

УДК 693.554-486

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

И.П. Павлова, И.В. Белкина, Т.В. Каленюк

Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь

e-mail: pavlinna@tut.by, lutaja-95@mail.ru, tvkalianiuk@g.bstu.by

В статье обосновано применение дисперсного армирования совместно с напрягающим бетоном. Рассмотрена концепция многоуровневого дисперсного армирования. Представлена модифицированная деформационная модель прогнозирования собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона.

Ключевые слова: *напрягающий фибробетон, многоуровневое армирование, структурная модель, собственные деформации, самонапряжение, модифицированная деформационная модель, объемное ограничение.*

PREDICTION OF SELF STRAINS AND STRESSES OF DISPERSED REINFORCED SELF-STRESSING CONCRETE

I. Paulava, I. Belkina, T. Kalianiuk

Brest State Technical University, Republic of Belarus

e-mail: pavlinna@tut.by, lutaja-95@mail.ru, tvkalianiuk@g.bstu.by

The article substantiates the use of dispersed reinforcement in conjunction with self-stressing concrete. The concept of multi-level dispersed reinforcement is considered. A modified strains development model for predicting the restrained expansion strains and stresses of fiber reinforced self-stressing concrete.

Keywords: *fiber reinforced self-stressing concrete, multilevel reinforcement, structural model, restrained expansion strains, self-stressing, modified strains development model, volumetric constraint.*

Введение. Напрягающие бетоны занимают особое место в области бетоноведения. Многообразии способов создания расширения привело к появлению более 50 видов расширяющихся бетонов. Широко известны бетоны на основе глиноземистого цемента, а также на портландцементе с применением сульфоалюминатных расширяющихся добавок. Сфера их применения варьируется от дорожных покрытий, полов и фундаментов, до массивных сооружений. Главным преимуществом использования такого рода бетонов является многозадачность. В процессе твердения расширение способно не только компенсировать химическую усадку, но и создавать преднапряжение в построечных условиях без натяжения арматуры. Бетоны на расширяющихся вяжущих обладают высокой коррозионной стойкостью, водонепроницаемостью и морозостойкостью [1].

Тем не менее, применение напрягающих бетонов до сих пор является достаточно ограниченным и вызывает множество споров. Несмотря на уникальность свойств, нестабильность составов остается одной из главных проблем. Так, невозможность полного исключения поздней перекристаллизации высокоосновных гидросульфоалюминатов кальция негативно сказывается на конечных свойствах композита. Некоторые закономерности процессов, протекающих в напрягающих бетонах, остаются неизученными и по сей день.

Отсутствие достоверных инструментов прогнозирования деформаций расширения напрягающего бетона привело к ситуации, когда основным методом исследования является эксперимент. При таком подходе достаточно сложно установить, что явилось причиной неудачи: неверно подобранные дозировки составов либо непредвиденные негативные процессы, возникшие в бетоне в процессе твердения и (или) эксплуатации.

Одной из проблем, присущих расширяющимся композитам, является неограниченное расширение, которое считают наиболее опасным на поздних сроках твердения, так как оно приводит к образованию трещин в цементной матрице, что в свою очередь вызывает потерю прочности материала. Само назначение напрягающего бетона – создавать преднапряжение, подразумевает наличие ограничителя, что служит решением данной проблемы. При этом, в качестве ограничителя может быть использованы различные типы стержневой арматуры, располагаемые в одной либо нескольких плоскостях конструкции. Наиболее эффективно напрягающий бетон реализует себя в конструкциях с трехосным или пространственным ограничением. Такое армирование чаще всего применяется в полах, плитах, мостах, трубобетоне.

Следующим вопросом стало определение количества армирования, необходимого для достижения требуемых значений преднапряжения. На данный момент нет универсального подхода к определению собственных деформаций и напряжений. Большинство методик справедливы лишь для случая одноосного армирования, будь то способ, предложенный основоположником научной школы «Бетоны на расширяющихся вяжущих и конструкции из них» профессором Михайловым В.В. [2] или подход, изложенный в нормативных документах (СТБ 1335, СТБ 2101).

Робкие попытки прогнозирования собственных деформаций и напряжений заканчиваются случаями одноосного ограничения [3]. Учеными из Беларуси [4–6] под руководством профессора Тура В.В. удалось модифицировать существующую деформационную модель [3] напрягающего бетона для случая одноосного несимметричного армирования [4], и двухосного ограничения [5, 6].

