

ПРО КОРОТКОЧАСНУ ТА ДОВГОТРИВАЛУ МІЦНІСТЬ ВІДНОВЛЕНИХ ЗА ІН'ЄКЦІЙНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬНИХ СПОРУД

В. П. Силованюк, А. В. Ревенко, А.Є. Ліснічук

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

Abstract. The calculation model and analysis of long-term strength of bodies with cracks healed by injection technology have developed. Dependencies between short- and long-term strength of renewed massive bodies with elliptical cracks have obtained in a simple engineering representation. These scientific data allow us to select the best in terms of long-term strength injection materials.

Технології ін'єктування дефектних зон у спорудах тривалої експлуатації, як метод відновлення їх несучої здатності, широко використовують у практиці [1, 2]. Для оптимізації технологій ін'єктування та прогнозування ресурсу відновлених споруд необхідні розрахункові моделі і методи оцінювання робоздатності відновлених елементів конструкцій. У наших роботах розроблені моделі, що дозволяють оцінити ефективність відновлення пошкодженого елемента конструкцій як з точки зору короточасної міцності, так і довготривалої.

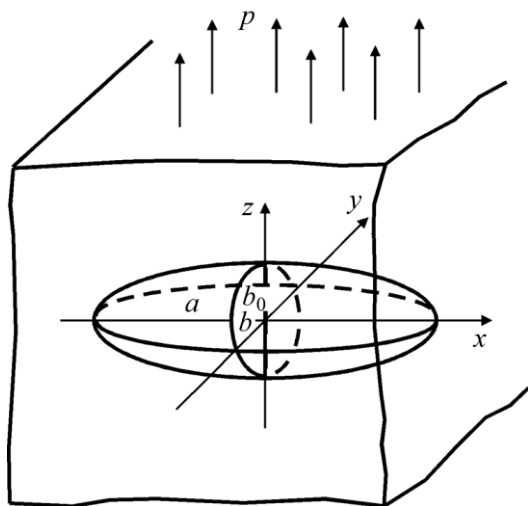


Рис. 1. Схема розтягу нескінченного пружного тіла з еліптичною тріщиною.

Для ілюстрації наведемо дані про відновлення міцності на розтяг масивного елемента конструкції, що містить внутрішню тонку еліптичну в плані тріщину (рис. 1).

Як відомо [3], співвідношення для обчислення руйнівного навантаження для масивного тіла з внутрішньою еліптичною тріщиною має вигляд

$$p_c = \frac{K_{IC} E(k)}{\sqrt{\pi b}}$$

Тут K_{IC} – характеристика тріщиностійкості матеріалу; $E(k)$ – повний еліптичний інтеграл другого роду; $b < a$ – півосі еліпса $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

За технологією ін'єктування тріщину заповнюємо ін'єкційним матеріалом у всьому об'ємі. Згідно з критерієм Ірвіна та працею [3] руйнівне навантаження тіла із заповненою тріщиною можна обчислити за формулою

$$p_c^i = \frac{K_{IC} (2 \beta \omega (1 - \nu^2) + E(k))}{\sqrt{\pi b} (1 - \omega)}, \quad (2)$$

де $\beta = \frac{b}{c}$, $\omega = \frac{E_1}{E}$, E , E_1 – модулі пружності основного та ін'єкційного матеріалів відповідно.

Із отриманої залежності випливає, що необхідного зміцнення можна досягти або збільшенням параметра β , що відповідає ін'єктуванню в момент якомога меншого розкриття тріщини, або збільшенням параметра ω , що характеризує жорсткість наповнювача.

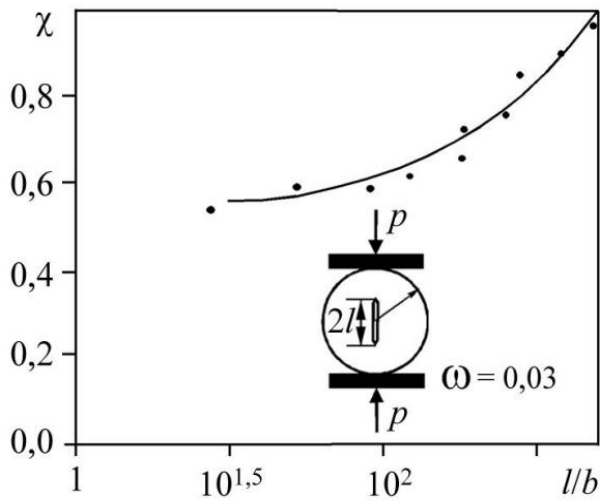


Рис. 2. Порівняння теоретичних та експериментальних даних: суцільна лінія – розрахунок за формулою (2); точки – експериментальні дані для бетонних зразків ($R = 50\text{мм}$, $l = 0,25\text{мм}$); σ_b – границя міцності бетону.

властивістю яких є повзучість. Повзучістю бетону у порівнянні з ін'єкційними матеріалами можна знехтувати.

