

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО ДИСПЕРСНО- АРМИРОВАННОГО БЕТОНА С ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИЕЙ РАСШИРЕНИЯ

ПАВЛОВА И. П., БЕЛКИНА И. В.

Брестский государственный технический университет

В статье представлены результаты экспериментальных исследований напрягающих дисперсно-армированных бетонов. Предложена модифицированная деформационная модель для определения собственных деформаций напрягающего фибробетона.

Введение.

Расширяющиеся бетоны уже давно пользуются большим спросом при возведении крупнопролетных конструкций и сооружений. Такие бетоны способны не только компенсировать усадочные деформации, но и создавать преднапряжение в конструкции [1]. Перспективным направлением является уход от расширяющихся бетонов с компенсированной усадкой к напрягающим бетонам с высокой энергоактивностью. С помощью энергии расширения такие бетоны способны передавать самоупругающее напряжение армирующему элементу, поэтому весь свой потенциал раскрывают, как правило, в конструкциях с различными типами ограничения (одно-, двух- и трехосное) [2, 3, 4]. Примерами таких конструкций являются балки со стержневым армированием, плиты, трубобетон и др. Они отличаются высокими прочностными и деформационными показателями. Однако, в сооружениях с высокими требованиями к трещиностойкости и ударной прочности, зачастую, приходится вводить дополнительные армирующие элементы, что приводит к перерасходу материала и, как следствие, значительным экономическим затратам. Решением данной проблемы стало введение волокон фибры в напрягающий бетон. Но главным преимуществом дисперсного армирования является способность ограничивать свободное расширение бетона.

На ранних сроках твердения расширяющегося бетона параллельные процессы активного роста кристаллов этtringита и формирование кристаллического сростка C-S-H приводят к спадам прочности (повторяющееся упрочнение структуры и последующее ее разуплотнение из-за активного расширения). На более поздних сроках твердения активное неограниченное объемное расширение опасно для сформировавшегося каркаса и приводит к полной деструкции структуры. Равномерно распределяясь в объеме бетона, фиброволокна образуют пространственный каркас, воспринимающий напряжения в матрице и способный тормозить образование микротрещин в процессе формирования расширяющейся структуры.

На данный момент нет единого мнения относительно оптимального количества фибры, необходимого для армирования бетона. Большинство подходов базируется на зависимостях, полученных эмпирическим путем. Получение зависимостей таким способом очень узконаправлено и не обладает универсальностью, а также требует больших материальных и временных затрат. Поэтому одним из перспективных подходов является структурное моделирование.

Моделирование собственных связанных деформаций.

За основу в данной работе принята модель, предложенная авторами Hidetoshi Ito и др. [5]. Она позволяет оценивать развитие собственных связанных деформаций только для одноосно ограниченных элементов. Модель базируется на следующих положениях: свободные деформации рассматриваются как сумма связанных, упругих и пластических деформаций, изменяемых во времени. Упругие и пластические деформации определяются через функцию ползучести бетона. В статье авторами рассматривается вариант одноосного ограничения стержневым армированием балки.

В последующем модель была модифицирована другими авторами для случая двух- и трехосного ограничения [3, 4].

Для дисперсно-армированных напрягающих бетонов решение одноосной задачи некорректно. Поэтому было предложено модифицировать указанную модель. Для прогнозирования связанных деформаций напрягающего фибробетона были решены следующие задачи с учетом определенных предпосылок и допущений. Так как дисперсное армирование предполагает равномерное распределе-

ние в объеме, а расширение также происходит во всех трех направлениях, расчетную модель можно представить в виде бетонной сферы с радиусом (r) и с оболочкой из фибры постоянной толщины (t), при этом, бетон расширяется равномерно, без нарушения сплошности оболочки (рис. 1).

