

УДК 539.37

ДО ОСНОВНИХ ПОЛОЖЕНЬ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ ТА ЗАЛІЗОБЕТОНУ

THE MAIN PROVISIONS OF THE FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE

Ротко С.В., к.т.н., доцент, Зорук С.О., Москаленко О.В. (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

Досліджуються основні положення механіки руйнування бетону та залізобетону, основна характеристика лінійної механіки руйнування – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень, основні принципи та положення, що визначають довговічність і механізми руйнування бетону.

Исследуются основные положения механики разрушения бетона и железобетона, основная характеристика линейной механики разрушения - критический коэффициент интенсивности напряжений, основные принципы и положения, которые определяют долговечность и механизмы разрушения бетона.

Актуальність дослідження. Довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно оцінювати на стадіях їхнього проектування, виготовлення елементів і зведення залежно від умов експлуатації у будівлях і спорудах із різноманітними режимами теплових, корозійних і силових впливів. Проблема руйнування повинна стати центральною при вивченні опору залізобетону.

Основна частина. У структурі бетону ще до прикладання зовнішнього навантаження є велика кількість дефектів різного походження і різних розмірів. До того ж бетон і залізобетон є унікальними матеріалами, наявність тріщин у яких передбачено самою сутністю їх роботи під навантаженням; крім того, в них допускається розкриття тріщин на стадії експлуатації до відносно великих розмірів. Інакше кажучи, бетону та залізобетону без тріщин не буває, тому використання методів механіки руйнування при розрахунку конструкцій із цих матеріалів доцільне та виправдане.

Методи розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій ґрунтуються на теорії міцності бетону, а тому на неї орієнтуються при виборі його складу. Вважається, що правильно підібраний склад бетону лише за міцністю, з умови мінімальної витрати цементу, забезпечує безремонтний строк служби конструкцій будівель і споруд, встановлений вимогами будівельних нормативів.

Але це не так. Адже міцний - це ще не довговічний, а довговічний - це міцний (адже якщо розрахувати довговічність за заданими зовнішніми навантаженнями та впливами, то міцність, або несуча здатність, буде забезпечена однозначно). Міцність – варіантна, вона не здатна нести інформацію про довговічність бетону та конструкцій із нього. Тому не дивно, що широке застосування бетону і залізобетону в різних галузях промисловості, сільському будівництві, гідротехніці, меліорації, машинобудуванні без розрахункової оцінки термінів безремонтної експлуатації конструктивних елементів і без аналізу затрат на ремонти і відновлення при експлуатації є причиною певного негативного відношення до унікального матеріалу, що може набувати будь-якої форми, а також властивостей, що задаються на стадіях проектування і виготовлення.

А довговічність – це структура бетону, яку можна охарактеризувати критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень – основною характеристикою лінійної механіки руйнування. Розрахунок конструкцій за довговічністю і її нормування – вимога часу. Задана довговічність повинна стати єдиною вимогою замовника до якості як залізобетонного виробу, так і всієї споруди в цілому.

Загальний випадок полів деформацій і напружень у вершині тріщини можна отримати шляхом накладання трьох основних типів деформацій. Перший тип пов'язаний із відривом (коли поверхні тріщини розходяться одна від одної у протилежних напрямках). Другий відповідає поперечному зсуву (при якому поверхні тріщини ковзають одна по одній). Третій тип пов'язаний із антиплоскою деформацією – поперечним зсувом.

При прикладанні зовнішнього навантаження на краях різних дефектів виникає концентрація напружень, яка є причиною складного напруженого стану у матеріалі.

