

Деформаційна модель руйнування бетону

В. В. Панасюк, Й. Й. Лучко, І. М. Панько

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

Запропоновано деформаційну модель руйнування бетону, згідно з якою напружений стан у зоні передруйнування еквівалентний другій і третій ділянкам повної діаграми розтягу (пластичного деформування і розпушення). У рамках моделі характеристиками матеріалу прийнято: критичне розкриття вістря тріщини, розкриття модельної тріщини на границі ділянок пластичного деформування та розпушення в зоні передруйнування, напруження зчеплення в модельній тріщині, довжини ділянок розпушення і пластичного деформування.

Ключові слова: деформаційна модель, тріщина, пластичне деформування, розпушення, деформаційний критерій, квазікрихке тіло, високоміцні бетони, критеріальні рівняння.

Застосування механіки руйнування неможливе без надійних критеріїв росту тріщини. Цьому питанню приділяється велика увага, проводяться дослідження з вивчення різних ефектів, які впливають на величину таких критеріїв. Однак ця робота ще не завершена, оскільки у більшості країн відсутні стандарти на визначення критеріїв лінійної і нелінійної механіки руйнування бетонів. Існуючі теоретичні розв'язки, за якими можна оцінити розподіл напружень попереду тріщини, дуже складні і громіздкі. В інженерній практиці їх використання пов'язане зі значними труднощами. Тому слід шукати відносно прості, навіть наближені або модельні розв'язки, які дозволили б побудувати поле напружень попереду тріщини.

На даний час серед деформаційних моделей найбільшого поширення набула модель тріщини Леонова–Панасюка [1], яка відома в літературних джерелах як δ_k -модель. Приймається, що напруження в зоні попереду тріщини постійні і в рамках моделі реальна тріщина збільшується на цю зону, де до берегів модельної тріщини прикладені напруження зчеплення σ_0 ($\sigma_{0,2} \leq \sigma_0 \leq \sigma_B$). Тут $\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості; σ_B – границя міцності матеріалу. Вважається, що коли розкриття реальної тріщини в її вістрі досягає певної величини δ_c , яка є постійною для даного матеріалу, то настає гранична рівновага, і тріщина починає поширюватися. Деяко по-іншому напруження зчеплення в зоні передруйнування виглядають в моделі Петерсона–Хіллерборга [2]. Відомі також моделі інших авторів [3], однак вони не повністю пояснюють непружну поведінку бетону біля вістря тріщини, тому виникає потреба у розробці нових та вдосконаленні існуючих підходів для вирішення цієї проблеми.

Раніше [4] запропоновано пружно-пластичну модель тіла з тріщиною, де дія напружень зчеплення в зоні передруйнування трактується на основі повної діаграми розтягу матеріалу [5]. Ця модель була апробована на металах і дала добрі результати. Розглянемо її стосовно бетонів.

Як відомо, бетон складається із щебеню, піску і цементного каміння, які за своїми властивостями близькі до ідеально крихких матеріалів, але їх

конгломерат має явно виражені непружні властивості. Це явище зумовлене двома причинами. Перша – наявність у цементному камені гелевої складової, якій властива певна в'язкість, через що у бетоні з'являються пластичні деформації. Друга – виникнення і ріст мікро- і макротріщин.

У зв'язку з наявністю різних рівнів структури матеріалу тріщини розрізняють за розмірами і причинами їх виникнення. Так, за класифікацією, наведеною в роботі [6], виділяють: субмікротріщини, які співмірні структурним кристалом; мікротріщини, що мають розміри найменшого конгломерату; макротріщини, що подібні за розмірами до крупних заповнювачів; магістральні тріщини, які мають порядок перерізу елемента.

В оцінці технічної міцності бетонів та їх деформування суттєву роль відіграють мікро- і макротріщини, а в оцінці міцності та деформації бетонних і залізобетонних елементів – макротріщини і магістральні тріщини. У роботі [7] встановлено, що макротріщини в бетоні при стиску з'являються, коли навантаження дорівнюють 0,3...0,4 від руйнівних. Згодом це було підтверджено і для бетону, який працює на розтяг. Причина виникнення мікротріщин полягає у впливі концентрації напружень, яка має місце на межі елементів структури бетону. Чим крупнішою є структура, тим більша концентрація.

