

Список использованных источников

1. Остриков, О. М. Конкурс «3D-моделирование» как реклама аддитивных технологий и метод интенсификации обучения трехмерному моделированию и конструированию / О. М. Остриков // Аддитивные технологии, материалы и конструкции : материалы научно-технической конференции, Гродно, 5–6 октября 2016 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 228–230.
2. Остриков, О. М. Конкурсы и олимпиады по 3D-моделированию как эффективные образовательные технологии в подготовке специалистов транспортного комплекса / О. М. Остриков, М. Я Острикова, В. О. Остриков // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 г. : в 2 ч. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2023. – Ч. 2. – 203–204.
3. Асенчик, О. Д. Опыт проведения конкурса «3D-моделирование» в УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» / О. Д. Асенчик, Г. В. Петришин, О. М. Остриков // Тез. докл. III Республиканской научно-методической конференции «Проблемы современного образования в техническом вузе». – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2013. – С. 95–97.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА С ПОЛИДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Павлова¹ И. П., Лизогуб² И. В., Лизогуб³ А. А.

*канд. техн. наук, доц., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов
УО «Брестский государственный технический университет»
г. Брест, Республика Беларусь, pavlinna@tut.by*

*магистр техн. наук, старший преподаватель кафедры строительного производства
УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»
г. Гродно, Республика Беларусь, belalutaja-95@mail.ru*

*магистр. техн. наук, научный сотрудник НИЧ
УО «Брестский государственный технический университет»
г. Брест, Республика Беларусь, p_332_14lizogub@mail.ru*

Напрягающий бетон обладает способностью не только компенсировать усадочные деформации, но и получать регулируемое исходное напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, положительно влияющее на их эксплуатационные характеристики и долговечность. Напрягающий бетон наиболее полно реализует свои свойства в условиях ограничения. Подходы

к прогнозированию свойств напрягающего бетона не являются универсальными, поскольку основаны, как правило, на феноменологических методах и эмпирических зависимостях. Поэтому для сокращения временных и экономических затрат необходимо минимизировать возможные экспериментальные исследования, заменяя эмпирический подход аналитическим моделированием.

Выделяют два основных подхода к определению собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона в условиях ограничения. Первый – энергетический подход (теории В. В. Михайлова, Y. Tsuji), базирующийся на законе сохранения энергии. Энергия, которая при свободном расширении затрачивается на разрушение внутренних связей цементной матрицы, компенсируется работой арматуры на растяжение и бетона на сжатие [1, 2]. Данный подход позволяет выполнять расчеты, не устанавливая зависимости, описывающие кинетику развития свободных деформаций расширения во времени, изменение модуля упругости и функции ползучести напрягающего бетона в раннем возрасте, опираясь только на энергетическую марку бетона по самонапряжению. Однако энергетические модели не способны охватить все возможные варианты ограничения (несимметричное одностороннее армирование, абсолютно жесткое ограничение, свободное расширение и пр.) [3].

Наряду с энергетическими, широкое применение получили модели, базирующиеся на втором основном подходе, – деформационном. Такой подход рассматривает расширение на элементарных временных интервалах, на которых происходит приращение деформаций свободного расширения. Деформационные модели способны учитывать изменения физико-механических свойств материала, влияние ползучести в раннем возрасте и реакции, возникающей в упругом ограничении на очередных этапах прироста деформаций [4, 5]. Недостатком таких моделей является трудоемкость расчета ввиду большого количества входных параметров.

Известно, что модификация структуры бетона одновременным вводом расширяющейся добавки и фибры может значительно улучшить эксплуатационную надежность и повысить эффективность конструкций и сооружений [6–10]. Расширение такого бетона происходит в условиях обжатия дисперсными армирующими волокнами, в результате чего создается предварительное напряжение, которое почти полностью сохраняется и после стабилизации процесса. Ввиду хаотичного расположения волокон, формирующего объемный преднапряженный фиброкаркас [11], дисперсное армирование напрягающего бетона следует рассматривать как пространственное ограничение. Вследствие этого, прогнозирование деформаций и напряжений необходимо осуществлять, руководствуясь положениями деформационного подхода.