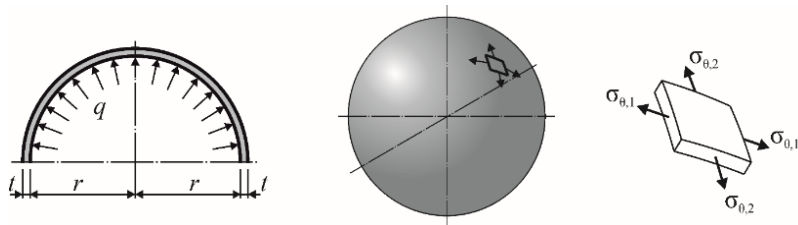


Рисунок 1. Схема трехосного ограничения расширяющейся бетонной сферы фибровой оболочкой постоянной толщины

Тогда напряжения, возникающие на оболочке, можно выразить следующими формулами (1):

$$q = \sigma_{f,\theta} = \frac{t}{r} \cdot \sigma_{\theta};$$

$$\sigma_{\theta,1} = \frac{E}{1 - \mu_s} \cdot [\varepsilon_{\theta,1} + \mu_s \cdot \varepsilon_{\theta,2}];$$

$$\sigma_{\theta,2} = \frac{E}{1 - \mu_s} \cdot [\varepsilon_{\theta,2} + \mu_s \cdot \varepsilon_{\theta,1}],$$
(1)

где μ_s – коэффициент Пуассона материала фибровой оболочки;
 E – модуль упругости материала фибры.

Учитывая, что данные напряжения в двух направления равны $\sigma_{\theta,1} = \sigma_{\theta,2}$, решив систему уравнений, получим значения приращений напряжений во времени (2):

$$\left(\Delta\sigma_{f,\theta}\right)_i = \frac{t}{r} \cdot \frac{E}{1 - \mu_s} \cdot \left[\left(\Delta\varepsilon_{r\theta,1}\right) + \mu_s \cdot \left(\Delta\varepsilon_{r\theta,2}\right) \right].$$
(2)

В общем случае приращение связанной относительной деформации $(\Delta\varepsilon_r)_i$ на произвольном i -ом временном интервале можно выразить через разность приращения свободной относительной деформации $(\Delta\varepsilon_f)_i$ и суммы приращений упругой и пластической составляющей $[(\Delta\varepsilon_{el})_i + (\Delta\varepsilon_{pl})_i]$ (3).

$$(\Delta\varepsilon_r)_i = (\Delta\varepsilon_f)_i - \left[(\Delta\varepsilon_{el})_i + (\Delta\varepsilon_{pl})_i \right], \quad (3)$$

где $(\Delta\varepsilon_f)_i$ – приращение свободной относительной деформации на произвольном i -ом временном интервале;

$(\Delta\varepsilon_{el})_i$ – приращение упругой относительной деформации на произвольном i -ом временном интервале;

$(\Delta\varepsilon_{pl})_i$ – приращение пластической относительной деформации на произвольном i -ом временном интервале.

Выразим сумму приращений упругой и пластической составляющей через напряжения и функцию ползучести бетона, учитывая, при этом, модифицированный модуль упругости и коэффициент ползучести бетона.

$$(\Delta\varepsilon_{c,el})_i + (\Delta\varepsilon_{c,pl})_i = (\Delta\sigma_c)_i \cdot J(t_{i+1/2}; t_i) + \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_c)_j \cdot \frac{\Delta\phi(t_i; t_j)}{E_{cm,28}} \right], \quad (4)$$

где $J(t_{i+1/2}; t_j) = \frac{1}{E_c(t_j)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}; t_j)}{E_{cm,28}}$ – функция ползучести бетона;

$$E_c(t) = E_{cm,28} \cdot \exp \left[s \left(1 - \left(\frac{t_{m,28} - a}{t_i - a} \right)^{0.5} \right) \right] - \text{модуль упругости бето-}$$

на в модифицированном возрасте, соответствующем реальному возрасту бетона t_j ;

$E_{cm,28}$ – модуль упругости бетона, соответствующий 28-ми суткам реального возраста бетона;

$\Delta\phi(t_i; t_j) = \phi(t_{i+1/2}; t_j) - \phi(t_{(i-1)+1/2}; t_j)$ – приращение коэффициента ползучести бетона на произвольном i -ом временном интервале

