

МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ З ПОЗИЦІЙ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ

Отримана розрахункова залежність, що встановлює зв'язок границі міцності бетону на стиск з такою ж характеристикою на розтяг. Установлено, що параметрами мікроструктури бетону, які впливають на його міцність, окрім чинників мезо- та макрорівнів, є розміри пор в цементному камені та їх об'ємний вміст. Залежність дозволяє керувати процесами оптимізації міцності матеріалу за цими параметрами.

Ключові слова: бетон, цементний камінь, тріщина, міцність.

Вступ

Бетон – неоднорідний матеріал (конгломерат цементного каменю і металевих наповнювачів різних розмірів та твердості). Серед його фізико-механічних характеристик важливішими є міцність на розтяг і стиск. Поки що наука про фізико-механічні властивості бетонів сформувала лише окремі аспекти теорії деформування та міцності бетонів.

Відомо, що провідну роль в міцності бетону відіграє цементний камінь [1]. Розглядаючи бетон як композитний матеріал, розрізняють три типи його структури [2, 3]: мікроструктура – структура цементного каменю; мезоструктура – структура цементно-піщаного розчину; макроструктура – структура системи щебінь-цементно-піщаний розчин. Кожна з названих структур вносить свій вклад у міцність бетону.

Матеріали та методика досліджень

В роботі [4] на основі аналізу структур бетону запропоноване співвідношення для встановлення міцності бетону на розтяг

$$R_{bt} = A_1 R_{bt}^p = A_1 \cdot A_2 \cdot R_{bt}^u, \quad (1)$$

де A_1, A_2 – безрозмірні коефіцієнти, що враховують якість макро- та мезоструктури бетону відповідно; R_{bt}^p, R_{bt}^u – міцність цементно-піщаного розчину та цементного каменю відповідно.

Результати експериментів показали [2], що аналогічне співвідношення, записане для міцності бетону на стиск, містить ті ж самі коефіцієнти A_1 і A_2 :

$$R_b = A_1 A_2 R_b^u, \quad (2)$$

тут R_b^u – міцність цементного каменю на стиск.

Із співвідношень (1), (2) випливає, що міцність бетону значною мірою визначається міцністю цементного каменю. Цементний камінь має капілярно-пористу бу-

дову з розміром пор до $100 \mu\text{m}$. Його міцність на розтяг та стиск визначається кількістю пор у структурі.

Теорія та аналіз отриманих результатів

За розрахункову модель цементного каменю візьмемо пластину з системою кругових отворів радіусом R . Припустивши концентрацію пор такою, що відсутня їх взаємодія, будемо розглядати ізольований отвір в пластині. Нехай така пластина стискається однорідними зусиллями q на значній відстані від отвору (рис. 1).

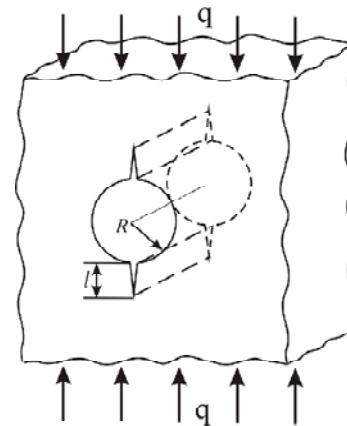


Рис. 1. Тріщини біля пори, що виникають за умов стиску

$$q_* = \sqrt{\frac{\pi \cdot (1 + \lambda)^7}{4R((1 + \lambda)^2 - 1)}} K_{IC}, \quad \lambda = l/R. \quad (3)$$

На рис. 2 на основі формули (3) побудовано залежність граничного навантаження $\frac{q_* \sqrt{R}}{K_{IC}}$ від нормованої довжини тріщини l/R .

