

УДК 691.5

А. Ліснічук; Н. Івантишин канд.техн.наук; Р. Юхим канд.техн.наук

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

РОЗРАХУНКОВА СХЕМА ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ФІБРОБЕТОНІВ

Резюме. Розроблено модель міцності фібробетону за розтягу. На основі моделі встановлено формулу для оцінювання міцності фібробетону, яка враховує мікро тріщини і пори у структурі матеріалу і наявність армуючих волокон. Для підтвердження отриманої залежності проведено експериментальні дослідження з встановлення міцності цементного каменю, армованого фіброю різної природи і різного об'ємного вмісту. Теоретичний прогноз міцності фібробетону добре корелює з експериментальними даними.

Ключові слова: цементний камінь, фібра, міцність, фібробетон.

A. Lisnichuk, N. Ivantyshyn, R. Yukhym

DESIGN MODEL FOR DETERMINATION OF THE FIBER- REINFORCED CONCRETE STRENGTH

Summary. Structural material that is able to solve complex problems in the toughest construction industry is dispersed reinforced concrete (reinforced concrete). This is composite-based cement matrix reinforced with fibers of various nature (steel, glass, basalt, carbon, polymeric and others). Today three types of reinforcing fiber materials are mostly widely used: fibers in the form of short segments of thin steel wire, glass fibers and fibers based on polypropylene. The widespread use of reinforced concrete is caused by higher rates of strength, fracture toughness, impact strength, less micro cracking during hardening compared with classical concrete.

The strength model for the tensile fiber-reinforced concrete was developed. Analytical dependence for strength assessing of material, which allows considering micro-cracks and pores in its structure and the presence of reinforcing fibers was obtained. For its verification experimental research has been carried out.

In the research to prepare solutions the following materials were used: basalt fiber; Portland; plasticizer. On the basis of the prismatic component 40×40×160 mm size samples for tensile bending tests were made. Water-cement ratio was 0.4 with a plasticizer in an amount of 0.04% by weight of cement. The fiber (of 12 mm) length was used, which in unexploited state looks like bundles of filaments. The solution was stirred for 5 minutes until a homogeneous mixture was obtained, after which it was compacted on a vibration table to remove air bubbles and to reduce the number of pores. All series of samples for testing within 28 days were in the laboratory.

According to the data obtained it follows that the composite tensile strength with 2% of fibre increases more than in 2 times compared with the base unreinforced material. Comparison of theoretical estimations of the composite strength with experimental data testifies high enough reliability of the predicted strength calculated for the scheme developed in the work.

Key words: cements tone, fiber, strength, fiber-reinforced concrete.

Вступ. Конструкційним матеріалом, що здатний вирішувати комплекс найскладніших задач у будівельній галузі, є дисперсно армований бетон (фібробетон). Це – композит на основі цементної матриці, армований волокнами різної природи (сталеві, скляні, базальтові, вуглецеві, полімерні та деякі інші).

На сьогодні в основному широко використовуються три види армуючих волокнистих матеріалів: волокна у вигляді коротких відрізків тонкого сталюого дроту, скляні волокна й волокна на основі поліпропілену. Широке використання армованого

бетону зумовлене вищими показниками міцності, тріщиностійкості, ударної в'язкості, меншим мікророзтріскуванням під час тужавіння порівняно з класичним бетоном.

Розглядаючи бетон як конгломерат цементного каменю, піску та щебеню, розрізняють три рівні його структури:

- Мікроструктура – структура цементного каменю.
- Мезоструктура – структура цементно-піщового розчину.
- Макроструктура – структура щебеню і розчину.

Кожна з цих структур вносить свій вклад у міцність бетону, однак значною мірою вона визначається міцністю цементного каменю.

Метою роботи є розробити математичну модель композитів на основі цементної матриці, що дасть можливість прогнозувати міцність таких матеріалів, тобто створювати матеріали із наперед заданими міцнісними властивостями.

У структурі цементного каменю розрізняють дві групи дефектів, які впливають на його міцнісні характеристики: округлі типу порожнин (пори) і гострокінцеві типу тріщин. Гострокінцеві є визначальними в умовах розтягу матеріалу, оскільки викликають високу концентрацію напружень в околі вершин, унаслідок чого відбувається руйнування. Округлі дефекти є достатньо безпечні за розтягу, а в умовах стиску ініціюють зони напружень розтягу, де і з'являються тріщини вже за навантажень, що складають 50% від руйнуючих [1].