Модифицированная деформационная модель напрягающего фибробетона для случая трехосного ограничения основана на предпосылке о том, что данный материал может быть представлен в виде шара из расширяющегося бетонного ядра и покрывающей его однородной оболочки постоянной толщины, состоящей из материала фибры (рис. 1).

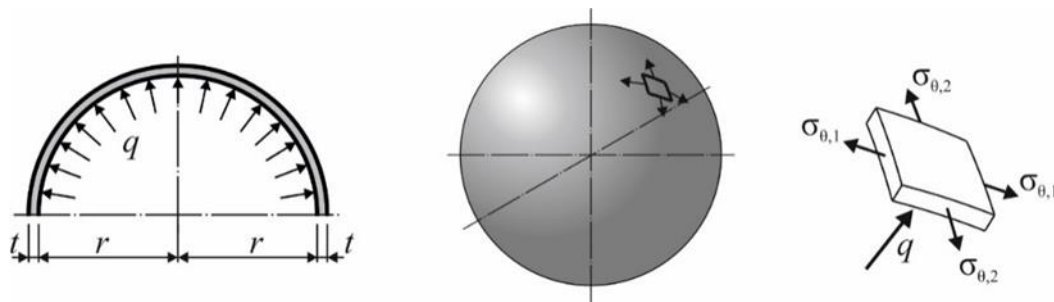


Рисунок 1 – Изображение сферической оболочки из фибры с возникающими в ней напряжениями σ_t и σ_m от действия радиальной равномерно распределенной нагрузки q

В общем виде модель напрягающего фибробетона для случая трехосного ограничения в соответствии с [15] на произвольном i -м временном интервале может быть описана системой уравнений:

$$\begin{cases} (\Delta\sigma_{cf})_i = \frac{2t}{r} \cdot \frac{E_s}{1-\mu_s} \cdot (\Delta\varepsilon_r)_i; \\ (\Delta\varepsilon_r)_i = (\Delta\varepsilon_f)_i - (\Delta\sigma_{cf})_i \cdot (1-2\mu_c) \cdot J(\tau_{i+1/2}; \tau_i) - \sum_{j=1}^{i-1} \left[(\Delta\sigma_{cf})_j \cdot \frac{\Delta\phi(\tau_i; \tau_j)}{E_{cm,28}} \right] - \\ - \sum_{j=1}^{i-1} \left[\frac{(\Delta\sigma_{cf})_j}{E_{cm}(\tau_j)} \right] \cdot \frac{E_{cm,aw}(\tau_{(i-1)+1/2})}{E_{cm}(\tau_{(i-1)+1/2})}. \end{cases} \quad (1)$$

Как видно из (1) результатом решения (откликом модели) являются собственные деформации ε_r и напряжения напрягающего фибробетона σ_{cf} , на которые влияет ряд геометрических, жесткостных, деформационных параметров, а также его возраст и температура.

Отношение t/r является геометрической характеристикой расчетной модели и согласно принятым допущениям [12] пропорционально расходу фибры на единицу объема бетона. Другими словами, данный параметр отражает объемное соотношение волокон фибры ρ_s .

Жесткостные характеристики модели, к которым относятся модуль упругости и коэффициент Пуассона, условно можно разделить на параметры напрягающего бетона (E_c , μ_c) и параметры материала фибры (E_s , μ_s) (в случае полиармирования – параметры n материалов (E_{s1} , μ_{s1} , ..., E_{sn} , μ_{sn})).

К деформационным характеристикам модели относится функция относительных деформаций свободного расширения во времени $\varepsilon_f(\tau)$, функции ползучести бетона $J(\tau_{i+1/2}; \tau_j)$.

