

**ПОВЗУЧИСТЬ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЯКІ
ЗНАХОДЯТЬСЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

За допомогою розрахунків доведено, що гранична деформація бетону при стиску визначається безпосередньо кількістю води, що віджимається з обводненого гідросилікатного гелю в цементному камені.

Ключові слова: цементний камінь, бетон, довгострокові деформації, повзучість.

Вступ. Головні фізико-механічні характеристики бетону – міцність і гранична деформативність – проявляються лише у випадку граничних станів залізобетонних виробів і конструкцій. В умовах експлуатації ці вироби та конструкції, а отже, й бетон у них перебувають у напружено-деформованому стані при тривалій і довгостроковій дії навантаження, що визначає їх довговічність за міцністю й тріщиностійкістю.

Одним із проявів деформаційних властивостей бетону при тривалій дії навантаження є повзучість бетону.

Як відомо, велике значення довгострокова повзучість бетону має для конструкцій, що згинаються, але не менше значення вона має для конструкцій, які працюють на стиск. Важливим при цьому є дослідження граничної деформації довгострокової повзучості, а також можливість її прогнозування.

Огляд останніх джерел, досліджень і публікацій. Аналіз джерел, існуючих гіпотез, уявлень та теорій про природу і механізми тривалої міцності й повзучості бето-ну [1, 2, 3] дає підставу вважати, що до сьогодні загально визнаної кількісної теорії пов-зучості бетону немає. Для розвитку такої теорії як найбільш імовірні вихідні передумо-ви можна прийняти, що повзучість бетону, за Шейкіним [4], обумовлена повзучістю цементного каменю, а заповнювачі зменшують її пропорційно їх умісту в одиниці об'є-му. При цьому деформативність цементного каменю обумовлена як кристалізаційними контактами зрощування (хімічні зв'язки), так і коагуляційними крапковими контактами між твердими частками гідросилікатів кальцію, розділеними прошарком рідини.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Аналіз сучасного стану проблеми повзучості бетону показує необхідність розвитку уявлень про довгочасну повзучість бетону в конструкціях і розроблення нових способів визначення складів бетону з низькою деформативністю.

Постановка завдання. Завдання полягає в тому, щоб за допомогою розрахунків довести, що гранична деформація бетону при стиску визначається безпосередньо кількістю води, яка віджимається з обводненого гідросилікатного гелю в цементному камені. Виконати теоретичні дослідження для кількісного оцінювання деформативності бетону при стиску.

Основний матеріал і результати. Розглянемо природу довгострокової граничної повзучості бетону при стиску. Грунтуючись на даних робіт [5, 6, 7], приймемо, що заз-начена повзучість обумовлена витисненням визначеної кількості води з гідросилікат-ного гелю (гелева вода) цементного каменю і підпадає під дію закону фільтрації Дарсі.

Величина коефіцієнта фільтрації визначає кінетичні закономірності, тобто швидкість деформування бетону при стиску, а величина об'єму води, що віджимається з гелю, – амплітуду об'ємної деформації за певний час. У випадку, що відповідає граничній деформації, величина t відповідає часу максимальної релаксації t_r^{max} , при якому зникає тиск у гелевій воді й припиняється її витиснення, а ΔV_{r2} – максимальному об'єму витисненої гелевої води за цей період часу. Позначимо такий об'єм ΔV_2 . При площі поперечного перерізу зразка S величина ΔV_2 визначається його осіданням Δh за час t_r^{max} :

$$\Delta B_z = \Delta h S = \varepsilon \cdot h S, \quad (1)$$

звідси вираз для граничної відносної деформації бетону набуде вигляду

$$\varepsilon = \frac{\Delta B_z}{h S}. \quad (2)$$

Величина ΔB_z визначається витратою цементу і води, тобто їхнім умістом в об'ємі бетону 1 м^3 . З обліком цього

$$\varepsilon = \Delta B_z. \quad (3)$$

Відповідно вираз для питомої міри повзучості (на $0,1 \text{ м}^3$ води в бетоні й на одиницю міцності R)

$$C_m^{y0} = \frac{\varepsilon}{BR} \cdot 0,1 = 0,1 \frac{\Delta B_z}{RB}, \quad (4)$$

де B – вихідна кількість (уміст) води в бетоні, $\text{м}^3 / \text{м}^3$.

