

ОШКИНА Л. М., СЕЛЯЕВ В. П., КОРОВКИН Д. И., АНДРОНЫЧЕВ Д. О.
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. Рассмотрено влияние структурных параметров и напряженного состояния на ползучесть цементных композитов при совместном действии сжимающих напряжений и агрессивных сред. Предложено уравнение ползучести образцов цементных композитов с учетом усредненных реологических параметров материала. Предложены выражения для определения деградационной функции жесткости, зависящей от скорости переноса жидкости в объем образца, находящегося под действием сжимающих напряжений и химического взаимодействия материала с агрессивной средой.

Ключевые слова: осевое сжатие и растяжение, агрессивная среда, деградационная функция, несущая способность, жесткость, ползучесть, деформации, модуль упругости, релаксация, композиционные материалы, строительные конструкции.

OSHKINA L. M., SELYAEV V. P., KOROVKIN D. I., ANDRONYCHEV D. O.
THE INFLUENCE OF STRUCTURAL PARAMETERS AND STRESS
ON THE CREEP OF CEMENT COMPOSITES

Abstract. The influence of structural parameters and stress on the creep of cement composites with joint action of compressive stresses and aggressive conditions is studied. Considering the averaged rheological material parameters, an equation of the creep of cement composites is suggested. A formula of degradation stiffness function, depending on the speed of fluid transfer in the sample under the action of compressive stresses and chemical interaction with aggressive environment, is presented.

Keywords: axial compression and tension, aggressive conditions, degradation function, bearing capacity, stiffness, strain, creep, modulus of elasticity, relaxation, composite materials, building constructions.

В реальных условиях эксплуатации действием агрессивных сред подвержены конструкции, находящиеся под влиянием широкого диапазона нагрузок. При этом долговечность строительных конструкций во многом определяется не только их несущей способностью, но и деформативными характеристиками используемых материалов. Изменение параметров ползучести композитов в условиях воздействия агрессивных сред имеет крайне важное практическое значение при проектировании строительных конструкций, поэтому задача получения математических зависимостей для описания и прогнозирования происходящих деградационных процессов является крайне важной и актуальной.

Бетон представляет собой упругопластический материал, состоящий из трех фаз – жидкой, твердой и газообразной, количественное соотношение которых изменяется в процессе эксплуатации. Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением количества геля при твердении цементного камня. Под нагрузкой происходит перераспределение напряжений с испытывающей вязкое течение гелевой структурной составляющей на кристаллический сросток и зерна заполнителей. Одновременно развитию деформаций ползучести способствуют капиллярные явления, связанные с перемещением в микропорах и капиллярах избыточной воды под нагрузкой. С течением времени процесс перераспределения напряжений затухает и деформирование прекращается. Начиная с малых напряжений, при длительном действии нагрузки постоянного уровня в нем помимо упругих восстанавливающихся деформаций развиваются и нарастают неупругие остаточные или пластические деформации.

Центрально сжатые и растянутые элементы строительных конструкций из железобетона рассчитываются по несущей способности исходя из условия:

$$N \leq N(0)D(N) = \varepsilon_{\text{пр}} E(0)F(0)D(N),$$

где $N(0)$ – сила, воспринимаемая сечением в момент времени $t = 0$; $D(N)$ – деградиационная функция несущей способности.

Предельные деформации $\varepsilon_{\text{пр}}$ при осевом сжатии или растяжении можно определить из интегрального уравнения ползучести, предложенного В. М. Бондаренко [1; 2]:

$$\varepsilon_{\text{пр}}(t) = S_M(\sigma(t)) \frac{1}{E_M^0(t)} - \int_{t_0}^t S_n(\sigma(t)) \frac{\partial}{\partial t} c(t, t_0) dt, \quad (1)$$

где ε – полные деформации в момент наблюдения t ; t_0 – время приложения напряжения $\sigma(t)$; S_M , S_n – функции напряжений для мгновенных и запаздывающих деформаций; $E_M^0(t)$ – начальный модуль упругости; $c(t, t_0)$ – мера ползучести.

