevnosť betónu sa z predchádzajúcich výskumov zistilo, že odlišný materiál inklúzie, ako aj pomer tuhosti relatívne mäkkej matrice a tuhej inklúzie významne interferoval proces porušovania skúšobných vzoriek [4]. Zároveň sa zistilo, že vzájomná vzdialenosť inklúzií ovplyvňovala proces porušovania skúšobných vzoriek, pričom odolnosť vzoriek klesala s rastúcim počtom inklúzií [5].

3 METODIKA

Usporiadanie skúšky a materiál vzoriek

Skúšky boli vykonané pomocou zaťažovacieho zariadenia pozostávajúceho z tuhých oceleových platní, závitových tyčí a hydraulického zdvíhaka (Obr. 1). Použitím tuhých oceleových platní bolo vytvorené vysoké trecie napätie na kontaktnej ploche zaťažovacieho zariadenia a skúšobného telesa. Takéto usporiadanie skúšky zabránilo priečnej deformácii na podstavách oceleových platní, v dôsledku čoho nastal vznik ovinutých oblastí. Tieto oblasti sa vyznačujú pôsobením priestorového tlakového napätia. Betónová matrica sa v týchto oblastiach neporuší, pričom vznikajú oblasti bez trhlin, ktoré sa podobajú tvaru kužeľov [3].

Skúšobné vzorky boli počas experimentu vystavené osovému tlaku. Skúšky boli riadené silou so zaťažovacím krokom približne 9,32 kN. V priebehu skúšky bolo zaznamenané zvislé stlačenie vzorky a presné hodnoty zaťaženia v zaťažovacích krokoch. Zvislá deformácia sa odčítavala pomocou dvoch indikátorových meradiel s presnosťou 0,001 mm. Na Obr. 1 je znázornená skúšobná vzorka SQ-7-200-40-S-17 po jej porušení z jej prednej a zadnej strany. Predná časť vzorky bola natretá vápnom, kde boli neskôr nanesené chaoticky usporiadané čierne bodky za účelom bezkontaktného merania deformácie fotogrametrickým systémom GOM Aramis. Využitie metódy fotogrametrie pri tlakových skúškach umožnilo získať informácie o iniciácii, šírení a rozvoji trhlin vo vzorkách. Zo skôr vyhodnotených čiastkových výsledkov výskumu sa zistilo, že iniciácia trhlin nastala na rozhraní inklúzie a betónovej matrice, pričom ďalší nárast zaťaženie spôsobil rozvoj a šírenie trhlin do matrice [6].

Pevnostné charakteristiky betónu boli stanovené na vzorkách s rozmermi $400 \times 100 \times 100$ mm ($h/d = 4,0$) kde bola skúmaná hranolová pevnosť betónu v tlaku ($f_{cm,pr}$), pevnosť v ťahu pri ohybe ($f_{ct,m}$) a modul pružnosti betónu (E_{cm}). Na vzorkách s rozmermi $100 \times 100 \times 100$ mm ($h/d = 1,0$) boli stanovené hodnoty pevnosti betónu v priečnom ťahu ($f_{ct,sp,m}$) a kockovej pevnosti betónu v tlaku ($f_{cm,cu}$). Prehľad materiálových vlastností betónu prislúchajúci ku konkrétnym vzorkám je uvedený v Tab. 1.

Obr. 1 Usporiadanie skúšky (vľavo) a skúšobná vzorka po porušení z prednej a zadnej strany (vpravo).

Tab. 1 Materiálové charakteristiky betónu.