Повна діаграма розтягу бетону (ПДРБ) має вигляд [3], зображений на рис. 1, тобто складається, як і у випадку металів [4], із трьох ділянок: пружної (*I*), пластичної (*II*), розпушення (*III*). Загалом друга і третя ділянки мають нелінійний характер, їх з достатньою для практики точністю можна апроксимувати прямими лініями (рис. 1). Якщо порівняти ПДРБ з відповідною діаграмою розтягу металу, то вона має декілька відмінностей:

- а) для бетонів друга ділянка діаграми набагато коротша, ніж для металів, а третя, навпаки, довша і її розмір залежить від матеріалу заповнювача;
- б) нелінійний характер поведінки металів зумовлюється їх пластичністю, тобто другою ділянкою діаграми розтягу, а бетонів – третьою ділянкою, де виникають мікротріщини.

Згідно з фізичною теорією руйнування матеріалу [8], процес утворення пластичної деформації та руйнування поділяється на три основні стадії і відбувається шляхом переміщення окремих дислокацій та їх невеликих груп. У результаті дослідження повних діаграм розтягу, які вдалося побудувати на жорстких машинах зі зворотнім зв'язком [5], встановлено, що мікротріщини виникають вже на другій ділянці – ділянці пластичного деформування. При подальшому деформуванні зразків ці мікротріщини підростають, і при досягненні кінцевої точки діаграми тріщина займає весь поперечний переріз. На всіх поверхнях мікротріщин частина компонент тензора напружень перетворюється в нуль, а через хаотичність орієнтації вільних поверхонь в нуль перетворюються різні компоненти напружень. При цьому в проміжках мікротріщин значення компонент тензора напружень понижуються і їх мінімум знаходиться у вістрі тріщини. Якщо розглянути тіло з тріщиною під дією розтягуючих зусиль, то біля її вістря виникає зона передруйнування, яка схематично показана на рис. 2,а.

Розглянемо в зоні передруйнування елементарний об'єм довжиною d і висотою h (на рис. 2,а заштрихований). При розтязі тіла ешора відносних

видовжень елемента буде мати вигляд, зображений на рис. 2,б, а епюра напружень при граничній рівновазі – вигляд, зображений на рис. 2,в. Якщо порівняти епюру напружень в зоні передруйнування з повною діаграмою розтягу (рис. 1), то можна бачити між ними багато спільного, а саме: в зону передруйнування потрапляють дві ділянки ПДРБ: пластична – II і розпушення – III, причому біля вістря тріщини знаходиться заключна ділянка ПДРБ. Замінімо зону передруйнування додатковою тріщиною-розрізом (рис. 2,г) і прикладемо до берегів розрізу напруження згідно з епюрою на рис. 2,в. У загальному випадку епюра має вигляд кривої, яку досить важко описати аналітично. Замінімо її прямолінійною ломаною таким чином, що площі, обмежені цими епюрами, будуть рівні, тобто будуть рівні енергії руйнування. Це значно спростить аналітичне моделювання і буде з достатньою точністю відповідати реальному напруженому стану. У цьому випадку розкриття додаткової тріщини-розрізу буде еквівалентне відносним видовженням ε елементарного об'єму (рис. 2,б). Отже, деформація розтягу в околі вістря тріщини пропорційна розкриттю $\delta(x, p)$:

$$\varepsilon(x, p) = \delta(x, p)/h. \quad (1)$$

Параметр h визначаємо з умови рівності деформацій матеріалу під час руйнування. Нехай ε_c деформація зразка, за якої наступило руйнування. Тоді, згідно зі схемами на рис. 1, 2, маємо таку рівність:

$$\varepsilon_c(d_c, p^*) = \delta(d_c, p^*)/h, \quad (2)$$

де $h\varepsilon_c = \delta_c$ – критичне розкриття модельного розрізу (рис. 3) в точці $x = d_c$.

Величини ε_c і δ_c можна визначити експериментально. Тоді значення параметра h знаходимо з рівності $h = \delta_c/\varepsilon_c$.

