

УДК 539.375

ЗМІЦНЕННЯ БЕТОНУ В РЕЗУЛЬТАТІ ЗАПОВНЕННЯ ПОР ТА ПОРОЖНИН

В. П. СИЛОВАНЮК, В. І. МАРУХА, Р. Я. ЮХИМ, Н. В. ОНИЩАК

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

Теоретично обґрунтовано технологію зміцнення бетону, що полягає у заповненні пор і порожнин рідкими матеріалами, здатними полімеризуватися або кристалізуватися через деякий період часу. Встановлені умови росту тріщини, що утворена на контурі кругового отвору в умовах стиску. Досліджено вплив жорсткості матеріалу наповнювача на ефективність зміцнення тіла з отвором та тріщинами.

Ключові слова: пори, тріщина, ін'єкційні технології, граничне навантаження, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Суттєву роль у виникненні тріщин у структурі бетону відіграють отвори і пори, що є в матеріалі. Навіть за умов стиску в їх околі виникає концентрація напружень розтягу, що призводить до зародження і поширення у тілі тріщин [1].

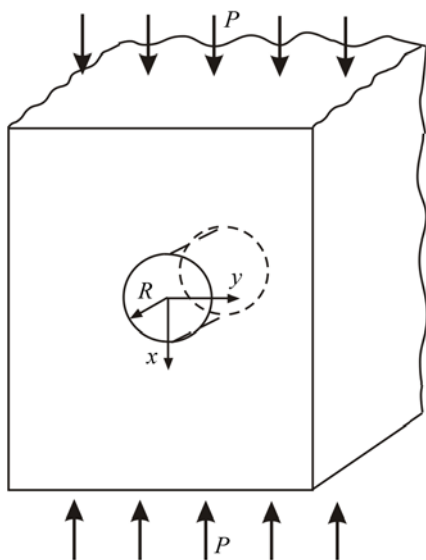


Рис. 1. Тіло з круговим циліндричним отвором в умовах стиску.

Fig. 1. A body with a round cylindrical hole under pressure.

Справді, згідно із відомими розв'язками теорії пружності [2], біля кругового отвору в тілі великих розмірів в умовах стиску (рис. 1) виникає зона розтягальних зусиль, рівень яких можна встановити зі співвідношення

$$\sigma_y(x, 0) = -p \left(\frac{1}{2} \frac{R^2}{x^2} - \frac{3}{2} \frac{R^4}{x^4} \right), \quad (1)$$

тут p – інтенсивність зусиль стиску; R – радіус отвору.

На рис. 2 одна з кривих ($E_i/E = 0$) відповідає розподілу напружень в околі кругової порожнини. Як бачимо, в інтервалі $R < x < 1,7R$ вони є розтягові, а далі, якщо $x > 1,7R$, виявлено незначні напруження стиску. Напруження розтягу за достатньої інтенсивності зусиль стиску p викликають появу тріщин відриву в околі порожнин. Дослідимо руйнування стиском призматичних зразків розміром $100 \times 200 \times 300$ mm із піщано-цементного розчину з наскрізним отвором діаметром 20 mm по осі призми на середині її висоти. Зазначимо, що такі експерименти відомі в літературі [1, 3].

Рис. 2. Розподіл напружень за межами заповненого отвору за різних жорсткостей наповнювача.

Fig. 2. Stress distribution beyond the limits of a filled opening under different filler rigidity.

За зусиль, близьких до 50% від руйнівних, біля отвору зароджувалась тріщина, довжина якої збільшувалась до певного значення, а далі вона ставала непоширюваною, оскільки її вершина попадала в зону стиску.

Остаточні зразки з отвором руйнувались за зусиль, рівних руйнівним для зразків без отворів. Траєкторія магістральної тріщини в усіх випадках проходила через отвір (рис. 3а). Такий характер руйнування бетонних призматичних зразків можна пояснити так. Як видно із співвідношення (1), концентрація напружень біля отворів не залежить від їх розмірів. Пори, які завжди є у бетоні, і штучні отвори довільного розміру створюють однакову концентрацію напружень. Один великий отвір здатний ініціювати велику тріщину, яка, попадаючи в зону стиску (див. рис. 2), стає непоширюваною для зовнішніх навантажень, за яких вона виникла. Подальший її розвиток залежить від взаємодії з порами, зокрема, від розміру зони напружень розтягу, що виникають біля них. За значної концентрації пор у бетоні зони розтягу в їх околі можуть перекриватися і, як наслідок, стане можливим злиття мікротріщин у магістральну, яка спричинить остаточне руйнування.