У чистому цементному камені деформації стиску відбувалися б у всьому його об'ємі. Однак у розчинній частині бетону деформації цементного каменю спостерігаються в межах товщини прошарку цементного каменю між зернами піску. При цьому прошарок може зменшуватися до товщини, яка дорівнює середньому розміру частки цементу. Цей залишковий прошарок товщиною в один ряд цементних часток є нестисливим і перешкоджає подальшому витисненню гелевої води і деформації цементного каменю. Крім того, нестисливою є також частина цементного каменю, що розташована в міжзернових порожнинах піску при його насипному стані. Отже, цементний камінь у розчинній складовій бетону складається зі стисливої та нестисливої частин.

Об'єм цементного каменю в розчинній складовій бетону може бути виражений через пористість піску і коефіцієнт розсунення зерен піску

$$V^{пцк} = V_{пс}^n \cdot \mu. \quad (5)$$

З урахуванням відомостей робіт [7, 8] прошарку, товщина якого дорівнює середньому розміру часток цементу, відповідає оптимальний коефіцієнт розсунення зерен піску μ_{opt} .

Отже, об'єм нестисливої частини цементного каменю дорівнює

$$V_{нст}^{пцк} = V_{пс}^n \cdot \mu_{opt}. \quad (6)$$

Відповідно об'єм стисливої частини цементного каменю в розчині, з котрої відбувається витиснення води, дорівнює

$$V_{ст}^{пцк} = V_{пс}^n \cdot \mu - V_{пс}^n \cdot \mu_{opt} = V_{пс}^n \cdot \mu (1 - \mu_{opt} / \mu) = V^{пцк} (1 - \mu_{opt} / \mu). \quad (7)$$

Подібним чином розподіляється на стискувану і нестискувану частини розчинна складова бетону, що обумовлює необхідність обліку коефіцієнтів розсунення зерен щебеню α_{opt} і α . У результаті об'єм стискуваної частини цементного каменю в бетоні визначиться виразом

$$V_{ст}^{бцк} = V^{пцк} (1 - \mu_{opt} / \mu) (1 - \alpha_{opt} / \alpha). \quad (8)$$

Пропорційно $V_{ст}^{бцк}$ зміниться об'єм обводненого гелю $V_{ог}$, який стискується, і гелевої води ΔB_z , що віджимается,

$$\Delta B_z = V_{ог} (1 - \mu_{opt} / \mu) \cdot (1 - \alpha_{opt} / \alpha). \quad (9)$$

У свою чергу вихідний (до стиску бетону) об'єм обводненого гелю (гелевих новоутворень і хімічно зв'язана вода в ньому) дорівнює

$$V_{oz} = \left(0,5 \cdot B \cdot \frac{Ц}{B} \cdot \frac{\alpha_2}{\rho_u} + 0,5 \cdot B \right) \cdot 0,65 = 0,5 \cdot B \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\rho_u} \cdot \frac{Ц}{B} + 1 \right) \cdot 0,65, \quad (10)$$

де α_2 – ступінь гідратації цементу;

ρ_u – щільність цементу;

0,65 – об'ємна частка гідросилікатного гелю в продуктах гідратації цементу [9].

Звідси рівняння для відносної деформації стиску бетону і питомої міри повзучості матиме вигляд

$$\varepsilon = 0,5 \cdot B \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\rho_u} \cdot \frac{Ц}{B} + 1 \right) \cdot 0,65 \cdot \left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha} \right), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} C_m^{num} &= 0,5 \cdot B \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\rho_u} \cdot \frac{Ц}{B} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha} \right) \cdot 0,65 \frac{0,1}{BR} = \\ &= 0,05 \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\rho_u} \cdot \frac{Ц}{B} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha} \right) \cdot 0,65 / R, \end{aligned} \quad (12)$$

де 0,5 – частка хімічно і фізико-хімічно зв'язаної води в гелі.

