

ТЕОРЕТИКО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОВНІСТЮ РІВНОВАЖНОЇ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ ВАЖКОГО БЕТОНУ З ТРІЩИНОЮ НОРМАЛЬНОГО ВІДРИВУ

Солодкий С.Й.

Білоус А.Б.

Васьків Н.О.

Національний університет “Львівська політехніка”

Вступ

Серед найвідоміших методів оцінювання тріщиностійкості бетонів можна виділити чотири основні групи:

- непрямі методи, за якими оцінювання здійснюється за коефіцієнтами, що відображають сполучення фізико-механічних властивостей або самі властивості бетону – співвідношення міцностей на розтяг (згин) і стиск, граничну розтяжність, деформації усадки тощо;
- методи безпосереднього оцінювання, що ґрунтуються на візуальному спостереженні тріщини, наприклад, метод кілець, сутність якого полягає у стисканні кільця цементною системою при усадці;
- методи, що ґрунтуються на моделюванні структури бетону, на точність оцінювання яких впливають припущення, що прийняті в моделях;
- методи механіки руйнування, за якими отримують якісні та кількісні характеристики тріщиностійкості, зокрема, стандартизований ГОСТ 29167–91 метод [1], що реалізовує енергетичний підхід до оцінювання тріщиностійкості.

Характеристики тріщиностійкості бетонів, отримані за методами механіки руйнування, найбільш об’єктивно відображають фізичну сутність процесів деформування та руйнування бетонів і використовують для порівняння різних варіантів складу бетону, технологічних процесів виготовлення і контролю якості бетонів, аналізу причин руйнування конструкцій, розрахунку конструкцій з урахуванням дефектності та умов експлуатації.

Проте різноманітність методик і обладнання, що використовуються при проведенні досліджень, не дають змогу коректно порівняти дані різних дослідників і внормувати показники тріщиностійкості бетону залежно від його класу міцності на стиск і рівня надійності, прийнятого при розрахунку конструкції.

Метою роботи є теоретико-експериментальний аналіз повністю рівноважної діаграми деформування бетонів із тріщиною нормального відриву в координатах «навантаження – прогин» [1] і розроблення на її основі інтегральної енергетичної характеристики тріщиностійкості бетону, а також критерію його руйнування при згині.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] підтверджено, що повністю рівноважні діаграми деформування бетонів із штучно створеною тріщиною в координатах «навантаження – прогин» є відображенням взаємозв’язку структури, міцності та тріщиностійкості бетону і мають подібний характер для різних рівнів структури бетону. На підставі теоретичного та експериментального аналізу отриманих

результатів запропоновано узагальнену функцію, що описує повністю рівноважну діаграму деформування [3].

Методи досліджень і матеріали

Випробування зразків із штучно створеною тріщиною нормального відриву за схемою триточкового згину ґрунтується на моделі бетону з фіктивною тріщиною [4]. У даній моделі припускається, що після досягнення зовнішнім напруженням значення, що відповідає границі міцності бетону на розтяг при згині, утворюється зона локалізованої деформації – зона передруйнування, в якій напруження зменшується зі зростанням прогину. За наявності спеціального обладнання отримують повністю рівноважну діаграму деформування бетону (ПРДД) у координатах «навантаження – прогин», конфігурація якої є важливою характеристикою опору руйнуванню бетону.

Рівноважні механічні випробування на стадії локальної деформації зразка характеризуються забезпеченням адекватності зміни зовнішніх сил внутрішнім зусиллям матеріалу з відповідним статичним розвитком магістральної тріщини і дають змогу отримати спадну вітку діаграми, яка є квадратною гіперболою.

Важливою перевагою концепції рівноважних випробувань є те, що розраховані за ПРДД енергетичні та силові характеристики руйнування бетону інваріантні до умов випробувань і об'єктивно відображають реальні фізичні процеси його руйнування при механічних навантаженнях [5].