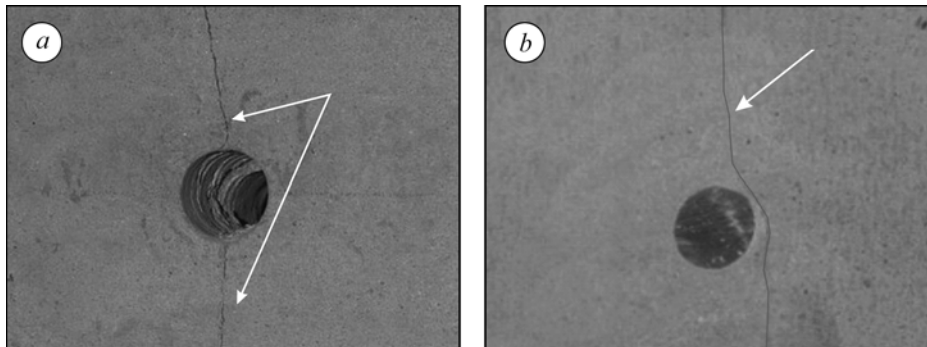
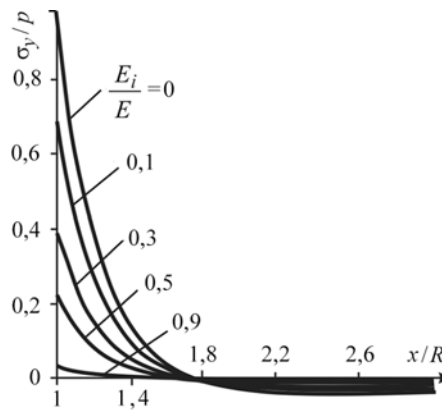


Рис. 3. Фрагменти поверхні призматичних зразків з отвором (а) та заповненим отвором (б) після руйнування. Стрілками вказані тріщини.

Fig. 3. A fragment of the surface of prismatic samples with a hole (a) and a filled opening (b) after fracture. Arrows indicate cracks.

Таким чином, одним із шляхів підвищення міцності бетонних конструкцій є зменшення кількості пор. Справді, технологічні прийоми їх зменшення в матеріалі на стадії виготовлення (ущільнення вібруванням, оптимізація співвідношення води до інших складників бетонних розчинів) дають позитивні результати, однак, повністю уникнути пороутворення практично неможливо.

У будівельній практиці застосовують технології зміцнення бетонних елементів конструкцій, що полягають у заповненні пор (або порожнин) рідинними матеріалами, які через певний час полімеризуються (або кристалізуються).

Для цього бетон просочують різними розчинами. Порожнини та тріщини ліквідують нагнітанням водно-цементних розчинів або ін'єкціями полімерних матеріалів, наприклад, поліуретанів.

Якщо припустити, що після тверднення на межі поділу матеріалів встановлюються умови ідеального механічного контакту (неперервність переміщень і напружень), то згідно з відомим розв'язком теорії пружності [2] напруження в околі заповненого отвору

$$\sigma_{y0}(x,0) = -p \left(\frac{1}{2} \gamma \frac{R^2}{x^2} + \frac{3}{2} \delta \frac{R^4}{x^4} \right), \quad (2)$$

де $\gamma = \frac{\mu(\kappa_i - 1) - \mu_i(\kappa - 1)}{2\mu_i + \mu(\kappa_i - 1)}$; $\delta = \frac{\mu_i - \mu}{\mu + \mu_i \kappa}$, $\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$, $\kappa = 3 - 4\nu$, $\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}$, $\kappa_i = 3 - 4\nu_i$; E, E_i, ν, ν_i – модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона основного матеріалу та заповнювача.

Встановлено (див. рис. 2), що рівень напружень розтягу суттєво знижується, коли жорсткість наповнювача максимально наближається до жорсткості матриці. Однак і матеріал з відносною жорсткістю $E_i/E = 0,1$ на 30% знижує їх концентрацію біля отвору. Таким чином, можна очікувати змін у схемі формування магістральної тріщини за умов стиску. Експериментально це спостерігали, досліджуючи призматичні зразки з отвором.