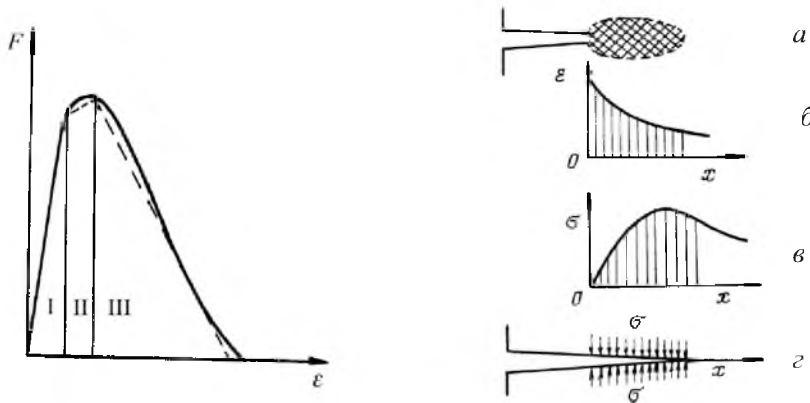


Рис. 1. Повна діаграма розтягу бетону.

Рис. 2. Кінцева зона тріщини та її моделювання.

Напружено-деформований стан квазікрихкого тіла з тріщиною, визначений згідно з прийнятою епюрою напружень (рис. 2,а,б), можна описати математично:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon E, & \varepsilon \leq \varepsilon_{0,2}; \\ \sigma_{0,2} + A\varepsilon^n, & \varepsilon_{0,2} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_c; \\ \sigma_c (\varepsilon_{cl} - \varepsilon) / (\varepsilon_{cl} - \varepsilon_c), & \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cl}, \end{cases} \quad (3)$$

на берегах модельного розрізу (рис. 3) мають задовольнятися ще такі рівняння:

$$2V(0, p_*) = \delta(0, p_*) = \delta_{cl}; \quad (4)$$

$$\sigma_y(d, p_*) = \sigma_0. \quad (5)$$

Рівняння (4) визначає відстань між берегами модельного розрізу, коли взаємодія між ними зникає і з'являється повністю вільна поверхня тіла (відбулося локальне руйнування), а рівняння (5) забезпечує неперервність напружень у кінці зони передруйнування ($x = d$), тобто в кінці модельного розрізу. У результаті співвідношення (2), (4), (5) є рівняннями деформаційного критерію в рамках сформульованої моделі.

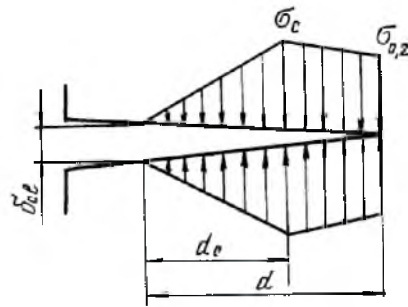


Рис. 3. Моделювання зони передруйнування.

У залежності від прийнятого моделювання епюри напружень у зоні передруйнування параметр σ_0 у співвідношенні (5) прийматиме наступні значення:

при лінійному зміцненні напруження в кінці зони передруйнування будуть дорівнювати $\sigma_{0,2}$. Із наближенням до границі ділянок пластичного деформування і розпушення вони зростають до рівня σ_c – границі технічної міцності бетону;

при пружно-пластичному моделюванні другої ділянки діаграми пластичного деформування отримаємо

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_c + \sigma_{0,2}}{2}. \quad (6)$$

При розтізті тіла з тріщиною зі зростанням прикладеного зусилля епюра напружень у зоні передруйнування буде змінюватися і поступово приймати вигляд, зображений на рис. 4.

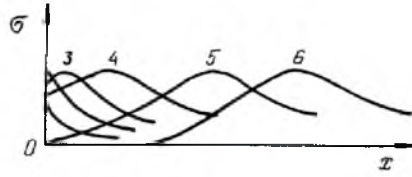


Рис. 4. Динаміка зміни епюри напружень у зоні передруйнування.

У випадку пружно-пластичного моделювання розглянемо задачу Гріффітса (рис. 5) – розтяг тонкої пластини нескінченних розмірів із центральною тріщиною довжиною $2l_0$. Необхідно визначити напруження і переміщення для даної силової схеми, коли прикладені зусилля p досягають граничного значення $p = p_*$, тобто встановлюється гранична рівновага.