Стоит отметить, что адекватное теоретическое описание процесса развития деформаций свободного расширения фибробетона во времени $\varepsilon_f(\tau)$ и по сей день является фундаментальной проблемой физики и механики бетона. Поэтому в данных исследованиях используются нормализованные зависимости $\varepsilon_f(\tau)$ для составов напрягающего бетона различной активности, полученные по результатам испытаний.

Важными характеристиками модели являются возраст τ и температура T напрягающего фибробетона на стадии его твердения и расширения. Данные параметры учитываются при моделировании изменения модуля упругости и функции ползучести бетона во времени путем введения модифицированного возраста бетона τ_i , который соотносится с τ суткам реального возраста бетона и учитывает влияние температурного режима на стадии твердения и расширения бетона:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n \Delta\tau_j \cdot e^{13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta\tau_j)/T_0}}, \quad (2)$$

где $\Delta\tau_j$ – количество суток (дней) с температурой T (°C); $T_0 = 1^\circ\text{C}$.

Модуль упругости бетона в модифицированном возрасте, соответствующем реальному возрасту бетона τ_j , может быть получен:

$$E_c(\tau) = E_{cm,28} \cdot \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{\tau_{m,28} - a}{\tau_i - a} \right)^{0,5} \right] \right\}, \quad (3)$$

где s – эмпирический коэффициент, учитывающий тип вяжущего;

a – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние времени начала схватывания.

Коэффициент ползучести бетона $\phi(t; t_0)$ рассчитывают по следующей формуле:

$$\phi(\tau; \tau_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(\tau; \tau_0), \quad (4)$$

где ϕ_0 – базовый коэффициент ползучести;

$\beta_c(\tau, \tau_0)$ – коэффициент, описывающий развитие ползучести во времени после нагружения.

$$\beta_c(\tau, \tau_0) = \frac{(\tau - \tau_0)}{\beta_H + (\tau - \tau_0)}, \quad (5)$$

β_H – коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона [3, 6].

Проанализировав полученные результаты, были сформулированы следующие **выводы**:

1. Изменяя количество и вид расширяющейся добавки и варьируя коэффициент армирования, можно получить сталефибробетоны с регулируемым значением собственных деформаций.

2. Область эффективного использования стальных волокон с целью достижения эффекта «связывания» свободного расширения в напрягающем бетоне разной энергоактивности располагается в пределах значений от $\rho_s = 0,38\%$ до $\rho_s = 0,64\%$ (от 30 до 50 кг на 1 м^3 бетона).

3. Увеличение модуля упругости бетона приводит к сдерживанию развития свободных деформаций и созданию более благоприятного напряженно-деформированного состояния, что в итоге приводит к увеличению связанных деформаций по отношению к свободным при высоких модулях упругости. Наоборот, снижение модуля упругости, приводя к снижению общей жесткости композитной системы, в итоге не «препятствует» росту свободных деформаций при общем снижении величины связанных. В таких случаях для энергоактивных

бетонов, склонных к разуплотнению на стадии расширения и спадам прочности и модуля упругости, необходимо предусматривать дисперсное армирование по верхнему пределу ($\rho_s = 0,64 \%$).

4. Изменение количества вводимой фибры приводит к разным эффектам в развитии связанных деформаций напрягающего бетона в разные временные интервалы. Увеличение процента фибры в бетоне приводит к снижению связанных деформаций, причем зависимость носит линейный характер до момента стабилизации расширения, когда в активно гидратирующей системе происходит перераспределение напряжений и фибра связывает систему, оказываясь химически преднапряженной. После стабилизации процесса расширения зависимость становится нелинейной и с увеличением $\rho_s > 0,64 \%$ носит пологий характер. Дальнейшее увеличение количества фибры при стабилизировавшемся процессе расширения приводит только к увеличению пластической составляющей в структуре, что подтверждает сформулированные выше выводы об оптимальной области объемного содержания фибры в напрягающем бетоне разной активности, при которой ее свойства как ограничивающего элемента реализуются наиболее полно.