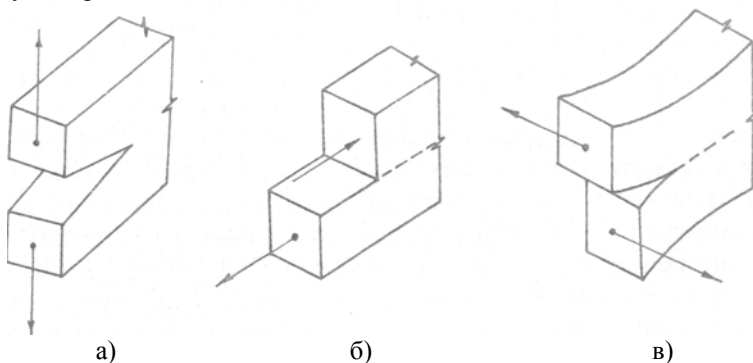


Рис. 1. Три основних типи деформацій у вершині тріщини: а - нормальний відрив; б - поперечний зсув; в - поздовжній зсув

Напруження у вістрі тріщини збільшуються по-різному, залежно від форми тріщини тіла та характеристики зовнішнього навантаження. Тому

визначають не самі напруження, а величину $\hat{E} = \lim_{s \rightarrow 0} \sigma_y \sqrt{s}$, де s – відстань

від вершини тріщини до деякої точки, де діють напруження σ_y . Величина K – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), який є єдиним параметром, що визначає напружений стан кінцевої зони тріщин. Для трьох основних типів тріщин (рис. 1) коефіцієнти інтенсивності напружень позначають відповідно $\hat{E}_1, \hat{E}_{22}, \hat{E}_{222}$. Для задачі Гріфітса $\hat{E}_1 = \sigma \sqrt{\pi l}$, тобто зі збільшенням довжини тріщини інтенсивність напружень у кінцевій зоні зростає, тому ріст тріщини нестійкий.

У той момент, коли КІН досягає деякої критичної величини $K_C = const$, відбувається локальне руйнування матеріалу. Тобто рівність $K = K_C$ ($\hat{E}_1 = \hat{E}_{1C}$) є силовим критерієм локального руйнування, а величину K_C називають критичним КІН або в'язкістю руйнування.

Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень характеризує напружений стан кінцевої зони тріщини у момент її зсуву або, іншими словами, опір матеріалу руйнуванню. Величина K_C вважається сталою матеріалу (на відміну від міцності) та основною характеристикою тріщиноустійкості.

За допомогою існуючих методів отримання експериментальних даних для визначення величини критичного КІН були виведені такі емпіричні формули:

$$K_{1C} = -0.015 + 0.01R_a + 0.133C/W + 0.006R_C - 0.080W_1 - 0.583K_{la}$$

$$K_{2C} = -0.250 + 0.015R_a + 1.445C/W + 0.070R_C - 0.126W_1 - 7.508K_{la}$$

тут R_a – міцність заповнювача;

C/W – цементно-водне відношення;

R_C – активність цементу;

W_1 – вологість бетону;

K_{la} – кількість крупного заповнювача на од. об'єму бетону.

Найменша зміна складу бетону веде до зміни значення K_C . На основі багаточисельних експериментальних даних можна схематизувати вплив різних технологічних факторів на величину K_C таким чином:

- K_C збільшується зі зменшенням міцності заповнювача, цементно-водного співвідношення, активності цементу, віку бетону, максимальної крупності важкого заповнювача;
- K_C зменшується зі збільшенням вологості бетону, крупності легкого заповнювача.

Величини K_{IC} , K_{IIC} пов'язані з міцністю бетону і максимальним діаметром крупного заповнювача d_{max} :

$$K_{IC} = mR_{bt}$$

$$K_{IIC} = mR_b$$

де m - коефіцієнт, що залежить від d_{max} (за табл. 1).

Таблиця 1

d_{max} , мм	m
20	0,12
30	0,15
40	0,17
60	0,19
80	0,20

Було проведено дослід із руйнування залізобетонної балки. При цьому виокремили кілька стадій напружено-деформованого стану (рис. 2).