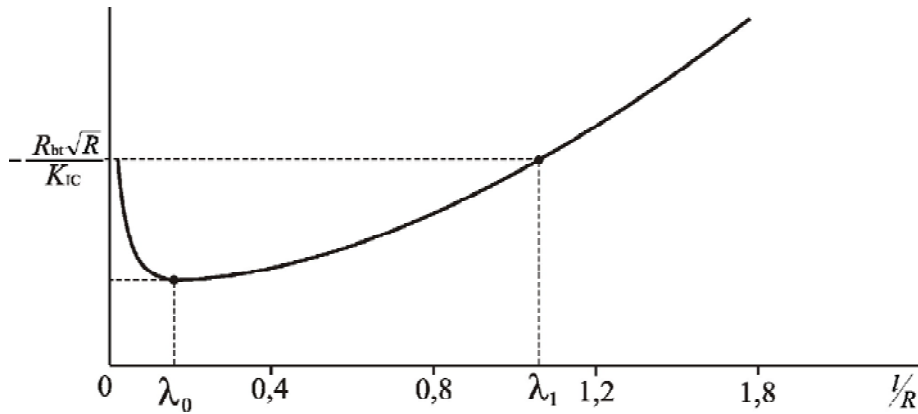


Рис. 2. Залежність граничного навантаження від довжини тріщини

Як бачимо, поширення тріщин, ініційованих на контурі кругового отвору зусиллями стиску інтенсивності $q_* = -R_{bt}$, спочатку нестійке, тобто вони розповсюджуються до розмірів $l = \lambda_1 R$ без збільшення навантаження. Для подальшого росту тріщини необхідно збільшувати інтенсивність навантажень ($|q_*| > R_{bt}$).

Таким чином, у тілі з отворами за умов стиску виникають системи дефектів – тріщини (1). Оскільки отвори віддалені один від одного так, що не взаємодіють, то і тріщини, направлені вздовж осі стиску, мало взаємодіятимуть між собою. Вважатимемо, що в бетоні по осі стиску є отвори, розміщені на однаковій відстані ($2d$) один від одного, і тріщини, що виходять на границю кожного отвору. Зовнішні навантаження стиску q , за яких тріщини зливаються в одну, що перетинає все тіло, приймаємо за границю міцності цементного каменю за стиску R_b^u . Цю характеристику матеріалу встановлюють за формулою (3), покладаючи довжину тріщин l рівною половині віддалі між порами d . Тоді

$$R_b^u = \sqrt{\frac{\pi \cdot (1 + d/R)^7}{4R((1 + d/R)^2 - 1)}} K_{IC}^u \quad (4)$$

Міцність матеріалу на розтяг R_{bt}^u з позицій механіки руйнування визначаємо залежністю

$$R_{bt}^u = \frac{K_{IC}^u}{Y \sqrt{\pi l_0}} \quad (5)$$

де X – параметр, що залежить від геометрії тріщин, їх розміщення в тілі тощо; l_0 – половина довжини тріщини, яку вважаємо характеристикою матеріалу, в даному випадку цементного каменю. Її визначаємо на підставі експериментальних даних R_{bt}^u і K_{IC}^u .

За таких припущень і використовуючи співвідношення (4), (5) і наступну формулу, яка зв'язує границі міцності матеріалу на стиск і розтяг, отримуємо:

$$R_b^u = R_{bt}^u Y \sqrt{\frac{\pi l_0}{4R}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot (1 + d/R)^7}{(1 + d/R)^2 - 1}} \quad (6)$$

Границя міцності на розтяг цементного каменю у віці 28 діб може коливатися від 3 до 7 МПа, залежно від водоцементного відношення. Тріщиностійкість K_{IC} цементного каменю того ж віку змінюється в межах 0,11 – 0,4 МПа \sqrt{m} . Значення Y приймемо рівним 1, що відповідає лінійним тріщинам у плоскій задачі теорії пружності. З формули (5) отримуємо для l_0 діапазон зміни від 0,2 до 0,4 мм. Розмір пор приймемо рівним 0,1 мм. Об'ємний вміст пор 20 %, що відповідає відстані між ними $d \approx R$. Підставивши ці дані у співвідношення (6) отримаємо $R_b^u \approx (14...20)R_{bt}^u$, що відповідає результатам експериментів.