При випробуванні зразків на згин процес руйнування обумовлюється розвитком тріщини нормального відриву, що дає змогу визначити фактичну площу поверхні руйнування.

При аналізі ПРДД найбільш доцільно застосовувати концепцію нелінійної механіки руйнування, яка дозволяє поряд із традиційними механічними характеристиками визначити комплекс силових та енергетичних параметрів руйнування бетону. Побудова та аналіз ПРДД дає змогу реалізувати енергетичний підхід для оцінювання тріщиностійкості бетону. Отримане прямим способом за ПРДД значення інтегральної енергії руйнування включає термодинамічну величину поверхневої енергії в умовах ідеально крихкого відриву та дисипацію енергії за рахунок незворотніх деформацій на фронті тріщини під час її просування [6].

Відповідно до рекомендацій [1] на кафедрі «Автомобільні шляхи» Національного університету «Львівська політехніка» здійснюються дослідження тріщиностійкості бетонів на установці, яка забезпечує контрольований режим руху тріщини [3]. Для узгодженої роботи механічної та вимірювальної частин розроблено програмне забезпечення, що дає змогу записувати рівноважну діаграму деформування бетону з продуктивністю десять замірів значень навантаження (F) і відповідних йому значень прогину (V) на секунду.

Досліджено тріщиностійкість важких бетонів на цементах різних за речовинним складом типів, зокрема, на композиційних (V тип). При проектуванні складу бетонної суміші змінювали коефіцієнт розсунення зерен щебеню, витрату цементу, гранулометричний склад заповнювачів, умови тверднення бетону в ранньому віці та інші технологічні чинники [3].

Результати досліджень

Загальний вигляд експериментальної ПРДД бетону після обробки даних випробувань представлено на рис. 1.

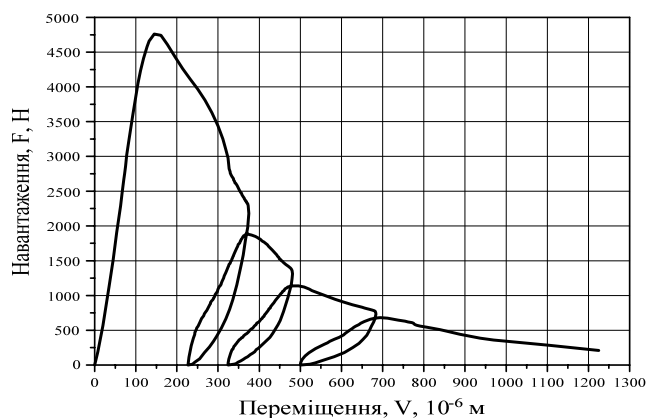


Рис. 1. Повністю рівноважна діаграма деформування бетону при згині

Узагальнену діаграму деформування, характерну для бетонів різної макроструктури представлено на рис. 2. Характеристиками діаграми можна вважати: кут нахилу висхідної вітки діаграми до осі абсцис (α), кут нахилу спадної вітки до осі абсцис (β), точки – закінчення прямолінійної ділянки висхідної вітки (1), зламу висхідної вітки (2), зміни опуклості спадної вітки (3), мінімального радіусу кривизни (4), дефрагментації (5).

