

УДК 691.328.43:624.012.45

ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯГАЮЩЕГО СТАЛЕФИБРОБЕТОНА НА ЖИВУЧЕСТЬ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Лизогуб, И.В. Лизогуб, И.П. Павлова

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

e-mail: p_332_14lizogub@mail.ru, lutaja-95@mail.ru, pavlinna@tut.by

В статье представлены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик напрягающего фибробетона. Установлено, что введение фибры повышает диссипативные свойства напрягающего бетона. Выполнены параметрические исследования влияния прочностных и деформационных характеристик напрягающего сталефибробетона на живучесть фрагмента железобетонной каркасной конструктивной системы.

Ключевые слова: *напрягающий сталефибробетон, каркасные системы, живучесть, диссипация, пластическая деформативность.*

THE INFLUENCE OF STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF STEEL FIBER REINFORCED SELF-STRESSING CONCRETE ON THE ROBUSTNESS OF THE STRUCTURAL SYSTEM

A. Lizogub, I. Lizogub, I. Paulava

Brest State Technical University, Brest, Belarus

e-mail: p_332_14lizogub@mail.ru, lutaja-95@mail.ru, pavlinna@tut.by

The article presents the results of experimental studies of the strength and deformation characteristics of fiber reinforced self-stressing concrete. It was found that the addition of fiber increases the dissipative properties of the self-stressing concrete. Parametric studies of the influence of the strength and deformation characteristics of self-stressing steel fiber concrete on the robustness of a reinforced concrete frame structural system have been performed.

Keywords: *steel fiber reinforced self-stressing concrete, frame systems, robustness, dissipation, plastic deformability.*

Введение. На сегодняшний день живучесть конструктивных систем является одним из определяющих фактором при проектировании безопасных зданий и сооружений. Данное свойство напрямую связано с пластической деформативностью и способностью к рассеиванию энергии поврежденной конструктивной системы. Существующие экспериментально-теоретические исследования фрагментов железобетонных конструктивных систем подтверждают наличие зарезервированных механизмов сопротивления прогрессирующему обрушению, которые позволяют реализовать альтернативные траектории передачи нагрузок. Авторами [1–5] установлено, что при достаточной пластической деформативности и диссипативности конструкций процесс прогрессирующего обрушения прекращается, а поврежденная система стабилизируется, что свидетельствует о достаточной живучести.

Исследования [6], [7] показали, что добавление дисперсного армирования в виде фиброволокон повышает диссипативные свойства напрягающих и высокопрочных бетонов и конструкций из них.

Таким образом, для моделирования реакции каркасных железобетонных конструкций после реализации особой нагрузки и локального отказа ключевого элемента необходимо учи-

тывать все возникающие и развивающиеся механизмы сопротивления, как на уровне работы системы, так и на уровне работы материалов.

Целью данного исследования является оценка диссипативных свойств железобетонных конструктивных систем из напрягающего фибробетона. Для этого необходимо было выполнить экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик напрягающего фибробетона, а затем с помощью параметрических исследований оценить их влияние на живучесть железобетонных каркасных систем.

1. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик напрягающего фибробетона. Первоочередной задачей являлось определение рабочих составов напрягающего фибробетона и соответствующих им прочностных и деформационных свойств. Составы, принятые в качестве рабочих, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Составы напрягающего фибробетона

| Шифр состава | Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси | | | | | | В/Вяз |
|--------------|--|--------|-------------|-------------------|-----------|------------------|-------|
| | Заполнители, кг | | Вязущее, кг | Вода, л | Фибра, кг | | |
| | Песок | Щебень | | Пластификатор, кг | Стальная | Полипропиленовая | |
| НБО | 850 | 890 | 480 | 184,6 | – | – | 0,39 |
| НБМ | | | | 3,6 | 40 | – | |
| НБП | | | | 40 | 3 | | |

Для экспериментальных исследований характеристик каждого состава были изготовлены серии образцов:

- образцы-цилиндры размерами 150×300 мм для определения реакции деформирования «σ–ε» материала при осевом сжатии в жестком режиме нагружения (с контролем перемещений)
- образцы-кубы размерами 100×100×100 мм для определения прочности на сжатие;
- образцы-призмы размером 50×50×200 мм для определения прочности на растяжение при изгибе;
- образцы-призмы размером 50×50×200 мм в динамометрических кондукторах для определения величины самонапряжения неармированного напрягающего бетона;
- образцы-призмы размером 50×50×200 мм по методике, изложенной в работе [8], для определения зависимости собственных деформаций от времени для составов НБМ и НБП.