Skúšobná vzorka	$f_{cm,pr}$ (MPa)	$f_{cm,cu}$ (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{ct,sp,m}$ (MPa)	E_{cm} (GPa)	$\rho_{matrice}$ (kN/m^3)
SQ-7-200-0-1	17,96	19,31	4,57	2,48	19,719	22,550
SQ-7-200-40-S-4	17,96	19,31	4,57	2,48	19,719	23,027
SQ-7-200-40-S-5	17,96	19,31	4,57	2,48	19,719	22,955
SQ-7-200-40-S-8	17,74	18,55	4,49	2,40	18,077	22,560
SQ-7-200-40-S-13	18,74	21,43	3,95	3,28	17,746	22,998
SQ-7-200-40-S-10	17,74	18,55	4,49	2,40	18,077	22,762
SQ-7-200-40-S-11	18,74	21,43	3,95	3,28	17,746	22,370
SQ-7-200-40-S-14	18,74	21,43	3,95	3,28	17,746	22,861
SQ-7-200-40-S-16	18,74	21,43	3,95	3,28	17,746	23,032
SQ-7-200-40-S-17	18,34	20,14	4,01	3,13	18,579	22,801
SQ-7-150-0-1	19,02	20,33	4,04	3,34	17,409	22,276
SQ-7-150-30-S-4	18,12	20,27	4,34	3,04	16,510	22,113
SQ-7-150-30-S-5	18,12	20,27	4,34	3,04	16,510	22,397
SQ-7-150-30-S-8	15,09	16,73	3,80	2,69	16,762	22,072
SQ-7-150-30-S-13	18,02	21,27	4,26	3,05	19,168	22,419
SQ-7-150-30-S-10	15,09	16,73	3,80	2,69	16,762	22,137
SQ-7-150-30-S-11	15,09	16,73	3,80	2,69	16,762	22,500
SQ-7-150-30-S-14	18,02	21,27	4,26	3,05	19,168	22,603
SQ-7-150-30-S-16	18,02	21,27	4,26	3,05	19,168	22,088
SQ-7-150-30-S-17	18,02	21,27	4,26	3,05	19,168	22,706
SQ-7-100-0-1	18,34	20,14	4,01	3,13	18,579	22,880
SQ-7-100-20-S-4	18,34	20,14	4,01	3,13	18,579	22,501
SQ-7-100-20-S-5	18,34	20,14	4,01	3,13	18,579	22,583
SQ-7-100-20-S-8	19,02	20,33	4,04	3,34	17,409	22,480
SQ-7-100-20-S-13	11,39	12,53	2,49	1,83	14,597	22,331
SQ-7-100-20-S-10	19,02	20,33	4,04	3,34	17,409	22,524
SQ-7-100-20-S-11	19,02	20,33	4,04	3,34	17,409	22,922
SQ-7-100-20-S-14	11,39	12,53	2,49	1,83	14,597	22,502
SQ-7-100-20-S-16	11,39	12,53	2,49	1,83	14,597	22,149
SQ-7-100-20-S-17	11,39	12,53	2,49	1,83	14,597	22,549

Normovanie normovacieho parametra

Rozdielne pevnostné charakteristiky betónu analyzovaných skúšobných vzoriek boli v rámci skúmania zohľadnené normovaním skúmaných veličín pomocou normovacieho parametra. Normovací parameter musí byť veličina/viacere veličiny, ktoré najvýznamnejšie reflektujú rozdielnú kvalitu a vlastnosti betónu. Skúmané skúšobné vzorky sú namáhané osovým tlakom. Zohľadnenie rozdielnej kvality betónu normovaním hranolovou/kockovou tlakovou pevnosťou betónu je prvým predpokladom pri voľbe optimálneho parametra. Pri pôsobení osového tlaku je vznik trhlín (šmykových a tlakových) vo vzorkách jav, ktorý je možné vysvetliť vznikom trhlín v nepriamom ťahu. Práve pevnostné charakteristiky betónu v ťahu pri ohybe a v priečnom ťahu by mohli vyriešiť vhodnú kombináciu rôznych materiálových vlastností skúšobných vzoriek pri meniacom sa počte inklúzií. Nakoniec medzi významné vlastnosti patrí objemová hmotnosť betónovej matrice, ktorá vyjadruje kvalitu zhutnenie betónovej zmesi, čo môže vystihovať mieru pravdepodobnosti výskytu vnútorných imperfekcií a ovplyvňovať tak dosahovanú pevnosť skúšobných vzoriek. V Tab. 2 sú uvedené percentuálne rozdiely miery zhutnenia betónovej matrice na vzorkách troch rôznych sérií.

Tab. 2 Percentuálny rozdiel miery zhutnenia betónovej matrice.