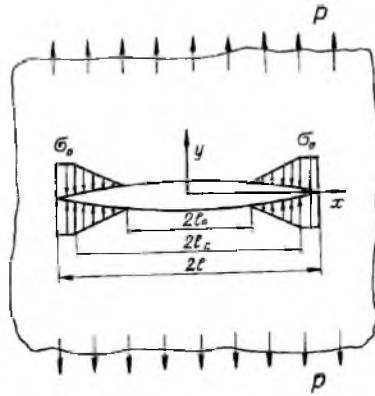


Рис. 5. Розтяг безмежної площини з тріщиною у випадку пружно-пластичного моделювання.

У залежності від матеріалу маємо:

для пружно-пластичного матеріалу без зміцнення $\sigma_0 = \sigma_{0,2}$;

для матеріалу з деформаційним зміцненням σ_0 визначаємо за формулою (6).

Граничні умови задачі в даному випадку наступні:

у нескінченно віддалених точках площини

$$\sigma_x(x, \infty) = 0, \quad \sigma_y(x, \infty) = p, \quad \tau_{xy}(x, \infty) = 0, \quad (7)$$

на поверхні тріщини

$$\tau_{xy}(x, 0) = 0; \quad \sigma_y(x, 0) = \begin{cases} 0, & |x| \leq l_0; \\ (|x| - l_0) \frac{\sigma_0}{l_c - l_0}, & l_0 < |x| \leq l_c; \\ \sigma_0, & l_c < |x| \leq l. \end{cases} \quad (8)$$

Якщо від напруженого стану в пружній площині з розрізом $2l$ при граничних умовах (7), (8) відняти однорідний напружений стан $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$ і $\sigma(x, y) = p$, то отримаємо деякий допоміжний напружений стан, що зникає

на нескінченності, а на поверхні розрізу визначається такими граничними умовами:

$$\tau_{xy}(x,0) = 0; \quad q(x) = \begin{cases} p, & |x| \leq l_0; \\ p - (|x| - l_0) \frac{\sigma_0}{l_c - l_0}, & l_0 < |x| \leq l_c; \\ p - \sigma_0, & l_c < |x| \leq l, \end{cases} \quad (9)$$

де $q(x) = -\sigma_y(x,0)$ – нормальний тиск на поверхнях розрізу для допоміжної задачі.

Однорідний напружений стан не залежить від розмірів тріщини, тому при дослідженні розвитку тріщини важливим є лише допоміжний напружений стан.

Для визначення вертикальних зміщень $V(x,0)$ при $|x| \leq l$ використовуємо формулу [1]

$$V(x,0) = -C \int_{-l}^l q(\xi) \Gamma(l,x,\xi) d\xi. \quad (10)$$

Тут

$$\Gamma(l,x,\xi) = \ln \frac{l^2 - x\xi - \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}}{l^2 - x\xi + \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}};$$

C – постійна, для узагальненого плоского напруженого стану $C = 1/\pi E$, для плоскої деформації $C = (1 - \mu^2)/\pi E$, де μ – коефіцієнт Пуассона.

Напруження $\sigma_y(x,0)$ при $|x| \geq l$ визначаємо за формулою [1]

$$\sigma_y = \frac{1}{\pi \sqrt{x^2 - l^2}} \int_{-l}^l \frac{q(\xi) \sqrt{l^2 - \xi^2}}{x - \xi} d\xi. \quad (11)$$

Використовуючи граничні умови (9) і підставляючи в підінтегральні вирази (10), (11) значення функції $q_n(\xi)$, обчислимо ці інтеграли. Здійснивши певні спрощення і перетворення для переміщень берегів модельної тріщини $V(x,0)$ та напружень $\sigma_y(x,0)$ за межами зони передруйнування, отримаємо співвідношення, після підстановки яких в критеріальні рівняння (2), (4), (5) запишемо систему рівнянь для визначення граничної рівноваги площини з тріщиною в даному випадку:

$$\delta_{cl} = \frac{2C\sigma_0}{l_c - l_0} \left[2\sqrt{l^2 - l_0^2} (\sqrt{l^2 - l_0^2} - \sqrt{l^2 - l_c^2}) + 4l_0^2 \ln \frac{l_0}{l} - \right. \\ \left. - 0,5(l_c + l_0)^2 \Gamma(l, l_0, -l_c) - 0,5(l_c - l_0)^2 \Gamma(l, l_0, l_c) \right]; \quad (12a)$$