Методика изготовления и испытания опытных образцов из напрягающего бетона более подробно представлена в работе [8].

Для количественной оценки диссипативных свойств бетона в работе была принята энергия разрушения образцов при осевом сжатии [9; 10], которая может быть представлена в виде произведения объема образца V_c и определенного интеграла функции кривой деформирования бетона $\sigma = f(\epsilon)$.

В результате испытаний образцов-цилиндров на осевое сжатие для исследуемых составов (НБО, НБМ, НБП) были получены соответствующие нормализованные диаграммы деформирования σ – ϵ , основные характеристики которых и результаты их анализа представлены в таблице 2.

В экспериментах установлено отличие характера разрушения образцов с дисперсным армированием НБМ, НБП и характера разрушения обычного образца НБО. Данное отличие наиболее выражено в величине удельной энергии разрушения нисходящей ветви диаграмм деформирования U_{n2} . Как видно из таблицы 2 величина параметра U_{n2} для образцов НБМ, НБП на 40 % превышает соответствующее значение для образца НБО. Полная удельная энер-

гия деформирования U_n образцов НБМ, НБП выше на 21 % и 25 % соответственно по сравнению с контрольным неармированным образцом НБО. Был зафиксирован прирост удельной энергии разрушения восходящей ветви U_{n1} на 7 % для образца с дисперсным полиармированием НБП по сравнению с остальными образцами.

Таблица 2 – Основные результаты

| Шифр состава | Напряжения | Относительные деформации | | Нормализованные отн. деф | | Удельная энергия разрушения | | |
|--------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------|-------|
| | σ_c' , МПа | ε_{c1} , мм/мм | ε_{c2} , мм/мм | $\varepsilon_{c2} / \varepsilon_{c1}$ | $\varepsilon_{c3} / \varepsilon_{c1}$ | U_{n1} | U_{n2} | U_n |
| НБО | 29,8 | 0,00186 | 0,0043 | 2,31 | 2,5 | 0,60 | 0,68 | 1,28 |
| НБМ | 32,3 | 0,00184 | 0,0032 | 1,74 | 2,5 | 0,60 | 0,95 | 1,55 |
| НБП | 32,3 | 0,00210 | 0,0039 | 1,86 | 2,5 | 0,64 | 0,96 | 1,60 |

По результатам экспериментальных исследований установлены величины средних прочностей на сжатие и на растяжение напрягающего бетона с полиармированием (серия НБП) превышают соответствующие величины состава с моноармированием (серия НБМ). На 28-е сутки для образцов серии НБП по сравнению с образцами НБМ в среднем наблюдалось превышение прочности на сжатие на 9,6 %, а прочности на растяжение на 22,2 %. В то же время средняя величина собственных деформаций расширения на 28 сутки для образцов серии НБП была ниже по сравнению с образцами НБМ на 22,4 %.

2. Параметрические исследования. Объект параметрических исследований. Описание численной модели. В качестве объекта численного моделирования рассматривается фрагмент железобетонной каркасной конструктивной системы, который представляет собой двух пролетную раму с удаленной в результате реализации особого воздействия центральной колонной. Общий вид, геометрические размеры и схема армирования рассматриваемого фрагмента представлены на рисунке 1а.

Моделирование конструктивной системы выполнено по методу, изложенному в работе [11], который позволяет в рамках нелинейного квазистатического расчета при жестком режиме нагружения определить реакцию «нагрузка–перемещение» поврежденной конструктивной системы с одной степенью динамической свободы с учетом действия цепных (мембранных) эффектов и, опираясь на положения энергетического баланса системы [11], определить её динамическую реакцию при внезапном удалении ключевого элемента на первом полупериоде колебаний. Данный метод позволяет выполнить количественную оценку живучести поврежденной конструктивной системы.

Расчетная схема железобетонной рамы с врезанными пластическими шарнирами по приведенным в [11] правилам показана на рисунке 1б. Фрагменты колонн и балки рамы моделируются стержневыми линейно-упругими конечными элементами. Узлы сопряжения колонн с балками представляют собой жесткие вставки. В области сопряжения балок с колоннами в стержневые конечные элементы врезаны точечные пластические шарниры изгиба и осевые пластические шарниры (рисунок 1б).