Решая систему 2-го и 4-го уравнения, получим уравнение приращения собственных связанных деформаций за i -ый временной интервал:

$$(\Delta\varepsilon_r)_i = (\Delta\varepsilon_f)_i - \frac{t}{r} \cdot \frac{E}{1 - \mu_s} \cdot \left[(\Delta\varepsilon_{r\theta,1}) + \mu_s \cdot (\Delta\varepsilon_{r\theta,2}) \right] \cdot J(t_{i+1/2}; t_i) - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_c)_j \cdot \frac{\Delta\phi(t_i; t_j)}{E_{cm,28}} \right] - \sum_{j=1}^{i-1} \left[\frac{(\Delta\sigma_c)_j}{E_{cm}(t_j)} \right] \cdot \frac{E_{cm,aw}(t_{(i-1)+1/2})}{E_{cm}(t_{(i-1)+1/2})} \quad (5)$$

Такая модифицированная модель является универсальной для различных составов напрягающего бетона, типов фибры, т.к. позволяет учитывать любую вариацию характеристик. В итоге, при известных деформационных характеристиках неармированного напрягающего бетона и фибры, а также ее количества, МДМ (модифицированная деформационная модель) позволяет получить значения связанных деформаций за необходимый период времени. В зависимости от решения поставленных задач возможно и обратное действие, для требуемых собственных связанных деформаций – определить необходимое количество фибры.

Был проведен ряд экспериментальных исследований напрягающих бетонов, дисперсно-армированных стальной фиброй, в результате которых получены данные, позволившие подтвердить корректность предлагаемого подхода. Рассчитанные данные показали хорошую сходимость с экспериментом (рис. 2).

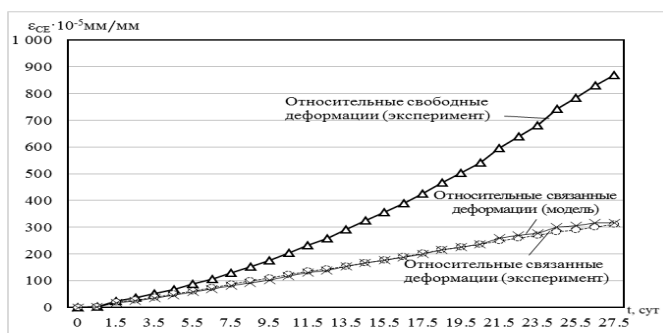


Рисунок 2. Зависимость изменения свободных и связанных деформаций напрягающего бетона во времени

6. В рамках работы следует отметить, что немаловажным вопросом является также выбор типа фибры для дисперсного армирования. Так, авторами были рассмотрены варианты моноармирования (использование фибры одного типа) и полидисперсного (многоуровневого) с учетом иерархичности структуры. Полидисперсное армирование предполагает рассматривать армирование согласно размерным уровням композита от субмикро- до макроуровня. Макроуровень, где характеристики напряженно-деформированного состояния рассматриваются применительно к композиту в целом, ар-

мируется макрофиброй, которая включается в работу при значительных внешних и внутренних воздействиях. Мезо- и микроуровень заполняет фибра малых размеров, например, полипропиленовая или базальтовая. На этом уровне фибра активно участвует в деформационных процессах структурообразования, сдерживая негативные последствия активного расширения, спадов прочности, разуплотнения структуры. Армированием на субмикроуровне являются кристаллы этtringита, по форме напоминающие иглы (рис. 3).



Рисунок 3. Уровни строения структуры напрягающего фибробетона

Совместная работа волокон позволяет раскрыть потенциал характеристик фибр и компенсировать их недостатки при одиночном армировании.

Был выполнен ряд экспериментальных исследований, где в качестве дисперсного армирования были выбраны полипропиленовая, стальная и смесь этих фибр. В качестве эталона был принят базовый состав напрягающего бетона (НБО). В случаях моноармирования были использованы стальная фибра (8,0 % от массы вяжущего – образцы НБС) и полипропиленовая фибра (0,6 % от массы вяжущего – образцы НБП), для полиармирования была принята смесь двух фибр и их суммарное количество в процентах (образцы НБПС). Исследования, показали хорошую совместную работу полипропиленовой и стальной фибры, в отличие от этих же фибр при моноармировании.

Так полиармированные образцы показали комплексно высокие результаты прочности на изгиб (на 17,3 %), модуля упругости (увеличение на 1,4 %) и прочности на сжатие (плюс 3 %) в сравнении с эталоном (рис. 4).