Дослідимо деформування цементного каменю за одновісного розтягу. Моделювання реалізуємо в межах двовимірної моделі тіла. В реальних матеріалах тріщини та пори з тріщинами на їх контурі випадково орієнтовані відносно напрямку дії зусиль розтягу. Розглянемо випадок колінеарного розміщення нескінченного числа тріщин як найбільш несприятливий варіант розміщення дефектів з точки зору міцності. Знехтуємо також впливом дефектів, які знаходяться в паралельних площинах, що збільшить запас розрахункової міцності. Таким чином, розглядаємо схему розміщення дефектів та навантаження тіла, як зображено на рис. 1.

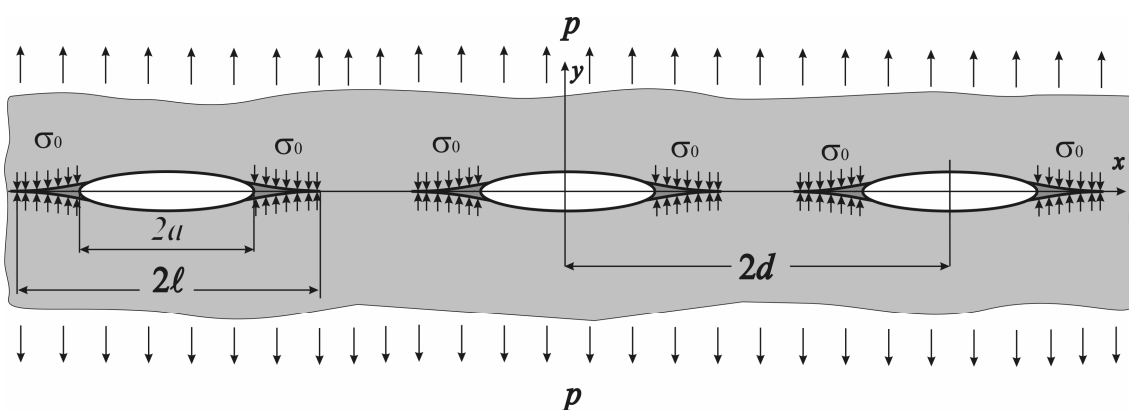


Рисунок 1. Розрахункова схема розтягу матеріалу з тріщинами

Figure 1. Calculation model of the tensile material with crack

Враховуючи малий розмір тріщин, концепція коефіцієнтів інтенсивності напружень тут незастосовна. Скористаємося відомим розв'язком цієї задачі у межах

моделі Леонова–Панасюка [2, 3], де отримано співвідношення, що пов’язує інтенсивність зовнішнього навантаження p з розміром зони передруйнування

$$\cos\left(\frac{\pi p}{2\sigma_0}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{2d}\right)}{\sin\left(\frac{\pi l}{2d}\right)}. \quad (1)$$

Значення σ_0 еквівалентне границі міцності об’ємів цементного каменю між порами й тріщинами.

Прийнявши умову злиття зон передруйнування сусідніх тріщин за критерій руйнування матеріалу, отримуємо формулу, яка дозволяє визначити границю міцності цементного каменю за розтягу

$$R_{bt}^c = p_* = \sigma_0 \left(1 - \frac{a}{d}\right). \quad (2)$$

Зазначимо, що відношення розмірів тріщини до відстані між ними a/d відображає вміст дефектів у матеріалі, тобто його пошкодженість.

Розглянемо тепер в умовах розтягу цементний камінь, армований мікрОВОлокнами довільної жорсткості. Товщину цих волокон вважатимемо значно меншою від характерних розмірів домінуючих дефектів – пор та тріщин. Це припущення дає змогу розглядати матеріал між порами як однорідний з певними ефективними характеристиками. Армування неперервними або дискретними волокнами може бути як напрямленим так і хаотичним. Стримувальний вплив мікрОВОлокон у зонах передруйнування виражаємо рівномірно розподіленими зусиллями σ_0^f . Їх інтенсивність описуємо відомою залежністю Келлі–Тайсона [4], модифікованою для довільного (направленого або хаотичного) дисперсного армування

$$\sigma_0^f = \lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_0 (1 - V_f), \quad (3)$$

де σ_f – міцність волокон; l_c – гранична неефективна довжина волокна; l – довжина волокна; V_f – об’ємний вміст фібри; λ – коефіцієнт приведення хаотичного армування до напрямленого [5] ($\lambda=1$ – для напрямленого армування вздовж осі розтягу; $\lambda=0,33$ – для хаотичного армування).