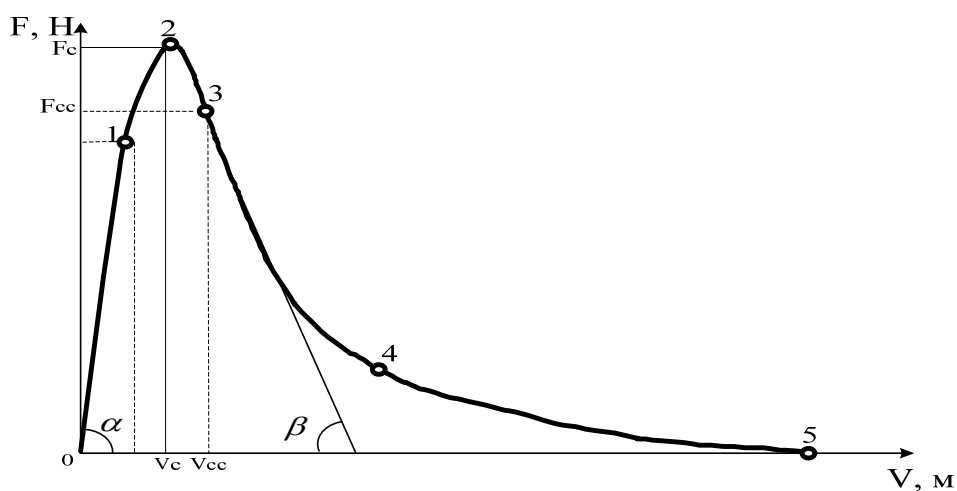


Рис. 2. Узагальнена діаграма деформування бетону з характерними точками

Повністю рівноважна діаграма деформування бетону описується комбінацією степеневої та експоненційної функцій за допомогою наступного виразу [7]:

$$F(V) = AV^B e^{CV}, \quad (1)$$

$$\text{де } A = F_c \left(\frac{e}{V_c} \right)^B, \quad B = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_{cc}}{V_c} \right)^2}, \quad C = -\frac{B}{V_c},$$

або

$$F(V) = F_c \left(\frac{e}{V_c} \right)^{\left(1 - \frac{V_{cc}}{V_c}\right)^{-2}} \cdot V^{\left(1 - \frac{V_c}{V_c}\right)^{-2}} \cdot e^{-\frac{\left(1 - \frac{V_c}{V_c}\right)^{-2}}{V_c} V},$$

де F_c, V_c – координати точки зламу висхідної вітки діаграми;

F_{cc}, V_{cc} – координати точки перегину спадної вітки діаграми.

Інтеграл функції (1) відповідає загальній роботі, що витрачається на деформування та руйнування бетону, а його питомий показник (відношення до площі поперечного перерізу бетонного елемента) запропоновано як інтегральну енергетичну характеристику опору руйнуванню бетонного елемента – енергетичний потенціал тріщиностійкості. Цей показник для досліджених бетонів змінюється в діапазоні 140-300 Дж/м² і пропонується для використання при нормуванні бетонів за критерієм тріщиностійкості.

Різні ділянки діаграми відповідають різним етапам деформування бетону. Так, лінійна ділянка (0-1) відповідає пружному деформуванню матеріалу з лінійною залежністю між напруженням і прогином. При подальшому зростанні навантаження у бетоні починають поширюватися наявні мікротріщини та утворюватися нові – ділянка (1-2). На цьому етапі відбуваються мікропластичні деформації у локальних об'ємах, що обумовлює викривлення діаграми. Питома вага енерговитрат на цій стадії деформування у загальних енерговитратах на докритичне деформування залежить від особливостей мікроструктури бетону. Про це свідчить той факт, що у бетоні на основі композиційного цементу із найменшим вмістом клінкеру (50 мас. %) ця частка становить близько 0,5, для бетону на бездобавочному портландцементі – 0,3. При значеннях навантаженнях, близьких до критичного (F_c) відбувається злиття мікротріщин і утворення макротріщини. Стадія закінчується формуванням зони передруйнування у вершині макротріщини. Як показали проведені дослідження, координати точки зламу висхідної вітки (F_c, V_c) суттєво залежать від мікроструктури бетону, яка обумовлюється речовинним складом цементу.

За точкою зламу можна виділити ділянку 2-3, на якій спостерігається нестійкий розвиток макротріщини після її зрушування. Точка 3, координати якої (F_{cc}, V_{cc}) відповідають зміні кривизни спадної вітки з опуклої на вгнуту є початком стійкого розвитку макротріщини. За даними [76] на цій стадії деформація зразка зосереджується локально тільки у вершині макротріщини, і локальна зона з цього моменту практично визначає загальний прогин зразка. При цьому розкриття тріщини відбувається лінійнопропорційно прогину. Ділянка (3-4) відповідає стійкому розвитку макротріщини до критичного значення, досягнення якого на діаграмі можна ідентифікувати як точку квадратної гіперболи з найменшим радіусом кривизни (т. 4).