В работе проведены две серии параметрических исследований влияния характеристик напрягающего сталефибробетона на живучесть конструктивной системы. В обеих сериях расчетов в качестве переменного параметра выступили диаграммы деформирования напрягающего сталефибробетона.

Данная постановка параметрических исследований позволит более корректно обосновать влияние диссипативных свойств бетона на глобальную реакцию конструктивной системы в особой расчетной ситуации.

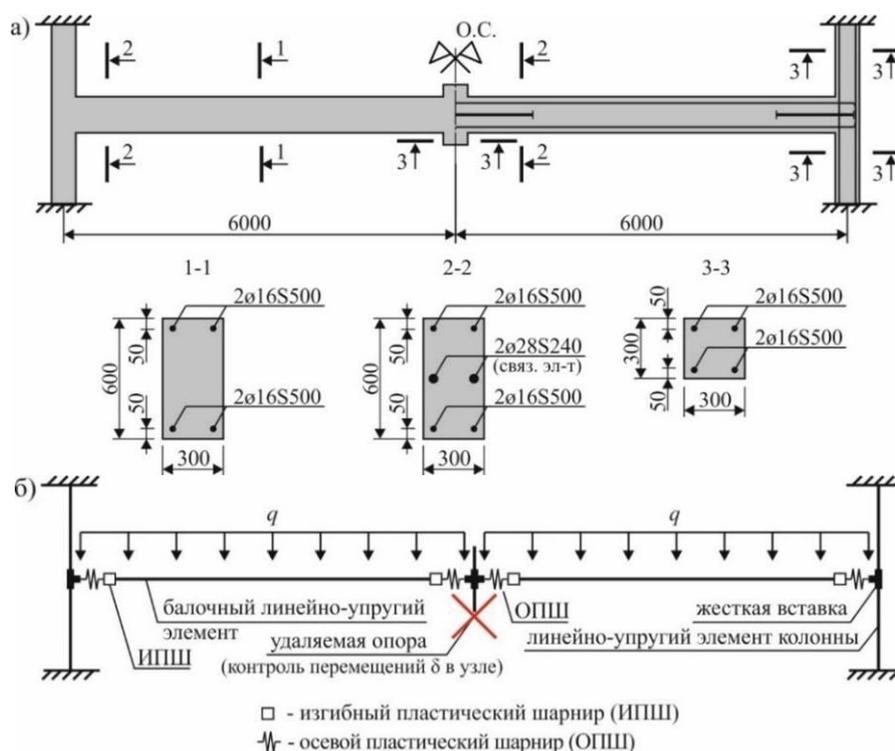


Рисунок 1. – Фрагмент рамного каркаса

При выполнении нелинейных расчетов в рамках оценки живучести значения параметрических точек диаграмм, описывающих пластические шарниры, определяются при средних значениях характеристик материалов (бетона, рабочей арматуры и связевых элементов).

Результаты расчета квазистатических и динамических реакций сопротивлений для рассматриваемых железобетонных рам с учетом развития мембранных эффектов при сценарии удаления центральной колонны сведены в таблицу 3.

Таблица 3. – Основные результаты численного моделирования

| Серия/ образец | Первое пиковое квазистат. сопр. | Квазистат. сопр. соотв. δ_u | Предельный прогиб | Усл. энергия де- формирования мод. системы | Динамич. сопр. системы соотв. δ_u | Макс. динамич. сопр. системы |
|-------------------|--|--|----------------------|--|--|---------------------------------------|
| | q_1 , кН/м | q_u , кН/м | δ_u , мм | E_{int} , кН | $q_{d,u}$, кН/м | $q_{d,max}$, кН/м |
| 1/1 | 28,32 | 23,77 | 665,3 | 13,50 | 20,27 | 22,23 |
| 1/2 | 27,94 | 23,98 | 664,7 | 13,22 | 19,88 | 22,13 |
| 1/3 | 27,50 | 23,79 | 660,7 | 12,73 | 19,26 | 21,88 |
| 2/1 | 27,94 | 23,98 | 664,7 | 13,22 | 19,88 | 22,13 |
| 2/2 | 39,07 | 25,87 | 666,3 | 17,91 | 26,88 | 26,88 |

Примечание. – 1) энергия деформирования E_{int} получена как площадь под кривой квазистатического сопротивления « $q_{st}-\delta$ » для каждого случая на соответствующем предельном перемещении δ_u ;
2) предельное динамическое сопротивление $q_{d,u}$ получено из выражения $q_{d,u} = E_{int} / \delta_u$.