Розподіл води в гелі на хімічно і фізико-хімічно зв'язану визначаємо, виходячи з того, що при $B/Ц = 0,24$ цементний камінь має максимальну міцність. Це може бути обумовлено мінімальною кількістю (відсутністю) вільної води в цементному камені, при цьому зберігається звичайний ступінь гідратації цементу, а хімічно незв'язана вода міститься в основному в гелі як фізико-хімічно зв'язана. При меншому $B/Ц$ (дефіцит води для гідратації) зниження міцності пояснюється зменшенням ступеня гідратації цементу. При більшому $B/Ц$ зниження міцності пояснюється появою вільної води (понад хімічно і фізико-хімічно зв'язану).

Прийемо, що при $B/Ц = 0,24$ уся хімічно незв'язана вода міститься в гідросилікатному гелі. При $\alpha_m = 0,5$ і $B/Ц = 0,24$ водоцементне відношення, що відповідає кількості хімічно зв'язаної води в цементному камені, складе $(B/Ц)_x = 0,23 \cdot 0,5 = 0,115$, а водоцементне відношення, що відповідає кількості хімічно зв'язаної води, $(B/Ц)_{fx} = 0,24 - 0,115 = 0,125$. З урахуванням наближеності обчислень прийемо частки хімічно й фізико-хімічно зв'язаної води в гелі однаковими – по 0,5.

При $\mu_{onm} = 2,7$ (для дрібного піску), $\alpha_{onm} = 1,1$ і середніх величинах коефіцієнтів розсунення зерен піску та щебеню $\mu = 3,43$ і $\alpha = 1,36$

$$C_m^{num} = 0,002034 \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\rho_u} \cdot \frac{Ц}{B} + 1 \right) \cdot 0,65 / R. \quad (13)$$

Це рівняння справедливе для бетонів низької та середньої міцності, при яких в умовах надлишкового об'єму води кількість продуктів гідратації визначається вмістом цементу в бетоні. Як відомо, для високоміцних бетонів ступінь гідратації обумовлюється вмістом води.

Відповідно кількість цементу, при якому ступінь гідратації починає визначатися вмістом води, дорівнює

$$Ц_{пред} = \frac{0,5 \cdot B}{0,23}. \quad (14)$$

Об'єм обводненого гідросилікатного гелю в цементному камені при цьому складі

$$V_{oz} = \left(\frac{0,5 \cdot B \cdot \alpha_2}{0,23 \cdot \rho_u} + 0,5 \cdot B \right) \cdot 0,65 = 0,5 \cdot B \left(\frac{\alpha_2}{0,23 \cdot \rho_2} + 1 \right) \cdot 0,65, \quad (15)$$

а відносна деформація і питома міра повзучості

$$\varepsilon = 0,5 \cdot B \cdot \left(\frac{\alpha_2}{0,23 \cdot \rho_u} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha} \right) \cdot 0,65, \quad (16)$$

$$C_m^{num} = 0,05 \cdot \left(\frac{\alpha_2}{0,23 \cdot \rho_u} + 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{\mu_{onm}}{\mu} \right) \cdot \left(1 - \frac{\alpha_{onm}}{\alpha} \right) \cdot 0,65 / R. \quad (17)$$

При витраті цементу $C_{гран} \geq 435$ кг/м³ у розрахунку деформацій бетону необхідно переходити від формул (11), (12) і (13) до формул (16), (17).

На рис. 1 наведено, за даними роботи [8], поле кореляції між експериментальними величинами питомої міри повзучості $C_m^{num} \times 10^6$ та міцністю бетону R , а також функціональна залежність $C_m^{num} \times 10^6 - R$ (суцільна лінія), побудована за рівняннями (12) і (16) з урахуванням значень C/B , що відповідають за законом B/C аналізованим значенням міцності бетону.

На рисунку 2 зображено поле кореляції між тими ж величинами $C_m^{num} \times 10^6$ та кількістю води ΔV_{oz} , визначеними за формулою (10). Величини V_{oz} у формулі (9) визначені за допомогою рівнянь (10) і (15) для різних значень міцності бетону при стиску й відповідних значень цементно-водних відносин і витрати води. Коефіцієнт кореляції між теоретичною кривою й експериментальними даними дорівнює $r = 0,961$.

Вигляд графіка – на рис. 1, лінійний характер регресії з перетинанням осей координат у нулі – на рис. 2.