Рассмотрим ползучесть образца композита, контактирующего с агрессивной средой и находящегося под действием центрально сжимающей нагрузки P . Предполагаем, что реологические параметры $E_0(c)$, $E_d(c)$, $\tau(c)$ зависят от концентрации (c) агрессивной среды. Тогда, согласно [3], для случая переменных свойств материала уравнение ползучести в линейном приближении имеет вид:

$$E_0(c)\tau(c)\dot{\varepsilon} + E_d(c)\varepsilon = \sigma + \tau(c)\dot{\sigma}, \quad (2)$$

где E_0 – начальный модуль упругости; E_d – длительный модуль упругости; τ – время релаксации.

При неравномерном распределении концентрации жидкости по площади поперечного сечения образца для решения уравнения (2) воспользуемся методом усреднения реологических параметров (рис. 1).

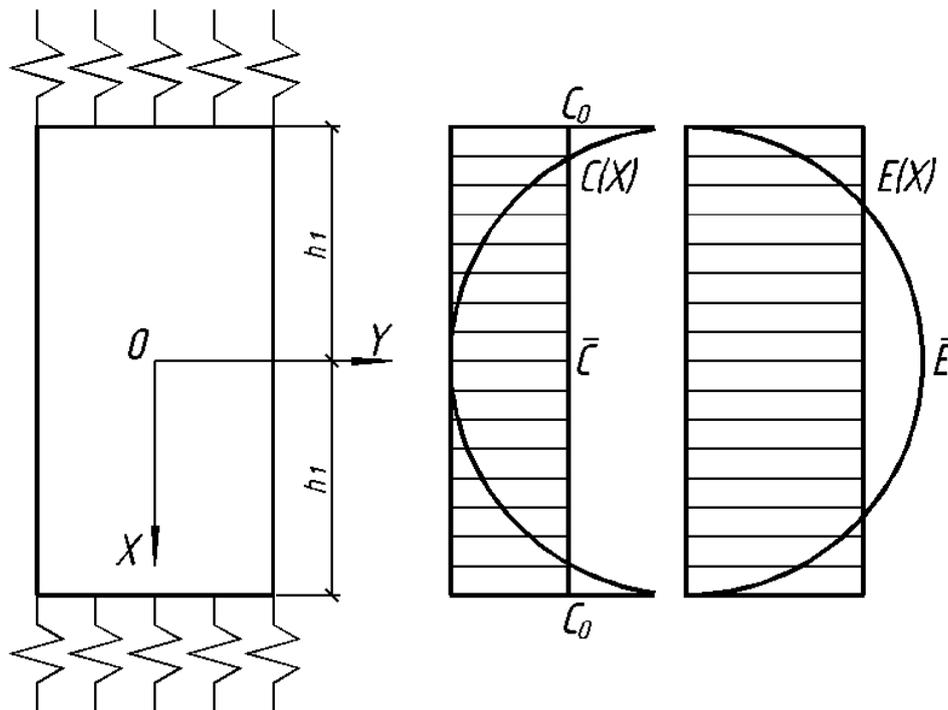


Рис. 1. К расчету ползучести методом усреднения в зависимости от концентрации по высоте сечения:
 $h_1 + h_2$ – высота поперечного сечения экспериментального образца;
 $C(X)$ – эпюра изменения концентрации агрессивной среды в объеме образца при двустороннем проникновении агрессивной среды;
 $E(X)$ – эпюра изменения прочностных свойств материала образца при двустороннем проникновении агрессивной среды.