$$\delta_c = \frac{2C\sigma_0}{l_c - l_0} \left[2\sqrt{l^2 - l_c^2} (\sqrt{l^2 - l_0^2} - \sqrt{l^2 - l_c^2}) - 4l_c^2 \ln \frac{l_c}{l} + \beta + 0,5(l_0 + l_c)^2 \Gamma(l, l_c, -l_0) + 0,5(l_c - l_0)^2 \Gamma(l, l_c, l_0) \right]; \quad (12б)$$

$$\frac{\pi p_*}{2\sigma_0} = \frac{1}{l_c - l_0} \left[\sqrt{l^2 - l_0^2} - \sqrt{l^2 - l_c^2} - l_0 \left(\arcsin \frac{l_c}{l} - \arcsin \frac{l_0}{l} \right) \right] + \arccos \frac{l_0}{l}. \quad (12в)$$

Із введенням безрозмірних позначень $\alpha = l_0/l_c$, $\beta = l_c/l$ рівняння (12а) і (12в) будуть мати вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{cl}}{2C\sigma_0 l_0} &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \left[2\sqrt{\frac{1}{\alpha^2 \beta^2} - 1} \left(\sqrt{\frac{1}{\alpha^2 \beta^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{1}{\alpha^2}} \right) + \right. \\ &\quad \left. + 4\ln(\alpha\beta) - 0,5\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right)^2 \Gamma(l, l_0, -l_c) - 0,5\left(\frac{1}{\alpha} - 1\right)^2 \Gamma(l, l_0, l_c) \right]; \\ \frac{\pi p_*}{2\sigma_0} &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \left(\sqrt{\frac{1}{\alpha^2 \beta^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\alpha^2 \beta^2} - \frac{1}{\alpha^2}} - \arcsin \beta + \arcsin(\alpha\beta) \right) + \\ &\quad + \arccos \beta. \end{aligned} \quad (13)$$

Вони зображені відповідно на рис. 6 і 7 при зміні α і β в проміжку $0 < \alpha, \beta \leq 1$, тобто для довільних тріщин та зон переддруйнування. На цих рисунках випадок δ_c -моделі відповідає точкам перетину кривих із лінією $\alpha = 1$, випадок абсолютно крихкого тіла – кривим $\beta = 1$.

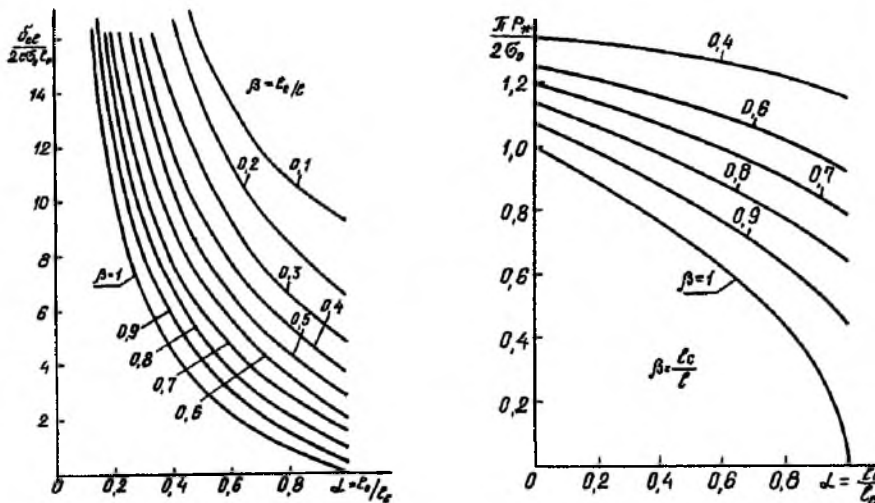


Рис. 6. Графічні залежності безрозмірного розкриття вершини тріщини від параметрів α і β .
Рис. 7. Графічні залежності безрозмірного граничного навантаження від параметрів α і β .