Séria	$\Delta\rho_{matrice} (\%)$
200 × 200 × 50	2,96
150 × 150 × 50	2,87
100 × 100 × 50	3,49

Výber vhodnej kombinácie veličín do normovacieho parametra bol stanovený z variability rozdelenia nameraných hodnôt všetkých vzoriek prostredníctvom variačného koeficientu (Tab. 1).

Tab. 3 Hodnoty variačného koeficientu.

Normovací parameter	$f_{cm,pr}$	$f_{cm,cu}$	$f_{cf,m}$	$f_{ct,sp,m}$	E_{cm}	$\rho_{matrice}$
Variačný koeficient	12,42	12,74	13,19	15,79	7,63	1,27

Z výpočtov sa javí ako najvhodnejšia kombinácia hranolovej pevnosti betónu v tlaku ($f_{cm,pr}$) a pevnosti betónu v ťahu pri ohybe ($f_{cf,m}$). Táto kombinácia bola vyjadrená geometrickým priemerom oboch hodnôt a zohľadnením príslušnej miery zhutnenia každej skúšobnej vzorky. Normovanie veličín bolo dosiahnuté pomerom kontaktného tlakového napätia v príslušnom zaťažovacom kroku a normovacieho parametra (1).

$$\sigma / (f_{cm,pr} \cdot f_{cf,m})^{1/2} \cdot \rho_{matrice} \quad (1)$$

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Výsledky analýzy sú prezentované na troch grafoch závislosti kontaktné tlakové napätie/normovací parameter – u/u_{peak} . Rozdielne hodnoty normovanej pevnosti skúšobných vzoriek boli analyzované vzhľadom na jednotkovú vodorovnú os, čo umožnilo prehľadnejšie porovnanie dosahovaných napätí. Na Obr. 2 sú znázornené výsledky skúšobných vzoriek s rozmermi 200 × 200 × 50 mm, kde sa menil počet inklúzií od 1 do 4 vzhľadom na ich asymetrické usporiadanie v smere pôsobenia zaťaženia. Zároveň, každá skúšobná séria obsahovala vzorku bez inklúzie s cieľom určiť vzťahnú hodnotu pri analýze porovnávaných medzných napätí vzoriek s inklúziami. Obdobne bola vykonaná analýza medzných napätí na sérii vzoriek s rozmermi 150 × 150 × 50 mm (Obr. 3), a nakoniec na vzorkách s rozmermi 100 × 100 × 50 mm (Obr. 4).

Z výsledkov experimentálnych skúšok sa zistilo, že rozsah nameraných hodnôt medzných napätí sa výraznejšie znížil na vzorkách najmenších rozmerov, teda pri poklese štihlosti skúšobných vzoriek. Zatiaľ čo pri vzorkách s rozmermi 200 × 200 × 50 mm ($h/d = 4,0$) bol percentuálny rozdiel medzného napätia celej série 27,1 %, tak pri vzorkách s rozmermi 150 × 150 × 50 mm ($h/d = 3,0$) bola zaznamenaná zmena o hodnote 27,2 % a nakoniec pri vzorkách s rozmermi 100 × 100 × 50 mm ($h/d = 2,0$) o hodnote 13,4 %.

Pri analýze celého súboru vzoriek bolo zaznamenané v prvotných fázach zaťaženia takmer lineárne pružné správanie vzostupnej vetvy krivky. Jej čiastočne zakrivenie a nelineárny charakter nastal v dôsledku prítomnosti inklúzií v betónovej matrici, pričom na ich rozhraní vznikali počiatočné trhliny. Ďalší nárast tlakového napätia zvýšil množstvo a dĺžku trhlín, čo sprevádzalo väčšie zakrivenie vzostupnej vetvy až do nadobudnutia medznej pevnosti. V neskorších štádiách zaťažovania nastalo väčšie zoskupenie trhlín a ich rast sa stal nestabilným. Pri nadobudnutí medzného napätia bola dosiahnutá kritická dĺžka a hustota trhlín, čo spôsobilo porušenie vzorky.