С развитием напрягающего бетона, совершенствовались и подходы к управлению процессами, протекающими в его структуре. Исследователи стремились найти способ уменьшить негативные последствия от расширения и одновременных спадов прочности. Такие модификации привели к появлению напрягающих фибробетонов. Сначала фибра использовалась в качестве дополнения к стержневому армированию, но на данный момент дисперсное армирование волокнами рассматривают как самостоятельное пространственное ограничение [7–10].

Целью данной работы является исследование подходов к прогнозированию деформационных свойств и разработка комплексной методики, направленной на получение высокоэффективного дисперсно-армированного напрягающего бетона.

Получение высокоэффективных материалов, как правило, реализуется через концепцию целенаправленного усовершенствования уже существующих методов разработки и свойств создаваемых материалов. Улучшение свойств будущего композита может быть достигнуто модификацией его структуры путем введения дисперсного армирования.

1. Многоуровневое дисперсное армирование. Известно, что применение фибры в традиционных бетонах позволяет повысить в ряде случаев прочность на растяжение при изгибе и на сжатие (при использовании высокомодульных волокон), трещиностойкость, а также частично компенсировать усадочные деформации. Помимо перечисленных выше достоинств, фибробетонам присущ ряд недостатков:

- отсутствие единого подхода к назначению дозировок фибры;
- трудности с перемешиванием волокон в процессе изготовления;

- неравномерность распределения фибры в теле бетона;
- слабое сцепление бетонной матрицы с волокном, в следствие чего возникает эффект «карандаша в стакане»;
- низкая коррозионная стойкость некоторых типов волокон в щелочной среде;
- несовершенство нормативно-правовой базы, регламентирующей применение фибробетона.

Установлено, что использование волокон в качестве дисперсного армирования напрягающего бетона повышает прочностные и деформационные характеристики [7–11]. При этом, возникающее в результате расширения обжатие волокон обеспечивает достаточное сцепление бетона с фиброй.

Авторами [12–20] отмечено, что использование нескольких типов волокон (полиармирование) позволяет получать бетоны с более высокими прочностными и деформационными характеристиками, по сравнению с моноармированием. Следующим развитием дисперсного полиармирования в бетонах стало многоуровневое армирование.

Концепция многоуровневого дисперсного армирования заключается в выборе типа и размера волокон согласно иерархичности структур бетонного композита (макро-, мезо-, микро- и субмикроуровень) [16–20].

Использование способа многоуровневого армирования в напрягающем бетоне [20] одновременно решает несколько задач:

- при равномерном распределении по объёму макрофибра, подверженная обжатию расширяющейся бетонной матрицей, создает прочный каркас, способный компенсировать спады прочности и усадку как в раннем, так и в позднем возрасте бетона;
- микроволокно служит для усиления бетонной матрицы в транзитной зоне с заполнителем (рисунок 1).

Применение волокон заданных размеров и жесткости способствует развитию синергетического эффекта, который проявляется в увеличении прочности на сжатие и на растяжение при изгибе, и достижении требуемых деформационных характеристик, что позволяет получать напрягающие высокоэффективные фибробетоны с повышенной долговечностью и эксплуатационной надежностью.



1 – стальная фибра; 2– полипропиленовая фибра

Рисунок 1. – Внутренняя структура напрягающего бетона с многоуровневым армированием

2. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений дисперсно-армированного напрягающего бетона.

С точки зрения обеспечения долговечности и надежности возможность регулирования собственных деформаций и напряжений напрягающего фибробетона является основной задачей.

Предложенные до настоящего времени модели определения собственных деформаций и напряжений основаны на деформационном подходе и рассматривают случаи одноосное и двухосное ограничение.

Однако для рассматриваемой задачи характерно объемное преднапряженное состояние, обусловленное равномерным распределением волокон в теле напрягающего бетона. Данная особенность позволила разработать модифицированную деформационную модель, которая рассматривает напрягающий фибробетон в виде шара из расширяющегося бетонного ядра и покрывающей его однородной оболочки постоянной толщины, состоящей из материала фибры. Предложенная модель позволяет прогнозировать собственные деформации и напряжения напрягающего фибробетона на стадии расширения.

В лаборатории «Самонапряженные конструкции» на базе Брестского государственного технического университета были проведены экспериментальные исследования, позволившие подтвердить высказанные ранее гипотезы и верифицировать предложенную модель. Полученные результаты показали хорошую сходимости на фоне экспериментальных данных [20–22].

Заключение. Многоуровневое дисперсное армирование способно повысить прочностные и деформационные характеристики напрягающего бетона при достижении заданных показателей самонапряжения, что значительно расширяет возможности их применения.