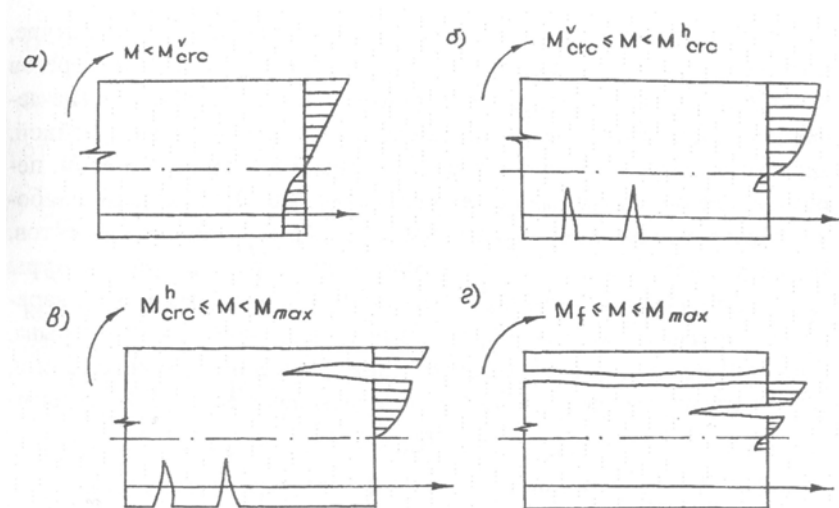


Рис. 2. Стадії напружено деформованого стану елемента, що працює на згинання: а) I стадія; б) II стадія; в) III стадія; г) IV стадія

Стадія I має місце до утворення відривних тріщин у розтягнутій частині перерізу.

Ця стадія покладена в основу розрухунку на виникнення відривних тріщин. Параметри стадії I:

$$\begin{aligned}\sigma_{bt} &< R_{bt} ; \\ M &= (0, 1-0, 2) M_{max} < M_{cre}^v ; \\ \ell_{cre}^v &= 0 ; \quad a_{cre}^v = 0 ; \\ \ell_{cre}^h &= 0 ; \quad a_{cre}^h = 0 ; \\ f &= 1/300 L .\end{aligned}$$

Стадія II настає із виникненням у бетоні розтягнутої зони перерізу відривних тріщин. Має місце до виникнення тріщин поперечного зсуву, тобто відривні тріщини вже є, а зсувних іще немає. Параметри стадії II:

$$\begin{aligned}\sigma_s &< R_s ; \quad \sigma_b < R_b \\ K_I^r &> K_{IC} ; \quad K_{II}^r < K_{IIc}\end{aligned}$$

$K_I^r < K_{IC}^{st}$; K_{IC}^{st} - критичний КІН арматурної сталі, у якій тріщин немає, як тільки вони з'являться – балка миттєво зруйнується;

$M_{cre}^v < M < M_{cre}^h$ (M_{cre}^h - момент утворення тріщин поперечного зсуву у стиснутій зоні перерізу);

$$\begin{aligned}\ell_{cre}^v &= (0, 8...0, 9) \ell_{cre}^{v,max} ; \\ a_{cre}^v &= (0, 1...0, 2) a_{cre}^{v,max} ; \\ f &= 1/200 L .\end{aligned}$$

Важливо, що відривні тріщини ростуть у довжину набагато швидше, ніж збільшується їхнє розкриття. Стадія II - основа розрахунку на утворення зсувних тріщин.

Стадія III починається із утворення тріщин зсуву у стиснутій зоні перерізу і закінчується моментом сприйняття прерізом максимального моменту від зовнішнього навантаження. Параметри стадії III:

$$\begin{aligned}\sigma_s &< R_s ; \quad \sigma_b < R_b \\ K_I^r &> K_{IC} ; \quad K_{II}^r < K_{IIc} ; \quad K_I^r < K_{IC}^{st} \\ M_{cre}^h &< M < M_{max} ; \\ \ell_{cre}^v &= \ell_{cre}^{v,max} ; \\ a_{cre}^v &= (0, 4...0, 5) a_{cre}^{v,max} ; \\ \ell_{cre}^h &= (0, 1...0, 2) \ell_{cre}^{h,max} ;\end{aligned}$$

$$a_{crc}^h = (0, 1 \dots 0, 3) a_{crc}^{h,max} ;$$

$$f = 1/200 L .$$

За стадією III розраховується максимальна несуча здатність перерізу.