Obr. 2 Graf závislosti normovanej pevnosti betónu a pomeru u/u_{peak} vzoriek s rozmermi $200 \times 200 \times 50$ mm. Obr. 3 Graf závislosti normovanej pevnosti betónu a pomeru u/u_{peak} vzoriek s rozmermi $200 \times 200 \times 50$ mm. Obr. 4 Graf závislosti normovanej pevnosti betónu a pomeru u/u_{peak} vzoriek s rozmermi $200 \times 200 \times 50$ mm.

Na Obr. 5 je uvedená súhrnná analýza nameranej normovanej pevnosti skúšobných vzoriek. Jej vyhodnotenie na troch rôznych veľkostiach skúšobných vzoriek neprekázalo jasne definovaný vzájomný vzťah medzi počtom inklúzií a nameranou normovanou pevnosťou, čo je v protiklade z predchádzajúcimi zisteniami [5]. Z výsledkov experimentov je možné konštatovať, že nárast počtu inklúzií z 1 na 4 zvýšil normovanú pevnosť telies pri vzorkách s rozmermi $200 \times 200 \times 50$ mm (s výnimkou vzorky S-8), zatiaľ čo pre vzorky s rozmermi $150 \times 150 \times 50$ mm a $100 \times 100 \times 50$ mm toto tvrdenie nemožno uplatniť. Zároveň je možné všeobecne uviesť, že nameraná normovaná pevnosť skúšobných vzoriek sa zvýšila pri zmenšení rozmeru skúšobnej vzorky, resp. pri poklese štihlosti.

Obr. 5 Graf závislosti normovanej pevnosti skúšobných vzoriek pri zmene ich veľkosti.

5 ZÁVER

Na základe sérií vykonaných experimentálnych skúšok možno konštatovať, že vplyv počtu asymetricky usporiadaných inklúzií závisel od veľkosti skúšobných telies pri ich meniaci sa štihlosti. Zistilo sa, že účinok rozdielného počtu inklúzií sa najviac prejavil na vzorkách s rozmermi $200 \times 200 \times 50$ mm a $150 \times 150 \times 50$ mm, pričom pri zmenšení veľkosti vzoriek na $100 \times 100 \times 50$ mm sa tento rozsah znížil. Tento jav môže byť vysvetlený relatívnou zmenou objemu inklúzií vzhľadom na meniacu sa veľkosť skúšobnej vzorky. Na druhej strane, zmena veľkosti inklúzií ovplyvnila plochu rozhrania. Vplyv slabého rozhrania (počet, veľkosť) tak mohla negatívne ovplyvňovať dosahovanú pevnosť skúšobných vzoriek vzhľadom na prítomnosť tuhej inklúzie v relatívne mäkkej matici. Ďalej sa zistilo, že medzi vzorkou bez inklúzie a vzorkami s meniacim sa počtom inklúzií nebola preukázaná korelácia nameraných hodnôt medzného napätia. Tento problém sa môže vyriešiť opakovaním experimentu a kvantifikáciou výsledkov, alebo porovnaním výsledkov experimentu s numerickým modelom.

PodĎakovanie

Túto prácu podporila Slovenská vedecká grantová agentúra na základe zmluvy č. VEGA 1/0363/21.

Použité zdroje

- [1] BILČÍK, Juraj a Ludovít FILLO. Betónové konštrukcie: Konštruovanie pomocou prúťových modelov. Bratislava: STU v Bratislave, 1997, 110 s. ISBN: 80-227-0922-0.
- [2] VONK, R. A. Softening of concrete loaded in compression. PhD Thesis. Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1992, 192 s.
- [3] VAN MIER, J. G. M. Failure of concrete under uniaxial compression: An overview. In: 3rd Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-3). Freiburg, 1998, s. 1169-82.
- [4] VERVUURT, A. a J. G. M. VAN MIER. Interface fracture in cement-based materials. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-2). Freiburg, 1995, s. 295-304.
- [5] CHOI, S. Nondestructive evaluation of cement-based materials with computer vision. In: 3rd Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-3). Freiburg, 1998, s. 17-24.
- [6] KOVÁČ, Maroš. Compressive strength of concrete specimens with inclusions. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 867. IOP Publishing, 2020, 8 s.