Бетони і залізобетони належать до класу квазікрихких тіл, тому для визначення їх тріщиностійкості достатньо мати критеріальні рівняння при малих зонах передруйнування, які були б зручними в користуванні і простішими за (12). Оскільки безпосередньо з цих рівнянь їх отримати важко, розглянемо граничні випадки рівнянь (12). При $\beta=1$ і довільному α ці рівняння мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\pi p^*}{2\sigma_c} &= \frac{\alpha}{1-\alpha} \left(\sqrt{\frac{1}{\alpha^2}} - 1 - \arccos \alpha \right); \\ \frac{\delta_{cl}}{2C\sigma_c l_0} &= \frac{2\alpha}{1-\alpha} \left(\frac{1}{\alpha^2} - 1 + 2 \ln \alpha \right) \quad (\alpha = l_0/l_c). \end{aligned} \quad (14)$$

Вони описують гранично-рівноважний стан нескінченної площини крихкого матеріалу з тріщиною. У цьому випадку ПДРБ складається лише з першої та третьої ділянок. При α , близькому до одиниці, після розкладу правих частин рівнянь (14) в ряди по α_c , де $\alpha_c = d_c/l_0$, отримаємо

$$\begin{aligned} \delta_{(0)k} &= \delta_{cl}/(2C\sigma_0 l_0) = 4\alpha_c; \\ p_{(0)k} &= \pi p^*/(2\sigma_0) = \sqrt{\alpha_c}, \end{aligned} \quad (15)$$

де $d_c = l_c - l_0$.

Рівняння (15) шляхом виключення α_c зводяться до одного:

$$\delta_{cl} = 2C\pi^2 l_0 p^2 / \sigma_0. \quad (16)$$

При $\alpha=1$ (тобто нехтується зона розпушення матеріалу) і довільному значенні β рівняння критерію (12) для задачі Гріффітса наберуть вигляду

$$\delta_{cl} = \delta_c = -8l_0 C\sigma_0 \ln \frac{l_0}{l}; \quad p^* = \frac{2}{\pi} \sigma_0 \arccos \frac{l_0}{l} \quad (17)$$

або в безрозмірній формі –

$$\frac{\delta_{cl}}{2C\sigma_0 l_0} = -4 \ln \beta; \quad \frac{\pi p^*}{2\sigma_0} = \arccos \beta \quad (18)$$

і співпадуть з критеріальними рівняннями δ_c -моделі [1]. У цьому випадку рівняння (12а) і (12б) зливаються в одне. При β , близьких до одиниці, після розкладу правих частин рівнянь (18) в ряд за параметром β_{nc} ($\beta_{nc} = d_{nc}/l_0$; $d_{nc} = l - l_c$) отримаємо співвідношення

$$\delta_{(0)\Pi} = \frac{\delta_{cl}}{2C\sigma_0 l_0} = 4\beta_{nc}; \quad p_{(0)\Pi} = \frac{\pi p^*}{2\sigma_0} = \sqrt{2\beta_{nc}}, \quad (19)$$

які легко зводяться до одного

$$\delta_{cl}^{(\Pi)} = C\pi^2 l_0 p_*^2 / \sigma_0. \quad (20)$$

Рівняння (16) і (20) відрізняються на коефіцієнт, який дорівнює 2. Ця відмінність зумовлена різним моделюванням зони передруйнування для крихкого та пружно-пластичного тіл. У той же час, зважаючи на умови рівності площ під цими епюрами, отримуємо, що максимальне напруження зчеплення σ_0 в першому випадку (крихке тіло) вдвічі більше за відповідне σ_0 у випадку пружно-пластичного моделювання (δ_c -модель).

Для квазікрихких тіл із тріщинами, де зона передруйнування складається з ділянок розпушення (d_c) і пластичного деформування матеріалу (d_{nc}), запишемо інтерполяційні формули:

$$\begin{aligned} \delta_{(0)} &= [(\delta_{(0)k})^{n/2} + (\delta_{(0)\Pi})^{n/2}]^{2/n}; \\ P_{(0)} &= [(P_{(0)k})^n + (P_{(0)\Pi})^n]^{1/n}, \end{aligned} \quad (21)$$

де n – показник інтерполяції. Інтерполяційні формули (21) вибираються так, щоб проміжні та граничні значення за формулами (21) і (12) давали найкращий збіг результатів при малих α_c і β_{nc} . Як показали обчислення, це спостерігається при $n = 2$. Підставляючи в інтерполяційні співвідношення (21) замість $\delta_{(0)k}$, $\delta_{(0)\Pi}$, $P_{(0)k}$, $P_{(0)\Pi}$ їх значення з формул (15), (19), отримуємо

$$\frac{\pi p_*}{2\sigma_0} = \sqrt{\alpha_c + 2\beta_{nc}}; \quad \frac{\delta_{cl}}{2C\sigma_0 l_0} = 4(\alpha_c + \beta_{nc}). \quad (22)$$

