

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 624.012.45

МОДЕЛЬ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ БЕТОННОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО ФИБРОБЕТОНА

канд. техн. наук, доц. И.П. ПАВЛОВА
(Брестский государственный технический университет)

Представлена модель расширяющегося бетонного композита для прогнозирования величины самонапряжения напрягающего бетона в условиях объемного ограничения. Основные положения модели базируются на постулатах теории эффективной среды и теории упрочняющегося композита. Рассмотрена возможность совместного применения расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа и базальтовой фибры для получения химического преднапряжения и повышения прочностных характеристик бетона. Применение базальтовой фибры, введение которой в небольших количествах благодаря распаду на монофиламенты с высокой удельной поверхностью приводит к повышению прочности бетонного композита за счет эффекта 3D-армирования структуры и изменения вязкости разрушения. Количество расширяющейся добавки назначается исходя из позиций достижения необходимого уровня самонапряжения. Максимальное содержание базальтовой фибры ограничивается до 5%, чтобы предотвратить эффект перколяции, но обеспечить формирование условного «пространственного каркаса» из волокон фибры. Предложенная модель позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать самонапряжение – основную энергетическую характеристику напрягающего бетона.

Ключевые слова: напрягающий бетон, базальтовая фибра, теория эффективной среды, модель расширяющегося композита.

При проектировании составов напрягающего бетона основной характеристикой является величина его самонапряжения [1–5]. В работе для определения величины самонапряжения бетона использована трехкомпонентная пространственная модель композита, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны.

Основные положения модели. При построении модели в данной работе приняты следующие предпосылки:

- расширяющийся композит можно условно представить в виде континуума активной матрицы, в теле которой дискретно расположен пассивный заполнитель;
- рассматриваемая моделируемая система расширяется равномерно по объему без нарушения сплошности контактов.

При прогнозировании процесса расширения для упрощения расчетов в модели использован ряд допущений, не искажающих физический смысл рассматриваемого явления:

- моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя;
- в процессе расчета в качестве пассивной компоненты рассмотрен заполнитель с транзитной зоной вокруг него, для которого согласно основным положениям рассчитывают некоторые усредненные деформативные характеристики;
- базальтовая фибра, распадаясь на монофиламенты, создает пространственное армирование (так называемое 3D-армирование) в бетоне и рассматривается в итоге как ограничивающий элемент с определенными жесткостными характеристиками.

Жесткостные характеристики элементов модели и их изменение во времени. В силу специфики структурообразования расширяющегося композита транзитную зону в дальнейшем рассматриваем как неактивную компоненту, вынужденными деформациями которой с целью упрощения расчетов можно пренебречь. В расчетной модели в качестве заполнителя рассматривается некоторый идеализированный сферический заполнитель с размером зерна, равным размеру зерна заполнителя с транзитной зоной вокруг него, и с усредненными (эффективными), упругими характеристиками (рисунок 1).

Для определения эффективных деформативных характеристик идеализированного моноразмерного заполнителя использованы положения дифференциальной теории эффективной среды (англ. *Differential Effective Medium Theory* – далее D-EMT) [6; 7].

В соответствии с правилами, сформулированными в D-EMT, частица заполнителя с размером \bar{r} и деформативными характеристиками G_{agg}, K_{agg} , помещенная в транзитную зону размером $\bar{r} + \delta_{ITZ}$

с деформативными характеристиками G_{itz} , K_{itz} , заменяется новой эффективной частицей с размером $a = \bar{r} + \delta_{ITZ}$ и соответствующими деформативными характеристиками (модулем сдвига и объемным модулем) G_{id} , K_{id} .