Враховуючи залежності (2), (3), отримуємо розрахункову формулу для прогнозування міцності композита (фібробетону) на основі цементної матриці

$$R_{bt}^f = \left(1 - \frac{a}{d}\right) \left(\lambda \sigma_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_0 (1 - V_f) \right). \quad (4)$$

На рис. 2 наведено графічні залежності міцності матеріалів R_{bt}^f за різного об’ємного вмісту волокон базальту, поліпропілену, скла та вуглецю й пошкоджень у цементній матриці. Механічні характеристики волокон наведено у таблиці 1.

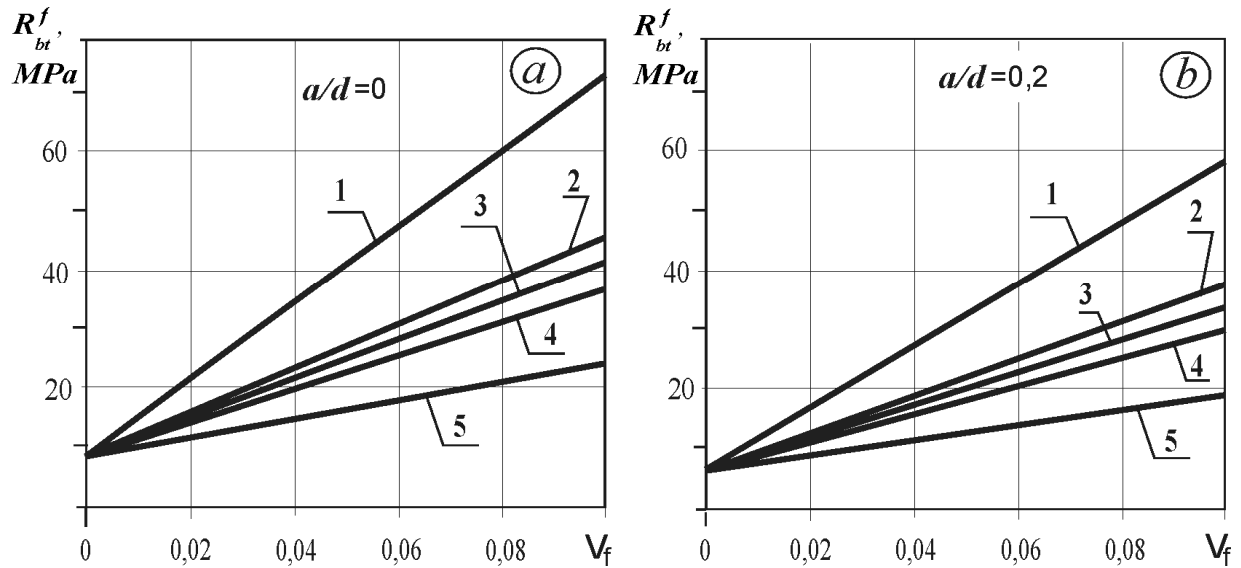


Рисунок 2. Залежність прогнозованої міцності композита R_{bt}^f від об'ємного вмісту армувальних волокон: вуглецевих (1); базальтових (2); скловолокон (3); сталеві (4) та поліпропіленової фібри (5); за відсутності пор (a) та параметра пористості $a/d = 0,2$ (b)

Figure 2. Dependence of the predicted composite strength on volume content of reinforcing fibers: carbon (1); basalt (2); glass fibers (3); steel (4) and polypropylene fibers (5); in the absence of pores (a) and porosity parameter $a/d = 0,2$ (b)

Таблиця 1.

Механічні характеристики фібри

Назва фібри	Густина, g/cm^3	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, GPa
Базальтова	2,65	1200	12
Вуглецева	2	2000	245
Скляна	2,6	1050	75
Стальна	7,8	900	200
Поліпропіленова	0,9	500	5

З метою підтвердження достовірності отриманої аналітичної залежності (4) провели експерименти щодо встановлення міцності композиту на основі цементної матриці за різного об'ємного вмісту базальтової фібри. Для приготування розчинів використали такі матеріали: фібру базальтову; портландцемент ПЦ II/A-3-500; гіперпластифікатор.