Повзучість ін'єкційного матеріалу призводить до зменшення з часом міцності тіла. Для ін'єкційного матеріалу прийmemo закон спадкової в'язкопружності у вигляді інтегральної залежності Вольєрра [3]

$$\sigma_{zz}(x, y, t) = E_1 \left(\varepsilon_{zz}(x, y, t) + \int_0^t K(t - \tau) \varepsilon_{zz}(x, y, \tau) d\tau \right). \quad (3)$$

де $K(t - \tau)$ – ядро релаксації. Зв'язок напружень з деформаціями у вигляді залежності (3) часто приймають у реології полімерних матеріалів. Уявно виріжемо з тіла матеріал заповнювача, замінюючи його дію на поверхні утвореної порожнини напруженнями

$$\sigma_{zz}(x, y, t) = \frac{E_1}{h(x, y)} \left(u_z(x, y, t) + \int_0^t K(t - \tau) u_z(x, y, \tau) d\tau \right), \quad (4)$$

$$\sigma_{xz}(x, y, t) = \sigma_{yz}(x, y, t) = 0,$$

де $h(x, y) = c \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$, $u_z(x, y, t)$ – переміщення точок поверхні V в напрямку осі Oz .

Співвідношення (4) отримані на основі залежності (3) і припущень про малу товщину включення ($c \ll a, b$) і є узагальненням моделі типу Вінклера на в'язкопружні матеріали.

Зносячи граничні умови з поверхні порожнини на її серединну область $S: x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$, отримуємо крайову задачу для простору з розрізом S , на якому граничні умови задані співвідношенням (4). Оскільки інерційними членами в рівняннях руху тіла, що виникають внаслідок повзучості матеріалу включення, можна знехтувати, то розв'язок отриманої задачі для кожного моменту часу t можна отримати в межах статичної теорії пружності.

З граничних умов для напружень (4), одержимо інтегральне рівняння для визначення

переміщень $u_z^* = u_z - \frac{p_c}{E} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$ в області S :

На рис. 2 наведені дані розрахунку за формулою (2) та експерименту на бетонних зразках і поліуретану, як ін'єкційного матеріалу.

Результати наведені на (рис.2) показують, що розрахункові дані добре узгоджуються із експериментальними.

Таким чином, можна констатувати, що від ін'єктування поліуретану у тріщину в бетоні можна очікувати відновлення достатньо високої короточасної міцності пошкодженого матеріалу.

Що стосується довготривалої міцності відновленого елемента конструкції, то таку оцінку можна отримати в рамках моделі, що враховує повзучість матеріалів та пов'язану з нею релаксацію напружень. Слід зазначити, що ін'єкційними матеріалами є, як правило, високомолекулярні сполуки (поліуретани, акрили, епоксидні та поліефірні смоли тощо), характерною

$$\nabla_{xy}^2 \iint_s \frac{u_z^*(\xi, \eta, t) d\xi d\eta}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} = \frac{4\pi(1-\nu^2)}{E} \left\{ \frac{E_1}{h(x, y)} [u_z^*(x, y, t) + \int_0^t K(t-\tau) \cdot u_z^*(x, y, \tau) d\tau] + \frac{E_1 p}{E} \int_0^t K(t-\tau) d\tau + \frac{E_1 p}{E} - p \right\}. \quad (5)$$

Розв'язок рівняння (5) отримано у вигляді

$$u_z^*(x, y, t) = \frac{f(t)pb}{E} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}, \quad (6)$$

де $f(t)$ – невідома функція часу, що задовольняє рівняння.

$$\chi f(t) + \int_0^t K(t-\tau) f(\tau) d\tau + q(t) = 0, \quad (7)$$

$$\chi = \frac{E(k) + 2(1-\nu^2)\omega\beta}{2(1-\nu^2)\omega\beta}, \quad q(t) = \frac{1}{\beta} \int_0^t K(t-\tau) d\tau + \frac{(\omega-1)}{\omega\beta}.$$

Розв'язок інтегрального рівняння (7) для довільного ядра релаксації $K(t)$ знаходимо чисельно. Для деяких часткових випадків повзучості можна отримати аналітичний розв'язок рівняння Вольтерра, а відтак, і вихідної задачі.

Напруження, що виникають в ін'єкційному матеріалі, встановлюємо на основі залежності

$$\sigma_{zz}(x, y, t) = E_1 \left(\frac{p}{E} \left(1 + \frac{f(t)b}{c} \right) + \frac{p}{E} \int_0^t K(t-\tau) \left(1 + \frac{f(\tau)b}{c} \right) d\tau \right). \quad (8)$$

Отримавши розв'язок рівняння (7), коефіцієнт інтенсивності напружень на контурі заповненої еліптичної тріщини можна підрахувати за відомими переміщеннями берегів тріщини [3]. У результаті отримаємо:

$$K_1 = \frac{p\sqrt{\pi b} (a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi)^{1/4}}{2(1-\nu^2)\sqrt{a}} f(t), \quad (9)$$