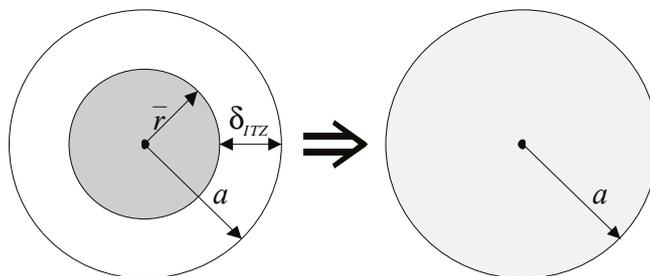


Рисунок 1. – Трансформация композитного включения в эффективную частицу с размером a в соответствии с правилами D-EMT

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига G_{id} композитного включения с учетом транзитной зоны находят из решения соответствующего квадратного уравнения:

$$A \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right)^2 + 2B \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right) + C = 0, \quad (1)$$

где a , b , c – коэффициенты, предложенные в работе [7].

Эффективный объемный модуль K_{id} для данного «приведенного» заполнителя с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по следующей зависимости:

$$K_{id} = K_{itz} + \frac{p(K_{agg} - K_{itz})}{1 + (1-p) \left[\frac{K_{agg} - K_{itz}}{K_{itz} + \frac{4}{3}G_{itz}} \right]}. \quad (2)$$

Пользуясь зависимостями (1) и (2), рассчитывают характеристики бетона к некоторому фиксированному моменту времени τ (как правило, к возрасту 28 сут), однако процессы структурообразования в расширяющемся композите развиваются во времени, в течение которого в бетоне возникают как силовые, так и несиловые воздействия, приводящие к изменению деформаций системы.

При прогнозировании рассматривается процесс расширения во времени, поэтому следующим допущением является вид функции $E(\tau)$. В настоящих исследованиях использована функция, применяемая для описания упрочняющегося во времени материала:

$$E(\tau) = \beta(\tau) [1 - \delta(\tau)] \bar{E}, \quad (3)$$

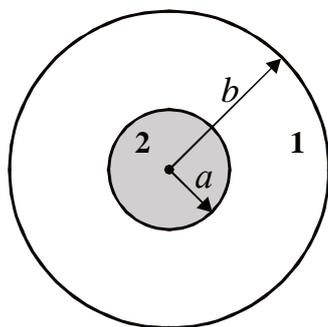
где \bar{E} – модуль упругости материала, установленный без учета эффектов старения при $\beta = 1$ и $\delta = 0$; $\beta(\tau)$ – степень упрочнения материала; $\delta(\tau)$ – степень старения материала. Параметры β и δ варьируются в пределах от 0 до 1 и монотонно возрастают с течением времени.

В работах Laube для описания процессов упрочнения бетонного композита предложена функция $\beta(\alpha)$, описывающая процесс упрочнения материала в зависимости от степени гидратации $\alpha(\tau)$ цементного вяжущего:

$$\beta(\alpha) = \left[\frac{\alpha(\tau) - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^{2/3} \geq 0. \quad (4)$$

Напряжения и деформации расширяющейся композитной системы. Для начала рассмотрим наиболее простой с точки зрения реализации решения случай одиночного включения, располагаемого в активной матрице цементного камня. В работе [7] указывается граничная концентрация заполнителя $c_{agg} = 0,05$, при которой не наблюдается эффекта влияния соседних частиц. Для случая изолированного сферического включения, окруженного оболочкой произвольной толщины, погруженного в одно-

родную матрицу (все три фазы имеют некоторые произвольные, условные модули и деформации расширения), получены аналитические решения, позволяющие рассчитать напряженно-деформированное состояние расширяющейся системы. В реальной структуре бетона близкое расположение частиц заполнителя



1 – активная матрица, $a < r < b$;
2 – заполнитель, $0 < r < a$,
где r – радиальная координата

Рисунок 2. – Схематическое представление анализируемой системы

будет играть важную роль, однако на начальном этапе расчета и для случая изолированного заполнителя будут сохраняться все закономерности формирования напряжений и перемещений, свойственных композиту. В данном случае в моделируемой системе рассматриваются только перемещения и напряжения, вызываемые расширением активной матрицы.