Уравнение ползучести (2) после усреднения реологических параметров примет вид:

$$\overline{E_0} \tau \dot{\varepsilon} + \overline{E_D} \varepsilon = \overline{\sigma} + \tau \dot{\overline{\sigma}}. \quad (3)$$

Если в момент $t = 0$ концентрация агрессивной среды в материале равна нулю ($c = 0$), то решением уравнения (3) является функция

$$\varepsilon(t) = \frac{\overline{\sigma\tau}}{\overline{E_D\tau}} + \int_0^t K(t, t_0) dt_0. \quad (4)$$

Предполагая, что начальные значения $E_0(c_H)$ и $\tau(c_H)$ не зависят от концентрации среды, и выражая изменение E_D по площади поперечного сечения элемента линейной или экспоненциальной функциями, находим ядро уравнения

$$K(t, t_0) = \frac{\overline{\delta_0}}{E_0(c_H)\tau} \left(1 - \frac{\overline{E_D}}{E_0(c_H)} \exp \left(- \int_0^t \frac{\overline{E_D}}{E_0(c_H)\tau} dt_0 \right) \right). \quad (5)$$

В формуле (5) среднее значение длительного модуля деформации равно

$$\overline{E}_D = \int_0^t E(t, x) dx = \overline{E_0 c_H} D(W_c), \quad (6)$$

где $D(W_c)$ – деградационная функция жесткости, определяемая в общем случае из соотношения:

$$D(W_c) = \frac{\iint_{F(t)} E(t, x, y) dx dy}{\iint_{F(0)} E(t_0, x, y) dx dy} \quad (7)$$

С учетом выражения (6) и ядра уравнения (5) деформации ползучести будут определяться из соотношения:

$$\varepsilon(t) = \frac{\overline{\sigma}}{\overline{E_0(c_H)} D(W_c)} + \frac{\overline{\sigma}}{\overline{E_0(c_H)} \tau(c_H)} \int_0^t \left(1 - D(W_c) \exp\left(-\int_0^t \frac{D(W_c)}{\tau(c_H)} dt_0\right) \right) dt_0. \quad (8)$$

При действии сжимающих напряжений деградационная функция $D(W)$ зависит от скорости переноса жидкости в объем и химического взаимодействия материала с агрессивной средой. Основной характеристикой скорости переноса жидкости в пористой среде является обобщенный коэффициент диффузии D , определяемый формулой [4, 5]:

$$D = D_m + \frac{4 R^2 v_m^2}{192 D_m}. \quad (9)$$

Зависимость усредненного значения радиуса пор R от уровня сжимающих напряжений имеет вид уравнения:

$$R^2 = \frac{3V_{по}}{4\pi \Delta N} \exp\{-\alpha\sigma\} \approx R_0^2 \exp\{-\alpha\sigma\}. \quad (10)$$

Тогда выражение, определяющее деградационную функцию $D(W)$ при $k_2 = 1$; $k_m = 1$; $k_1 = E(t)/E(0)$, можно записать в виде:

$$D(W) = 1 - \frac{2k(\xi)\sqrt{(D_m + (4 R_0^2 v_m^2/192 D_m) \exp(-\alpha\sigma)) t}}{h} \left(1 - \frac{E(t)}{E(0)} \right). \quad (11)$$

По результатам проведенных исследований получены зависимости, позволяющие аналитически описать процессы ползучести, происходящие в материале конструкций на основе цементных вяжущих под действием сжимающих напряжений и агрессивных сред. Приведенные зависимости целесообразно использовать для описания процессов деградации цементных композитов, а также прогнозирования поведения и срока службы строительных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В. М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. – Харьков: Выща школа, 1968. – 323 с.
2. Бондаренко В. М. К построению общей теории железобетона (специфика, основы, метод) // Бетон и железобетон. – 1978. – № 9. – С. 20–22.
3. Соломатов В. И., Селяев В. П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
4. Ошкина Л. М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов при совместном действии сжимающих напряжений и жидких агрессивных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 16 с.
5. Селяев В. П., Соломатов В. И., Ошкина Л. М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 152 с.