Список использованных источников

1. Михайлов В. В. Расширяющиеся и напрягающиеся цементы и самонапряженные конструкции / В. В. Михайлов, С. Л. Литвер // М.: Стройиздат, 1974. – 389 с.
2. Tsuji, Y. Methods of estimating chemical prestress and expansion distribution in expansive concrete subjected to uniaxial restraint / Y. Tsuji // Concrete Library of JSCE. – 1984. – №3. – p. 131–143.
3. Тур, В. В. Модели, применяемые для расчета связанных деформаций и самонапряжений в элементах из напрягающего бетона / В. В. Тур, О. С. Семенюк // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 1. – С. 53–69.
4. Ito, H. Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete / H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, R. Sato // Journal of Advanced Concrete Technology. 2004;(2). – pp. 155–174.
5. Semianiuk, V. Early age strains and self-stresses of Expansive concrete members under uniaxial restraint conditions / V. Semianiuk, V. Tur, M. F. Herrador // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 131. – PP. 39–49.
6. Алексеев, В. А. Добавки с самостоятельной гидравлической активностью для набрызгбетона / В. А. Алексеев, Ю. М. Баженов, С. И. Баженова [и др.] // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8 (1008). – С. 61–63.
7. Елсуфьева, М.С. Оценка долгосрочного изменения свойств стале-фибробетонов с расширяющими добавками / В. Г. Соловьев, А. Ф. Бурьянов // Строительные материалы. – 2015. – № 7. – С. 21–23.

8. He, H. A. Performance on steel fiber reinforced self-stressing concrete. Key Engineering Materials / H. A. He, B. X. Wang, J. T. Lin // Trans Tech Publications Ltd. 2009. – Vol. 400. – Pp. 427–432. – DOI:10.4028/www.scientific.net/kem.400-402.427.

9. Харченко, А.И. Применение расширяющихся цементов для набрызгбетона в тоннельном строительстве / А. И. Харченко, И. Я. Харченко, В. Я. Алексеев, С. И. Баженов // Вестник МГСУ. – 2019. – №11 – С. 1438–1448.

10. Sengul, O. Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers // Construction and Building Materials. 2018. – Vol. 186. – Pp. 1082–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.042.

11. Елсуфьева, М. С. Применение расширяющихся добавок в сталефибробетоне / М. С. Елсуфьева, В. Г. Соловьев, А. Ф. Бурьянов // Строительные материалы. – 2014. – № 8. – С. 60–63.

12. Павлова, И. П. Собственные деформации напрягающего бетона с дисперсным армированием: часть 1. Моделирование / И. П. Павлова, И. В. Белкина // Известия вузов. Строительство. – 2022. – №9. – С. 5–17.

ИНВЕСТИЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Проровский А. Г.

*зав. кафедрой мировой экономики, маркетинга, инвестиций
УО «Брестский государственный технический университет»*

Введение

Инвестиционно-строительный комплекс реагирует на внутренние и внешние условия [1]. В 2023 году мировая экономика столкнулась с проблемами повышения темпов инфляции, ужесточению денежно-кредитной политики; украинский конфликт оказывает значительное давление на глобальные прямые иностранные инвестиции; санкционная война и действия «коллективного Запада» нарушают основы рыночной экономики [2].

Анализируя инвестиционную деятельность в Республике Беларусь (таблица 1), можно сделать следующие выводы:

1) инвестиции в основной капитал в 2023 году в Республики Беларусь выросли после снижения в 2022 году;

2) аналогичная ситуация по вводу в эксплуатацию основных средств и затратам на строительно-монтажные работы;

3) в 2023 значительно повысились затраты на приобретение машин, оборудования, транспортных средств.