Для единичного сферического включения, помещенного в бесконечную активную матрицу, при определении напряженно-деформированного состояния композита использованы стандартные решения осесимметричной задачи с привлечением функции напряжений $airu$. В сферических координатах радиальная компонента перемещения, обозначенная u , будет являться функцией от радиуса r . Тогда три диагональные составляющие тензора деформаций (деформации сдвига равны нулю) будут соответственно следующими: $\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}$, $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u}{r}$, где θ и φ – углы в сферических координатах.

В I фазе две независимые составляющие (при $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi}$) тензора деформаций могут быть соответственно записаны как

$$\sigma_{rr} = \left(K_i + \frac{4}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \left(K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \varepsilon_i^0; \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + \left(2K_i + \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \varepsilon_i^0, \quad (6)$$

где ε_i^0 – свободные деформации расширения i -той фазы.

Для решения дифференциальных уравнений (5), (6) воспользуемся решением Лямэ: для i -той фазы общее решение для радиальной компоненты вектора перемещений $u(r)$ будет иметь вид: $u(r) = \alpha_i r + \frac{\beta_i}{r^2}$, где α_i и β_i – некоторые неизвестные коэффициенты, различные для каждой фазы, определяемые из соответствующих граничных условий. Тогда с учетом принятой функции перемещений, и учитывая, что для заполнителя $\beta = 0$, уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\sigma_{rr} = 3K_i \alpha_i + 4G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0; \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 3K_i \alpha_i + 2G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0. \quad (8)$$

Для нахождения оставшихся неизвестных коэффициентов в уравнениях (7), (8) могут быть приняты следующие условия:

- условия неразрывности перемещений и напряжений на границе раздела «заполнитель – матрица» при $r = a$;

- условие равенства нулю напряжений в радиальном направлении при $r = b$.

С учетом обозначенных граничных условий может быть записана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_m + \frac{\beta_m}{a^3} - \alpha_{id} = 0; \\ K_m \alpha_m - \frac{4}{3} G_m \frac{\beta_m}{a^3} - K_{id} \alpha_{id} - K_m \varepsilon_m^0 = 0; \\ K_m \alpha_m - \frac{4}{3} G_m \frac{\beta_m}{b^3} - K_m \varepsilon_m^0 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Относительные деформации расширения, развивающиеся в композитной системе, в общем случае будут определены как $\varepsilon_{0,CE} = u(r=b)/b$, или как

$$\varepsilon_{0,CE} = \alpha_m + \frac{\beta_m}{b^3}, \quad (10)$$

где α_m, β_m – коэффициенты, установленные из решения системы (9).

Получив решение для одиночного включения в соответствии с основными положениями D-EMT, выполняют замену существующей системы, состоящей из одиночного включения и активной матрицы (система «первого уровня»), некоторой идеализированной однородной средой, имеющей в процессе расширения относительные деформации $\varepsilon_{0,ce}$ и жесткостные характеристики:

$$K_0 = K_m + K_m k (K_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (11)$$

$$G_0 = G_m + G_m g (G_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (12)$$

где k и g – безразмерные коэффициенты, зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения K_m/K_{id} и G_m/G_{id} .

В соответствии с положениями D-EMT для данной однородной системы часть объема ($c = 0,05$) заменяем заполнителем и находим K_j и G_j , воспользовавшись соответствующими уравнениями. Далее, подставив в систему уравнений (9) соответствующие значения K_m, G_m и $\varepsilon_m^0 = \varepsilon_{0,CE}$, найдем относительную деформацию расширения ε_j ($j = 1, 2, \dots, n$, причем $\sum_{j=1}^n c = c_{agg}$) – «второй уровень».