Враховуючи, що тріщиностійкість K_{Ic} для площини з тріщиною визначається з формули

$$K_{Ic} = p_* \sqrt{\pi l_0}, \quad (23)$$

співвідношення (22) після певних перетворень запишемо так:

$$K_{Ic} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma_0 \sqrt{d_c + 2d_{nc}}; \quad \delta_{cl} = 8C\sigma_0 (d_c + d_{nc}). \quad (24)$$

Система рівнянь (24) представляє собою критеріальні рівняння граничної рівноваги квазікрихких тіл із тріщинами в рамках тристадійної моделі, які залежать лише від параметрів ПДРБ. Якщо в перше інтерполяційне співвідношення (21) підставити граничні значення розкриття вістря тріщини (16), (20), то з урахуванням залежності (23) отримуємо наступну формулу:

$$\delta_{cl} = 3\pi C K_{Ic}^2 / \sigma_0. \quad (25)$$

Ця формула відрізняється від відповідного співвідношення в рамках δ_c -моделі [1] на множник три, що виходить за рахунок іншого моделювання зони передруйнування. Напруження σ_0 в співвідношенні (24) визначають із формули (6).

Застосуємо її для визначення деформаційної тріщиностійкості високоміцних бетонів. Для цього скористаємося експериментальними результатами роботи [3]. Останні разом із значеннями критичного розкриття δ_{cl} , обчисленими за формулою (25), наведено в таблиці. Як бачимо з порівняння теоретичного і експериментального δ_{cl} , між ними спостерігається добра кореляція, що підтверджує достовірність використання залежності (25) для визначення деформаційної тріщиностійкості бетонів. Окрім того, (25) можна застосовувати для оптимізації структури бетону таким чином, щоб параметри E і σ_0 відповідали максимальним K_{Ic} і δ_{cl} .

Експериментальні [3] та розрахункові значення δ_{cl}

$R_{bt,r}$, МПа	$E_b \cdot 10^4$, МПа	μ	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	δ_{cl} , 10^{-6} м
4,65	3,04	0,2	0,900	$\frac{15,80}{16,50}$
2,00	2,33	0,2	0,545	$\frac{18,10}{18,34}$
2,02	2,31	0,2	0,684	$\frac{22,00}{29,00}$
1,50	2,14	0,2	0,531	$\frac{26,80}{26,40}$
3,90	2,80	0,2	1,440	$\frac{50,00}{54,60}$
3,83	2,80	0,2	1,220	$\frac{56,00}{54,00}$
3,96	2,80	0,2	1,425	$\frac{54,00}{52,70}$

Примітка. Над рискою наведено експериментальні дані [3], під рискою – розрахункові за формулою (25).

Резюме

Предложена деформационная модель разрушения бетона, согласно которой напряженное состояние в зоне предразрушения эквивалентно второму и третьему участкам полной диаграммы растяжения (пластического деформирования и разрыхления). В рамках модели характеристиками материала приняты: критическое раскрытие вершины трещины, раскрытие модельной трещины на границе участков пластического деформирования и разрыхления в зоне предразрушения, напряжения сцепления в модельной трещине, длины участков разрыхления и пластического деформирования.

1. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1968. – 247 с.

2. Hillerborg A., Moder M., and Petersson P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cem. Concr. Res. – 1976. – 6. – P. 773 – 781.
3. Лучко Й. Й., Чубріков В. М., Лазар В. Ф. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування. – Львів: Каменяр, 1999. – 348 с.
4. Панько І. М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: Видав. центр Львів. нац. ун-ту, 2000. – 280 с.
5. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Евецкий Ю. Л. Методика построения полных диаграмм деформирования листовых материалов // Пробл. прочности. – 1986. – № 9. – С. 29 – 32.
6. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
7. Берг О. Я. Физические основы прочности бетонов. – М.: Стройиздат, 1962. – 96 с.
8. Бетехтин В. И., Владимиров В. И., Кадомцев А. Г., Петров А. И. Пластическая деформация и разрушение кристаллических тел. Сообщ. 1. Деформация и развитие микротрещин // Пробл. прочности. – 1979. – № 7. – С. 38 – 45.

Поступила 25. 06. 2002