Це дає підстави зробити висновок, що цю точку спадної вітки діаграми з позицій механіки руйнування можна розглядати як остаточну точку на діаграмі, координати якої стають відповідними досягненню макротріщиною критичного розміру і вичерпуванню несної здатності бетонного елемента. За точкою 4 на спадній вітці діаграми починається нестійке зростання магістральної тріщини, яке закінчується дефрагментацією бетонного зразка. За критерій руйнування слід приймати критичне значення прогину, з досягненням якого бетонний елемент можна вважати зруйнованим. Експериментальними дослідженнями встановлено, що для важких крупнозернистих бетонів критичний прогин становить $(500-600) \cdot 10^{-6}$ м, для дрібнозернистих бетонів – $(300-400) \cdot 10^{-6}$ м.

Для знаходження математичного виразу для визначення значень критичного прогину диференціюємо функцію (1) і отримуємо вираз першої похідної:

$$F'(V) = A \cdot V^{B-1} \cdot e^{CV} (B + CV) \quad (2)$$

і другої похідної:

$$F''(V) = A \cdot V \cdot e^{CV} (C^2 V^2 + 2BCV + B^2 - B) \quad (3)$$

Графічне зображення першої і другої похідної функції (1) представлено на рис. 3.

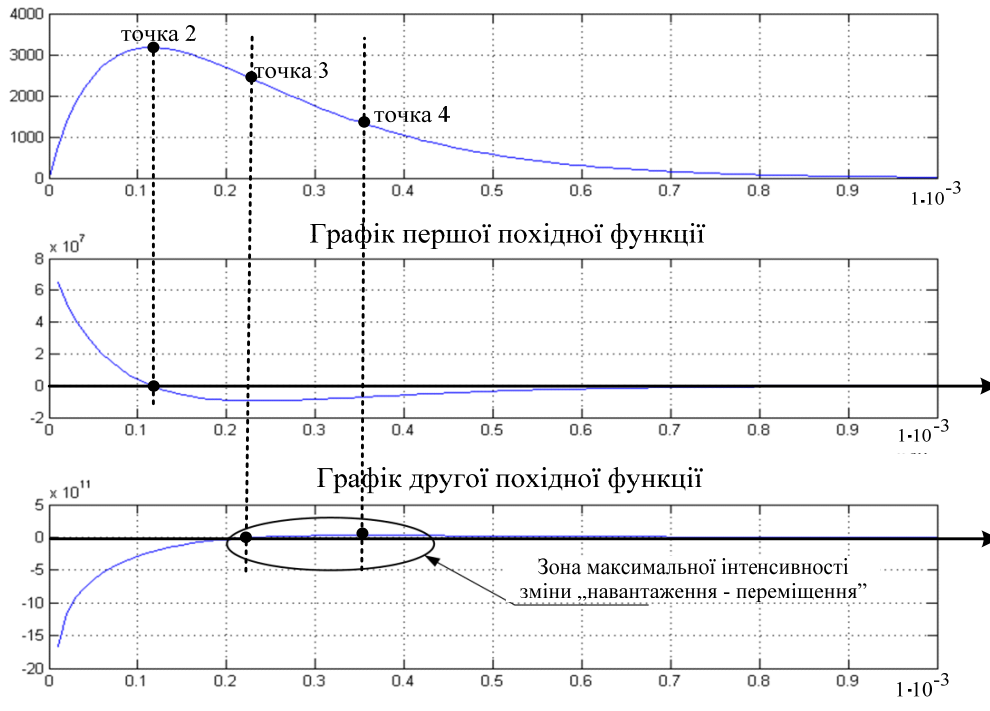


Рис. 3. Графічне зображення першої і другої похідних функції (1)