В частині таких зразків отвори заповнили поліуретаном, відносна жорсткість якого $E_i/E = 0,03$ і, відповідно, незначно (біля 5% згідно з ф-лою (2)) знижуються напруження розтягу біля отвору за стиску зразка. Незважаючи на малу жорсткість наповнювача, характер руйнування таких зразків суттєво змінився: в усіх випадках траєкторія тріщини проходила повз отвір (рис. 3b). Очевидно, зародження мікротріщин і їх злиття в магістральну біля пор у бетоні є домінуючим процесом і відбувається за менших зовнішніх зусиль, ніж зародження макротріщини біля заповненого отвору. Підтверджують цю тезу і співвідношення (1), (2), які вказують на меншу концентрацію напружень біля заповненого великого отвору, ніж біля пори.

Встановимо умови росту тріщини, що утворилася на контурі кругового отвору (рис. 4) в умовах стиску, скориставшись критеріями механіки руйнування і математичним апаратом теорії тріщин.

Результати праці [4] дають можливість визначити граничні навантаження стиску $p = p_c$, за яких тріщини, що утворилися на контурі кругового отвору (рис. 4), здатні поширюватись [1]:

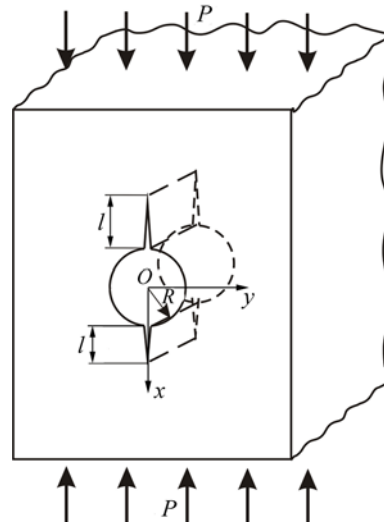
$$p_c = \sqrt{\frac{\pi(1 + \lambda)^7}{4R((1 + \lambda)^2 - 1)}} K_{IC}, \quad \lambda = l/R, \quad (3)$$

тут K_{IC} – характеристика тріщиностійкості матеріалу. Особливістю цієї схеми навантаження є те, що функція $p_c(l)$ має мінімум у деякій точці $l = l_0$ ($l_0 \approx 0,18R$). При $l < l_0$ тріщина поширюється нестійко, а при $l > l_0$ стійко (для її росту необхідно збільшувати навантаження). Пояснюють таку поведінку функції $p_c(l)$ розподілом напружень в околі отвору, де зона розтягу змінюється, якщо $l > 0,73R$, на зону стиску.

Нехай у результаті застосування ін'єкційної технології отвір заповнений матеріалом, який після тверднення забезпечує ідеальний механічний контакт

Рис. 4. Тіло з круговим циліндричним отвором та тріщинами в умовах стиску.

Fig. 4. A body with a round cylindrical hole and cracks under pressure.



із основним матеріалом (бетоном). Вважаємо, що тріщини залишаються незаповненими. Таку ситуацію з позиції лінійної теорії тріщин наближено можна описати крайовою задачею для нескінченного тіла із математичним розрізом довжиною $2(l + R)$, до берегів якого прикладені зусилля

$$\sigma_y(x) = \sigma_p(x) = \begin{cases} -\sigma_{y0}(x), & -l - R \leq x < -R, \\ 0, & -R \leq x \leq R, \\ -\sigma_{y0}(x), & R < x \leq l + R. \end{cases} \quad (4)$$

Тут $\sigma_{y0}(x)$ – напруження, які визначає співвідношення (2).

Крайову задачу (4) для розрізу можна звести до розв'язання сингулярного інтегрального рівняння

$$\int_{-l-R}^{l+R} \frac{u'(t)dt}{t-x} = \frac{2\pi(1-\nu^2)}{E} \sigma_p(x), \quad -l-R \leq x \leq l+R, \quad (5)$$

де $u(t)$ – переміщення берегів розрізу $[-l-R, l+R]$.