Предложенная модифицированная деформационная модель является альтернативой существующим эмпирическим зависимостям, требующим проведения сложных и длительных экспериментальных исследований, что позволяет существенно снизить материальные и временные затраты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тур, В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного. напряжения конструкций при применении напрягающего бетона : монография. – Брест : БрПИ, 1998. – 246 с.
2. Михайлов, В. В., Литвер, С. Л. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции. – М.: Стройиздат, 1974. – 389 с.
3. Ito, H., Maruyama, I., Tanimura, M., Sato, R. Early age deformation and resultant induced stress in expansive high strength concrete // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2004. – No. 2. – P. 155–174. <https://doi.org/10.3151/jact.2.155>.
4. Тур, В. В., Семенюк, О. С. К оценке величины самонапряжения в конструкциях из напрягающего бетона // *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2014. – № 1. – С. 16–24.
5. Санникова, О. Г., Тур, В. В. Верификация расчетной модели для определения связанных деформаций и напряжений плоских элементов из напрягающего бетона // *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2020. – № 1. – С. 86–92.
6. Sannikava, V., Tur, V. The modified early age strains development model for the case of two-way restraint conditions // *MATEC Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 350. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202135000010>.
7. Sugathan, A. Self-Compacting High Performance Concrete with Steel Fibres // *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*. – Vol. 4, No. 6, June 2016. – P. 35–40.
8. Suta, M., Lukasenoks, A., Cepuritis, R. Determination of material design values for Steel Fibre Reinforced Self-Stressing Concrete (SFRSSC) structures // *Engineering for rural development*. – 2020. – P. 631–637 <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF142>.

9. Wang, B., Fang, R., Wang, Q. Flexural Behavior of Fiber-Reinforced Self-Stressing Concrete T-Shaped Composite Beams // *Advances in Civil Engineering*. – 2020. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2020/8810440>.
10. Abid, S. R., Ali, S. H., Goiaz, H. A., Al-Gasham, T. S., Kadhim, A. L. Impact resistance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete // *Magazine of Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 5, № 105. <https://doi.org/10.34910/MCE.105.4>.
11. Елсуфьева, М. С., Соловьев, В. Г., Бурьянов, А. Ф. Применение расширяющихся добавок в стале-фибробетоне // *Строительные материалы*. – 2014. – № 8. – С. 60-63.
12. Karim R., Shafei B. Ultra-high performance concrete under direct tension: Investigation of a hybrid of steel and synthetic fibers // *Structural Concrete*. – 2023. <https://doi.org/10.1002/suco.202200830>.
13. Kazemian M, Shafei B. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concretes made with low dosages of synthetic fibers // *Structural Concrete*. – 2023. – Vol. 1, No. 24. – P. 1226-1243. <https://doi.org/10.1002/suco.202100915>.
14. Vairagade, V., Dhale, Sh. Hybrid fibre reinforced concrete – A state of the art review // *Hybrid Advances*. – 2023. – Vol. 3. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100035>.
15. Shi, F., Pham, T. M., Hao, H., Hao, Y. Post-cracking behaviour of basalt and macro polypropylene hybrid fibre reinforced concrete with different compressive strengths // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120108>.
16. Панченко, Л. А., Юрьев, А. Г. Многоуровневое армирование конгломератов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. – 2017. – № 1. – С. 57-59. <http://dspace.bstu.ru/jspui/handle/123456789/1202>.
17. Пухаренко, Ю. В., Пантелеев, Д. А., Жаворонков, М. И. Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера // *Сборник научных трудов SWorld*. – 2013. – Т. 43, № 1. – С. 60-64.
18. Коротких, Д. Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетонов для повышения их вязкости разрушения // *Вестник гражданских инженеров*. – 2009. – Т. 20, № 3. – С. 126-128.
19. Чернышов, Е. М., Макеев, А. И. Типы подструктур в целостной полиструктуре бетона и закономерности формирования параметров поля напряжений в композите (к развитию теории конструирования и синтеза структур конгломератных строительных композитов) // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : Сб. науч. тр. РААСН: в 2 т. / сост. и отв. ред. Г. И. Рогунова ; Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН)*. – М. : АСВ, 2021. – Т. 2. – С. 304-314.
20. Павлова, И.П. Многоуровневое дисперсное армирование напрягающего бетона / И.П. Павлова, И.В. Белкина // *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. – 2022. – С. 103–118.
21. Павлова, И.П., Белкина И.В. Собственные деформации напрягающего бетона с дисперсным армированием: часть 1. Моделирование // *Известия вузов. Строительство*. – 2022. – №9. – С. 5-17.
22. Павлова, И.П. Верификация модифицированной деформационной модели напрягающего фибробетона на фоне экспериментальных исследований / И.П. Павлова, И.В. Белкина, А.А. Лизогуб // *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка*. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 74-87.