Так, путем последовательной замены, переходя от уровня к уровню, для реальной концентрации заполнителя c_{agg} определяют текущие значения жесткостных характеристик K, G и относительную деформацию расширения ε композитной системы в момент времени τ . Полученная деформация ε соответствует деформации «свободного» расширения композита ε_{CE} .

Поскольку рассматривается композит, ограничение деформаций расширения которого обусловлено наличием в структуре разветвленной 3D-сетки, состоящей из базальтового волокна (рисунок 3), то для расчета прогнозируемой величины самонапряжения в условиях ограничения идеализированный однородный массив с установленными жесткостными характеристиками и деформацией расширения ε_{CE} помещается в оболочку с жесткостью, эквивалентной жесткости упругого ограничения базальтовой фиброй, косвенно определенной как условный «процент армирования» ρ_f .

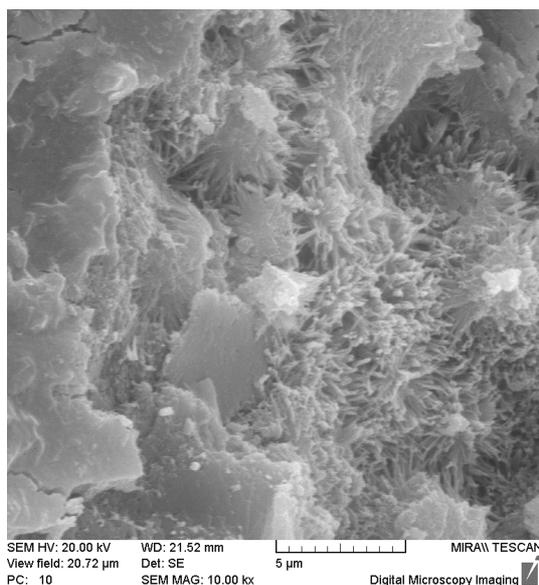


Рисунок 3. – Микроснимок образца цементного камня, модифицированного расширяющейся добавкой и базальтовой фиброй

Для модели «расширяющееся ядро в упругой оболочке», воспользовавшись уравнениями (7) и (8), определена относительная деформация расширения бетона ε_c в условиях внешнего упругого ограничения.

Для случая объемного армирования относительные связанные деформации можно определить по следующей зависимости:

$$\varepsilon_c(\tau) = \frac{1}{1 + \rho_l \frac{K_s}{K_c(\tau)}} \cdot \varepsilon_{TOT}(\tau), \quad (13)$$

где K_c – объемный модуль бетона; K_f – объемный модуль фибры; ε_{TOT} – деформация «свободного» расширения бетона.

Тогда величина самонапряжения для рассматриваемой модели определяется по традиционной формуле, как

$$\sigma_{CE} = \varepsilon_c \rho_l E_f. \quad (14)$$

Отношение прогнозируемой величины самонапряжения к марке по самонапряжению в стандартных условиях ограничения составит:

$$\frac{\sigma_{CE}}{f_{CE,d}} = \frac{1 + \left(\frac{K_f}{K_c}\right)}{1 + \rho_l \cdot \left(\frac{K_f}{K_c}\right)} \cdot \rho_l \cdot 10^2. \quad (15)$$

Для сравнения положений модели были использованы опытные данные [8].

Сравнение опытных данных с данными, получаемыми в результате расчетов по зависимости (15) для случая объемного армирования фиброй, представлено на рисунке 4.