Розв'язок рівняння (5) за умови, що функція $\sigma_p(x)$ неперервна за Гельдером (що і маємо), набуде вигляду

$$u'(x) = -\frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \int_{-l-R}^{l+R} \frac{\sqrt{(l+R)^2 - t^2} \sigma_p(t)}{t-x} dt. \quad (6)$$

Враховуючи, що коефіцієнт інтенсивності напружень $K_I = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \times \lim_{x \rightarrow \pm l \pm R} \sqrt{\frac{\pi((l+R)^2 - x^2)}{l}} u'(x)$, на основі силового критерію поширення тріщини $K_I(p_c, l) = K_{IC}$ встановлюємо граничне навантаження:

$$p_c = \frac{K_{IC} \sqrt{2l}}{\left(\gamma \frac{R \sqrt{l^2 - R^2}}{l} + \delta \frac{R(l^2 + 2R^2) \sqrt{l^2 - R^2}}{l^3} \right)}. \quad (7)$$

Побудовано (рис. 5) графіки зміни граничних навантажень $p=p_c$ залежно від довжини тріщини та різних значень жорсткості ін'єкційного матеріалу.

Як бачимо, для ефективного зміцнення тіла з отвором і тріщинами потрібно використовувати достатньо жорсткий наповнювач. Ця особливість відрізняє ін'єктування отворів від тріщин, для яких зміцнення суттєве навіть за малих жорсткостей наповнювача [5, 6]. Характерною для функції $p_c(l)$ є точка $l = l_0$ ($l_0 \approx 0,18R$), в якій досягається мінімальне її значення. Якщо $l < l_0$, по-

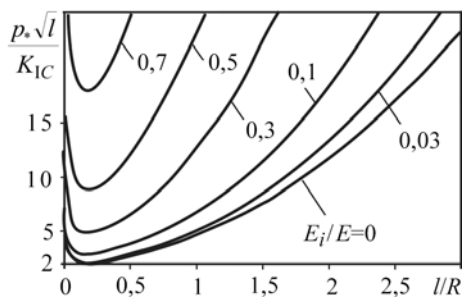


Рис. 5. Міцність зразка з заповненим отвором за різної жорсткості наповнювача.

Fig. 5. Sample strength with a filled opening under different filler rigidity.

нення ін'єкційний матеріал. Цим заповнення порожнин відрізняється від заповнення тріщиноподібних дефектів, які добре "заліковуються" ін'єктуванням податливими матеріалами, наприклад, поліуретаном.

РЕЗЮМЕ. Теоретически обосновано технологию упрочнения бетона, которая заключается в заполнении пор и полостей жидкими материалами, способными полимеризоваться или кристаллизироваться через некоторое время. Установлены условия роста трещины, образованной на контуре кругового отверстия в условиях сжатия. Исследовано влияние жесткости материала наполнителя на эффективность упрочнения тела с отверстием и трещинами.

SUMMARY. The technology of concrete strengthening which consist in filling the pores and cavities with liquid materials that are able to polymerize or crystallize after some time is theoretically proved. Conditions of the crack growth formed at the circular opening contour under compression are established. The influence of the filler material rigidity on the efficiency of strengthening of a body with a hole and cracks is investigated.

1. Зайцев Ю. В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.
2. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 707 с.
3. Raju N. K. Strain distribution and microcracking in concrete prisms with a circular hole under uniaxial compression // J. Mater. – 1971. – 5, № 4. – P. 450–456.
4. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами – К.: Наук. думка, 1968. – 248 с.
5. Силованюк В. П., Маруха В. І., Онищак Н. В. Залишкова міцність циліндричних елементів з тріщинами, залікованими за ін'єкційною технологією // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 1. – С. 99–104.

(Sylovanyuk V. P., Marukha V. I., and Onyshchak N. V. Residual Strength of Cylindrical Elements with Cracks Healed by Using the Injection Technology // Materials Science. – 2007. – № 1. – P. 109–116.)

6. Панасюк В. В., Силованюк В. П., Маруха В. І. Міцність пошкоджених тріщинами елементів конструкцій, залікованих за ін'єкційними технологіями // Там же. – 2005. – № 6. – С. 60–64.

(Panasyuk V. V., Sylovanyuk V. P., and Marukha V. I. Strength of Cracked Structural Elements Healed by Injection Methods // Materials Science. – 2005. – № 6. – P. 777–783.)

ширення тріщини нестійке, а при $l > l_0$ для її росту необхідно збільшувати навантаження.

ВИСНОВКИ

Одним із технологічних прийомів зміцнення бетонних елементів конструкцій, що експлуатуються в умовах стиску, може бути заповнення пор та порожнин рідинними матеріалами, що здатні полімеризуватися або кристалізуватися через певний час.

Зміцнення буде тим ефективнішим, що жорсткіший після тверд-

Одержано 12.11.2009