Как видно из результатов численного моделирования рам серии 1 увеличение величины предельного сопротивления сжатию f_c' напрягающего сталефибробетона (т.е. повышение класса бетона) при постоянной величине удельной энергии деформирования материала U_n практически никак не влияет на общую реакцию поврежденной каркасной системы в особой

расчетной ситуации. При анализе графиков динамического сопротивления установлено, что большее динамическое сопротивление наблюдается в раме из бетона с более низким предельным сопротивлением сжатию f'_c , но с более высоким значением предельных относительных деформаций ε_{cu} . Другими словами, при одной и той же удельной энергии разрушения материала U_n положительным образом на динамическое сопротивление (живучесть) поврежденной конструктивной системы играет не повышение класса бетона, а повышение его пластической деформативности, например, за счет дисперсного армирования.

Параметрические исследования рам серии 2 показывают, что при одинаковом предельном сопротивлении сжатию f'_c (одинаковом классе по прочности) при повышении энергии разрушения материала U_n (т.е. пластической деформативности) можно увеличить динамическое сопротивление рассматриваемой системы. Так при увеличении ε_{cu} в 2 раза (с 0,0035 мм/мм для образца 2/1 до 0,0070 мм/мм для образца 2/2) энергия разрушения бетона U_n увеличилась в 2.2 раза, а динамическое сопротивление, соответствующее максимальному вертикальному перемещению δ_u увеличилось на 35 % (таблица 3).

Заключение. Выполнены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния образцов из напрягающего бетона с различным типом дисперсного армирования и без армирования при центральном сжатии. Полученные результаты свидетельствуют о повышении пластической деформативности и способности к рассеиванию (диссипации) энергии дисперсно-армированного напрягающего бетона, что может быть использовано в рамках стратегии многоуровневого проектирования диссипативных конструктивных систем в особых расчетных ситуациях.

Параметрические исследования двух серий образцов позволяют сделать вывод, что на живучесть поврежденной системы на уровне работы материалов оказывает влияние пластическая деформативность напрягающего сталефибробетона. Повышение пластической деформативности позволяет конструктивной системе более эффективно рассеивать энергию, что предотвращает развитие упругих колебаний и способствует более плавному переходу работы системы в стадию развития мембранных эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yi, Wei-Jian. Progressive collapse performance of RC flat plate frame structures / Yi Wei-Jian, Zhang Fan Zhen, S. K. Kunnath // Journal of Structural Engineering. – 2014. – Vol. 140, No. 9. – Art. 04014048 (10 p).
2. Fedorova, N. V. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage – an analytical review / N. V. Fedorova, S. Yu. Savin // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 3. – С. 76–108.
3. Load transfer and collapse resistance of RC flat plates under interior column removal scenario / Xue Huizhong [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2018. – Vol. 144, No. 7. – Art. 04018087.
4. Experimental investigation of RC beam-slab substructures against progressive collapse subject to an edge-column-removal scenario / Lu Xinzhen [et al.] // Engineering Structures. – 2017. – Vol. 149. – Pp. 91–103.
5. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований / В. И. Колчунов [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 3. – С. 31–71.
6. Research on energy dissipation and damage evolution of dynamic splitting failure of basalt fiber reinforced concrete / Xie Huanzhen [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 330. – Art. 127292.
7. Savin, S. Specific energy absorbed by fiber-reinforced concrete under static and dynamic loading / S. Savin, M. Sharipov // International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2023) / ed. by A. A. Rodionov [et al.]. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – Pp. 143–151. (Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE) ; vol. 400).
8. Павлова, И. П. Верификация модифицированной деформационной модели напрягающего фибробетона на фоне экспериментальных исследований / И. П. Павлова, И. В. Белкина, А. А. Лизогуб // Вест-

- ник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 74–87.
9. The energy analysis of concrete failure in structural engineering / Liu Tingquan [et al.] // International Conference on Risk and Engineering Management (REM), 2011 / ed. by Wu Desheng Dash. – 2011. – Pp. 106–111. – (Systems Engineering Procedia ; vol. 1).
10. Радайкин, О. В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение / О. В. Радайкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2019. – №. 10. – С. 29–39.
11. Тур, В. В. Проверка живучести конструктивных систем из сборного железобетона по методу энергетического баланса / А. В. Тур, А. А. Лизогуб // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 8. – С. 1015–1033.