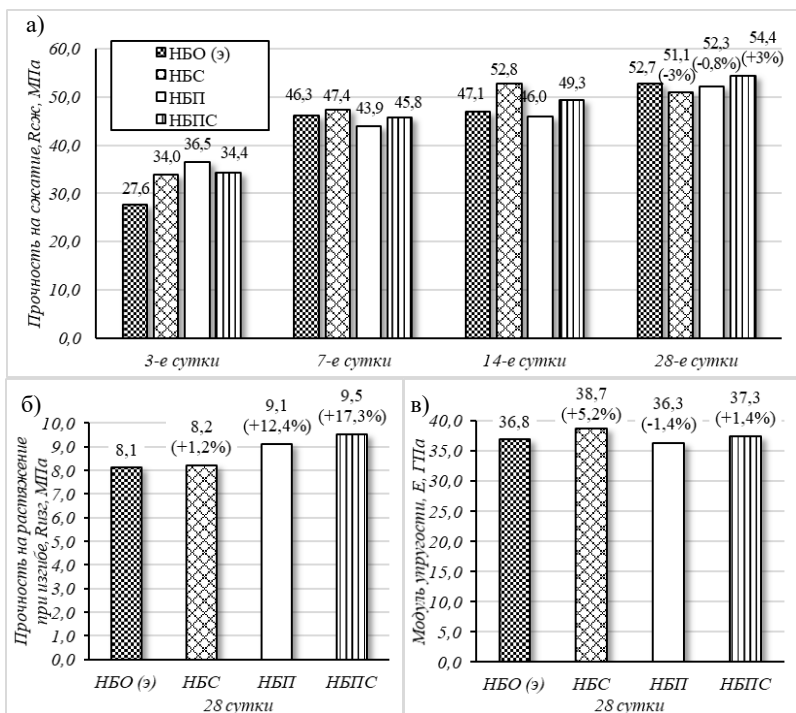


Рисунок 4. Значения для экспериментальных образцов: а – прочность на сжатие; б – прочность на растяжение при изгибе; в – модуль упругости

Заключение.

1. Моделирование собственных деформаций расширения напрягающего дисперсно-армированного бетона позволяет существенно сократить временные затраты, требуемые для получения экспериментальных данных. Предложенная модифицированная модель является универсальной для различных составов напрягающего бетона и типов фибры. При известных деформационных характеристиках неармированного напрягающего бетона и фибры, а также ее количества, МДМ (модифицированная деформационная модель) позволяет получить значения связанных деформаций за необходимый период времени. В зависимости от поставленных задач возможно для требуемых связанных деформаций – определить необходимое количество фибры.

2. Применение полидисперсного армирования позволяет расширить возможности использования напрягающего бетона за счет повышения прочности на растяжение, модуля упругости. Так напрягающий фибробетон находит свое применение при устройстве емкостных сооружений, дорожного полотна и промышленных полов, позволяя увеличивать неразрезную площадь рабочих карт, тем самым снижая трудозатраты и увеличивая срок безремонтной эксплуатации сооружений.

Список использованных источников:

1. Расширяющиеся и напрягающиеся цементы и самоупроченные конструкции: учебное пособие / В. В. Михайлов, С. Л. Литвер. – М. : Стройиздат. –1974. – 389 с.
2. Early age strain and self-stresses of expansive concrete members under uniaxial restraint conditions / V. Semianiuk [et al.] // Construction and Building Materials. – 2017. – № 131. – P. 39 – 49.
3. Tur, V., Sannikava, V. Assessment of the early-age strains and stresses in 2D restrained self-stressed members/ V. Tur, V. Sannikava // Budownictwo i Architektura. – 2020. – № 19 (4) – P. 85 – 94.
4. Analytical Model for Restraint Strains and Self-stressed in Expansive Concrete Filled Steel Tubes (ECFST) estimation. / V. Tur [et al.] // Vestnik of Brest State Technical University. – 2020. – № 1 – P. 93 – 98.
5. Ito, H. Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete / H. Ito [et al.] // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2004. – № 2. – P. 155 – 174.