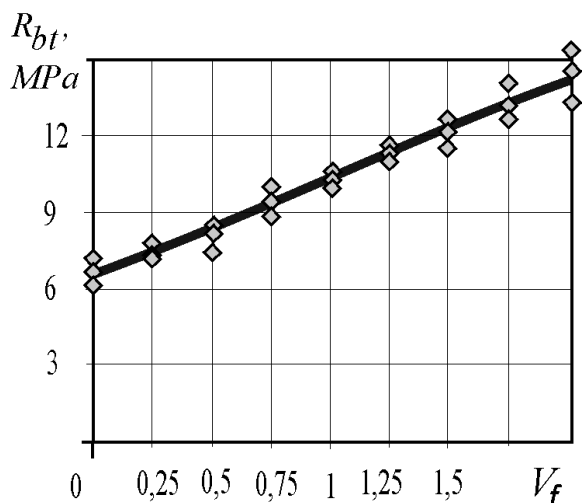


Рисунок 3. Міцність на розтяг цементного каменю, армованого різним умістом базальтової фібри

Figure 3. Tensile strength of cement reinforced with different content basalt fiber

корелюють між собою. З наведених даних випливає, що міцність композиту на розтяг при 2% фібри зростає більше ніж у два рази порівняно з базовим неармованим матеріалом.

Висновки. Враховуючи концепції механіки руйнування отримано залежність, що дозволяє прогнозувати міцність композита на основі цементної матриці за розтягу. Параметрами в розрахунковій формулі є об'ємні вмісти фібри та тріщиноподібних дефектів, границі міцності складових композита, геометричні характеристики фібри та деякі інші. Проведені розрахунки свідчать про суттєвий вплив дефектності цементної матриці на міцність композита. Порівняння теоретичних оцінок міцності композита з експериментальними даними свідчить про досить високу достовірність прогнозу міцності за розрахунковою схемою, розвиненою в роботі.

Conclusions. Dependence to predict the strength of the cement-based composite matrix tensile taking into account fracture mechanics concepts, was obtained. The parameters in the calculation formula are: fiber volume content and crack defects, ultimate tensile strength of the composite components, geometric characteristics of fiber and others. Carried out calculations testify the impact of defects on the strength of cement matrix composite. Comparison of the theoretical and experimental strength data testify high reliability of prediction of strength estimations. This gives reason to use the dependencies when creating composites with desired characteristics on the basis of the concrete matrix.

Список використаної літератури

1. Panasyuk, V.V. Injection Technologies for Repair of Damaged Concrete Structures [Text] / V.V. Panasyuk, V.I.Marukha, V.P.Sylovanyuk // Springer. – 2014. – 230 p.
2. Витвицький, П.М. Пружнопластична рівновага пластинки з періодичною системою щілин [Текст] / П.М.Витвицький // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1970. – № 6. – С. 524 – 527.
3. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов. – М. Наука.: 1977. – 640 с.

На основі наведених компонент виготовлені призматичні зразки розміром 40×40×160 mm для випробування на розтяг при згині. Водоцементне співвідношення брали 0,4 з пластифікатором Verament ТВ- 1 в кількості 0,04% від маси цементу. В дослідженнях використовували фібру (ровінг) завдовжки 12 mm, яка у неексплуатованому стані має вигляд пучків ниток. Розчин перемішували до отримання однорідної суміші протягом 5 min, після чого ущільнювали на вібраційному столі з метою видалення повітряних бульбашок для зменшення кількості пор. Усі серії зразків до випробувань упродовж 28 днів знаходились у лабораторних умовах.

На рис. 3 розрахунковим даним відповідає суцільна лінія, точками позначено дані експериментів.

Як бачимо, результати досить добре

4. Kelly, A. Fiberstrengthened materials [Text] / A. Kelly, W. Tyson // High-strength materials. – New York. – 1965. – № 6. – P. 578 – 600.

5. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции: монография [Текст] / Ф.Н. Рабинович. – М.: Издательство АВС, 2004. – 560 с.

Отримано 25.09.2015