Висновки. Високий ступінь кореляції між експериментальними і теоретичними даними свідчить про те, що гранична деформація бетону при стиску визначається безпосередньо кількістю води, яка віджимається з обводненого гідросилікатного гелю в цементному камені.

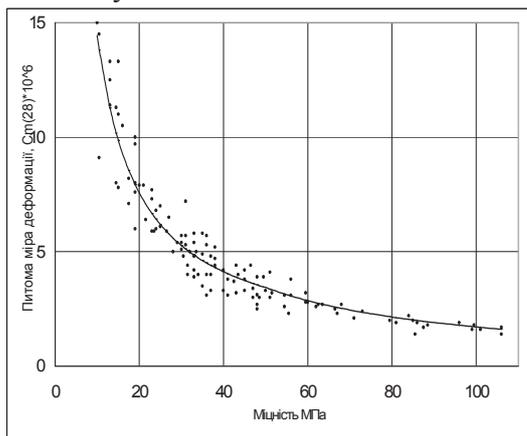
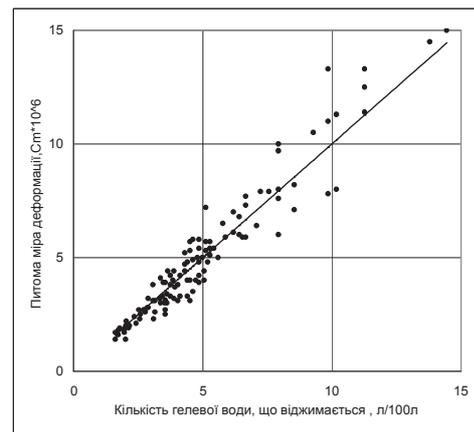


Рисунок 1 – Залежність між питомою мірою деформації C_m^{num} і міцністю



— за регресійним рівнянням;

● експериментальні дані

Рисунок 2 – Залежність між питомою мірою деформації C_m^{num} і кількістю гелевої води, що віджимається

Література

1. Развитие теории деформативности бетона на основе преобразованной модели Кельвина / А.Н. Плугин, С.Н. Кудренко, А.А. Плугин, С.В. Мирошниченко, О.А. Калинин // *Научный вестник строительства*. – Харьков: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2000. – Вып. 9 – С. 183 – 189.
2. Кинетические аспекты количественной теории деформирования бетона / А.Н. Плугин, О.А. Калинин, С.Н. Кудренко, С.В. Мирошниченко, А.А. Плугин // *Автомобільні дороги та дорожнє будівництво: наукові праці українського міжгалузевого науково-практичного семінару «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення»*, Київ, 22 – 24 червня 2000 р. – Київ: УТУ, 2000. – № 59. – С.178 – 182.
3. Vitek J.L. Behaviour and modelling in serviceability limit states including repeated and sustained loads /J.L. Vitek / *Contribution to the State of the Art Report*. – Prague: Czech Technical University, 1996. – P. 35.
4. Шейкин А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссель. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
5. Байков В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
6. Понаднормативна довгочасна повзучість бетону в залізобетонній конструкції місткісної споруди / А.А. Плуґін, А.М. Плуґін, С.М. Кудренко, Д.А. Плуґін // *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: Зб. наук. праць*. – Харків: ХарДАЗТ, 1999. – Вып. 37.
7. Плугин А.Н. Коллоидно-химические основы прочности, разрушения и долговечности бетона и железобетонных конструкций / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин // *Цемент*. – 1997. – № 2. – С. 28–32.
8. Берг О.Я. Высокопрочный бетон. / Я.О. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.

С.Н. Камчатная, к.т.н., доцент

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков

ПОЛЗУЧЕСТЬ БЕТОНА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С помощью расчетов доказано, что предельная деформация бетона при сжатии определяется непосредственно количеством воды, отжимаемой из гидросиликатного геля в цементном камне.

Ключевые слова: цементный камень, бетон, долговременные деформации, ползучесть.

S.N. Kamchatnaya, PhD, Associate Professor
Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkiv

CREEP OF CONCRETE IN EXPLOITED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

It was proved by calculations, that limit deformation of concrete under compression load depends on water, which are squeezed out from hydrosilicate gel in a cement stone.

Keywords: concrete stone, concrete, long-term deformation, creep

Надійшла до редакції 21.10.2014
© С.М. Камчатна