На рис. 3 видно, що друга похідна має деякий максимум, який можна знайти за правилами знаходження локальних екстремумів, тобто прирівняти вираз третьої похідної до нуля:

$$\frac{d^3 F}{dV^3} = A \cdot V^{B-3} \cdot e^{CV} (C^3 \cdot V^3 + 3B \cdot C^2 \cdot V^2 + 3B \cdot C \cdot V (B-1) + B(B-1)(B-2)) \quad (4)$$

Розв'язок рівняння (4):

$$V^{B-3} = 0, V = 0$$

$$e^{CV} = 0, V = \emptyset$$

$$C^3 \cdot V^3 + 3B \cdot C^2 \cdot V^2 + 3B(B-1)C \cdot V + B(B-1)(B-2) = 0.$$

Потрібний розв'язок знаходиться з коренів кубічного рівняння, для якого він буде єдиним дійсним коренем.

Було проведено обчислення виразу:

$$C^3 \cdot V^3 + 3B \cdot C^2 \cdot V^2 + 3B(B-1) C \cdot V + B(B-1)(B-2) = 0;$$

для таких значень коефіцієнтів $A=33,5 \times 10^6$; $B=0,92$; $C=-7978$ функції (1); розв'язком виразу є критичне значення прогину $V=0,357 \times 10^{-3}$ м.

Висновки

1. Запропоновано інтегральну енергетичну характеристику опору руйнуванню бетонного елемента – енергетичний потенціал тріщиностійкості як питомий показник інтегралу функції, що описує повністю рівноважну діаграму деформування бетону з тріщиною нормального відриву. Цей показник для досліджених бетонів змінюється в діапазоні 140-300 Дж/м² і пропонується для використання при нормуванні бетонів за критерієм тріщиностійкості.
2. Встановлено, що точка на спадній вітці діаграми, за якою починається нестійкий розвиток магістральної тріщини ідентифікується як точка з мінімальним радіусом кривої у вигляді квадратної гіперболи. З позицій механіки руйнування координати цієї точки стають відповідними вичерпуванню несної здатності бетонного елемента, а критерієм руйнування є відповідне значення прогину, з досягненням якого бетонний елемент можна вважати зруйнованим. Експериментальними дослідженнями встановлено, що критичний прогин для дрібнозернистих бетонів становить $(300-400) \cdot 10^{-6}$ м, для важких крупнозернистих бетонів $-(400-500) \cdot 10^{-6}$ м.
3. Запропоновано математичний вираз для знаходження значення критичного прогину.

Література

1. ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Госстандарт, 1991. – 35 с.
2. Солодкий С.Й. Взаємозв'язок структури, міцності і тріщиностійкості бетону в умовах згину / С.Й. Солодкий // Строительство, материаловедение, машиностроение: сборник. научн. трудов. – Днепропетровск: ПГАСА, 2008. – Вып. 47. – С. 594-604.
3. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: монографія / Солодкий С.Й. – Львів: видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – 144 с.
4. Hillerborg A. Analysis of crack formation and in concrete by means fracture mechanics / A. Hillerborg M Moder., P. Peterson // Cement and Concrete Res., 1976, v. 6. – P. 773-782.
5. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / Ю. В. Зайцев. – М.: Стройиздат, 1981. – 196 с.
6. Гузеев Е.А. Анализ разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования / Е.А. Гузеев, Л.А.Сейланов, В.И. Шевченко // Бетон и железобетон. – 1985. – № 10, – С. 10-11.
7. Солодкий С.Й. Застосування повністю рівноважної діаграми деформування для оцінки опору руйнуванню бетонів / С.Й. Солодкий, М.Г. Стащук // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: збірник наук. праць. – Львів: Каменяр, 2007. – Вип. 7 – С. 334-342.