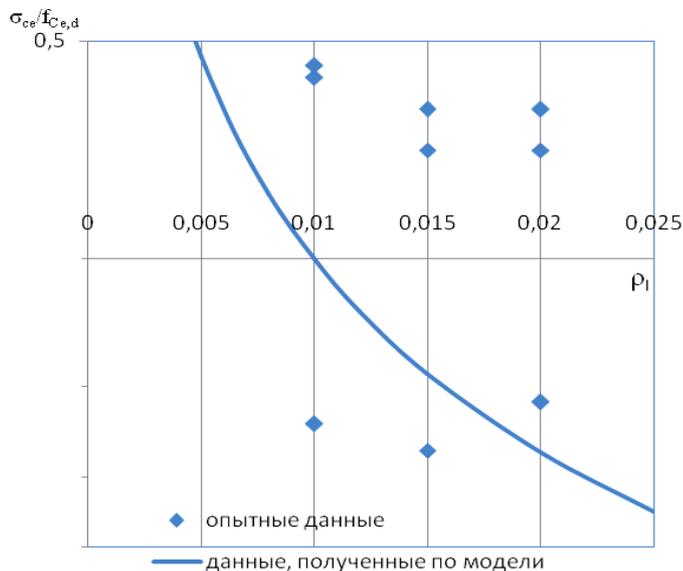


Рисунок 4. – Сравнение опытных данных с прогнозируемыми по модели

Как видно из представленной графической интерпретации зависимостей, несмотря на достаточно обширный разброс экспериментальных данных, модель достаточно адекватно описывает влияние изменения косвенного процента армирования фиброй на величину самонапряжения в условиях объемного ограничения деформаций.

Таким образом, на основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие **выводы:**

- к числу несомненных преимуществ модели расширяющегося бетонного композита следует отнести ее универсальность;

- предложенная модель предоставляет возможность рассчитать итоговые деформации и напряжения для различных условий ограничения – модель позволяет получать адекватные характеристики расширения как в условиях одноосного ограничения [6], так и в условиях плоского и объемного ограничений;

- модель расширяющегося бетонного композита более гибко реагирует на изменение входных параметров и позволяет оценить влияние структуры композита на итоговые связанные деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников, К.Г. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина // Физико-химические исследования цементного камня и бетона : сб. тр. ; под ред. А.Е. Десова. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 4–20.
2. Литвер, С.Л. Самонапряженный железобетон и его применение в строительстве / С.Л. Литвер // Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве : материалы науч.-техн. совещ. / Центральный Российский Дом знаний. – М., 1992. – С. 12–17.
3. Михайлов, В.В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М. : Стройиздат, 1974. – 389 с.
4. Панченко, А.И. Критерии оценки расширяющихся вяжущих и бетонов на их основе / А.И. Панченко, Г.В. Несветаев // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений : сб. тр. ; под ред. Н.П. Блещика и В.В. Тура. – Брест : БПИ, 1998. – С. 179–190.
5. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест : Изд. БПИ, 1998. – 243 с.
6. Павлова, И.П. Приложение теории эффективной среды к моделированию жесткостных характеристик бетонного композита / И.П. Павлова, В.В. Тур // Строительная наука и техника. – Минск, 2005. – № 3. – С. 3–8.
7. Garboczi, E.J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E.J. Garboczi, J.G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – P. 455–470.
8. Бондаренко, В.М. Сопротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.М. Бондаренко. – Брест, 2010. – 148 с.

Поступила 07.12.2018

EXPANSIVE CONCRETE COMPOSITE MODEL FOR PREDICTION SELF-STRESS MAGNITUDE IN EXPANSIVE FIBERCONCRETE

I. PAULAVA

In present paper expansive concrete composite model for prediction self-stress magnitude in triaxial restriction conditions are presented. Main model conditions on the basis of Effective Medium Theory and Solidification Theory are founded. In work are considered probabilities of expansive sulfo-aluminate type additive and basalt fiber partnering for chemical prestressing and strength concrete properties increasing. Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to concrete composite strength increase course of 3D-structure reinforcement effect and changing fracture toughness. Amount of expansive additive assign proceeding from achievement of necessary self-stress level. Maximum amount of basalt fiber limit to 5% cause to prevent percolation effect, but to provide formation of filament spatial framework. Proposed model allow with adequate degree of accuracy prognoses main characteristic of self-stressed concrete – self-stressing.

Keywords: self-stressed concrete, basalt fiber, effective medium theory, expansive composite model.