Стадія IV характеризується довготривалим періодом руйнування залізобетонного елемента. Параметри стадії IV :

$$\sigma_s < R_s ;$$

$$M_f < M < M_{max} ;$$

$$\ell_{crc}^v = \ell_{crc}^{v,max} ; \quad a_{crc}^v = a_{crc}^{v,max}$$

$$\ell_{crc}^h = \ell_{crc}^{h,max} ; \quad a_{crc}^h = a_{crc}^{h,max}$$

На граничній стадії деформування у згинальному елементі розвиваються тріщини нормального відриву у розтягнутій частині перерізу; тріщини зсуву, паралельні повздовжній осі елемента у стиснутій частині перерізу; тріщини, нахилені до повздовжньої осі.

Прогнозування руйнування має на меті вирішити дві задачі:

1. Оцінити на стадії проектування конструкції час її служби за довговічністю використовуваних матеріалів при заданих умовах експлуатації або підібрати матеріали з визначеними якостями і конструктивні рішення елементів за умови заданого часу експлуатації споруд.
2. Встановити момент руйнування існуючої конструкції.

Адекватний прогноз довговічності конструкцій пов'язаний із кількісним аналізом процесу руйнування, коли враховується вплив технологічних, конструктивних і експлуатаційних факторів на кінетику розвитку мікро- і макротріщин або пошкоджень у структурі бетону.

Основні принципи та положення, що визначають довговічність і механізми руйнування бетону:

- усі порожнини в структурі бетону можуть розглядатися як тріщиноподібні дефекти;
- час є головною причиною руйнування, міцність конструкції повинна бути інтерпретована як величина, що обмежена часом її безпечної експлуатації;
- напружено-деформований стан конструкцій залежить від пошкоджень у структурних елементах бетону;
- ріст міцності бетону з часом практично не впливає на довговічність конструкцій;

- при довговічності матеріалів і конструкцій на стадії росту тріщин використовують поняття сумарної швидкості.

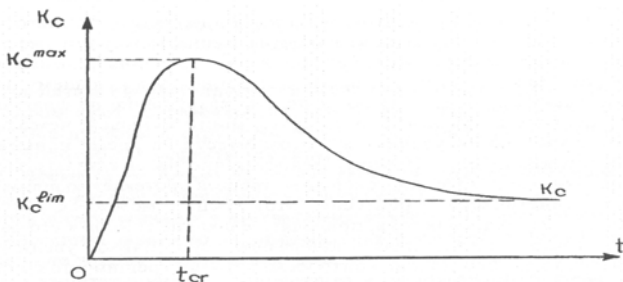


Рис. 3. Зміна тріщиностійкості бетону з часом

Довговічність необхідно розглядати як третій граничний стан, який визначається часовим відрізком, у межах якого в бетоні внаслідок теплових і корозійних процесів, а також механічних напружень сумарна характеристика структурних дефектів досягає критичної величини.

Довговічність бетону при зовнішніх впливах формується як стан експлуатаційної придатності, що характеризується якістьми тріщинуватості, в'язкості руйнування структури та оцінюється показниками критичної тріщиностійкості $K_{I(II)C}$.

Висновки/ Щоб створити надійну та довговічну споруду, треба знати, як вона буде руйнуватися і завчасно прийняти певні заходи. Щоб створити якісний матеріал, необхідно визначити, де будуть утворюватись дефекти у його структурі. Знаючи причини і характер руйнування бетону та залізобетону, можна створювати міцні та довговічні конструкції. Таким чином, проблема руйнування повинна стати центральною при вивченні опору залізобетону.

Основною характеристикою при розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій у наш час має стати параметр їх тріщиностійкості - інваріантна константа - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень. Тобто, на зміну міцності, основній нормованій характеристиці бетону, прийде енергія, що витрачається на руйнування його структури.

К.А.Пирадов, К.А.Бисенов, К.У.Абдуллаев. Механика разрушения бетона и железобетона. – Алматы: Изд.центр ВАК РК МОН РК. - 2000.