На основі співвідношень (1), (2), (6) для бетонів отримуємо такий зв'язок міцності на стиск (R_b) з міцністю на розтяг (R_{bt}):

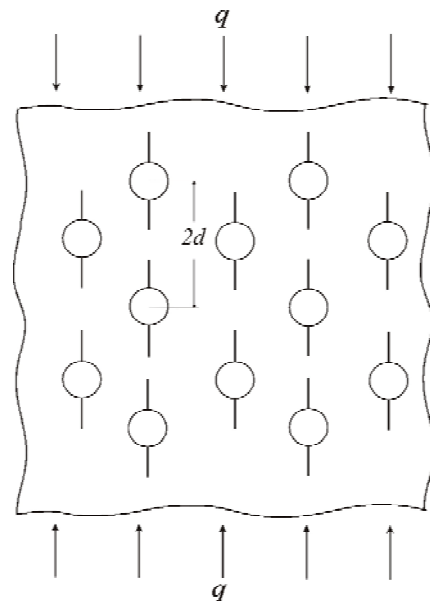


Рис. 3. Схематичне зображення пор з тріщинами в бетоні в умовах стиску

$$R_b = R_{bt} \cdot \frac{\pi Y}{2} \sqrt{\frac{l_0(1+d/R)^7}{R((1+d/R)^2 - 1)}} \quad (7)$$

Висновки

З формули (7) випливає, що міцність бетону на стиск лінійно залежить від міцності на розтяг. Крім цього, з формули (7) випливає також, що ця характеристика зв'язана більш складною залежністю з параметрами l_1 , R , d (довжини тріщини, розміром пор та відстанню між ними). Ця залежність дозволяє оптимізувати матеріал за цими параметрами. Зокрема, вибираючи технологічні прийоми, що дозволяють зменшувати розмір пор (R) та збільшувати відстань між ними (d), (такими прийомами є вібрування бетону, оптимізація водо-цементного співвідношення тощо) можна досягати оптимальної міцності бетону.

Список літератури

1. Берг О. Я. Физические основы прочности бетона и железобетона / Берг О. Я. – М. : ГСИ, 1961. – 96 с.
2. Грушко И. М. Повышение прочности и выносливости бетона / Грушко И. М., Ильин А. Г., Чихладзе Э. Д. – Харьков : «Вища школа», 1986. – 152 с.
3. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Зайцев Ю. В. – М. : Стройиздат, 1982. – 196 с.
4. Грушко И. М. Прочность бетонов на растяжение / Грушко И. М., Ильин А. Г., Рашевский С. Т. – Х. : Вища шк., изд-во при Харьк. ун-те, 1965. – 136 с.
5. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / Панасюк В. В. – К. : Наук. думка, 1991. – 415 с.

Одержано 23.04.2013

Силованиук В.П., Онищак Н.В., Горбач П.В. Моделирование мощности и разрушения бетона с позиции механики разрушения

Получена зависимость, устанавливающая связь предела прочности бетона на сжатие с такой же характеристикой на растяжение. Установлено, что параметрами структуры бетона, влияющими на его прочность, кроме мезо- и макропараметров, являются размеры пор в цементном камне и расстояние между ними. Зависимость позволяет управлять процессами оптимизации прочности материала за этими параметрами.

Ключевые слова: бетон, цементный камень, трещина, прочность.

Sylovaniuk V., Onyshchak N., Gorbach P. Modeling of concrete strength and fracture by the fracture mechanics criteria

The resulting estimated relationship that establishes a connection limit on compressive strength of concrete with the same characteristic stretching. Found that the parameters of the microstructure of concrete, which may affect its durability, but factors meso- and macrolevels, is the size of the pores in the cement and stone surround content. Dependence allows you to control the optimization process of the material on these parameters.

Key words: concrete, cement stone, crack, strength.