де φ – параметричні координати точок на еліпсі $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$. На основі силового критерію Ірвіна ($K_I = K_{IC}$) та співвідношення (9) встановлюємо граничне навантаження для тіла з тонкою еліпсоїдальною порожниною, заповненою в'язкопружним матеріалом:

$$p_c^{creep} = \frac{2K_{IC}(1-\nu^2)}{\sqrt{\pi b} f(t)}. \quad (10)$$

Із отриманої залежності випливає, що міцність у часі тіла із заповненою в'язкопружним ін'єкційним матеріалом еліптичною тріщиною пов'язана з короткочасною міцністю залежністю

$$p_c^{creep} = p_c^i \frac{2(1-\nu^2)(1-\omega)}{(E(k) + 2\omega\beta(1-\nu^2)) f(t)}. \quad (11)$$

Із співвідношень (10), (11) випливає, що залежно від реологічних властивостей ін'єкційного матеріалу та часу довготривала міцність тіла із заповненою тріщиною може змінюватися від величини p_c^i (короткочасної міцності тіла із заповненою тріщиною) до p_c (міцність тіла з незаповненою тріщиною).

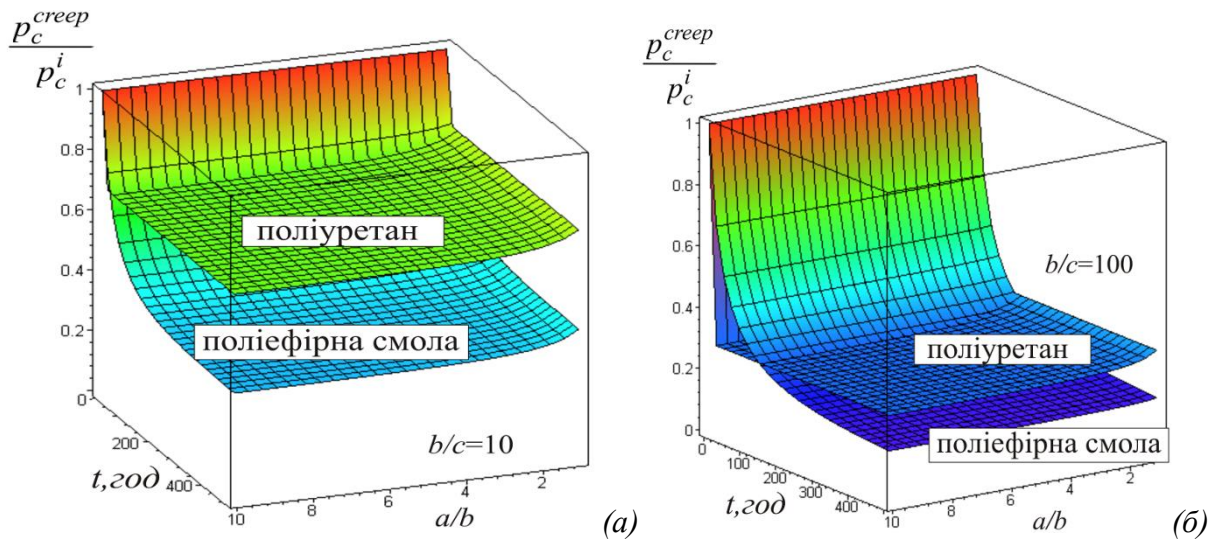


Рис. 3. Довготривала міцність тіл з тріщинами, заповненими поліуретаном або поліефірною смолою.

Для ефективного довготривалого відновлення міцності елемента конструкції з тріщиною ін'єкційні матеріали необхідно вибирати такими, щоб релаксація напружень в них проходила якомога повільніше і напруження в результаті не сягали низьких значень. За повної релаксації напружень у включенні (зменшенні їх до нуля) граничне навантаження для тіла з тріщиною, що заповнена таким матеріалом, не відрізнятиметься від граничного значення навантаження для незаповненої тріщини.

На рис. 3 а, б наведені графіки залежності нормованої довготривалої міцності тіла з тріщиною, яка заповненими ін'єкційними матеріалами різної реології, в залежності від часу і відношення півосей еліпсоїда a/b , b/c .

Як показують одержані графіки, із розглянутих ін'єкційних матеріалів кращими з точки зору забезпечення довготривалої міцності є поліуретан.

Література:

1. Czarnecki L. Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych / L. Czarnecki, P. H. Emmons. – Kraków: Polski Cement. – 2002. – 434 s.
2. Marukha V. I. Injection Technologies for Repair of Damaged Concrete Structures / V. I. Marukha, V. V. Panasyuk, and V. P. Sylovanyuk // Springer. – 2014. – 230 p.
3. Панасюк В. В. Концентрация напряжений в трехмерных телах с тонкими включениями / В. В. Панасюк, М. М. Стадник, В. П. Силованюк. – К.: Наук. думка. – 1986. – 216 с.
4. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука. – 1966. – 752 с.