

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
СЕЙСМОУСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЯДЕР ЖЕСТКОСТИ  
СИСТЕМОЙ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ УГЛЕВОЛОКНА**

**EXPERIMENTAL STUDY OF SEISMIC REINFORCEMENT  
OF THE REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTION  
BY EXTERNALLY BONDED FRP SYSTEMS**

*Г.П. ТОНКИХ, А.В. ГЛАГОЛЕВ, Р.А. БУЗИН, И.А. ПАВЛЕНКО, П.В. ОСИПОВ  
G.P. TONKIKH, A.V. GLAGOLEV, R.A. BUZIN, I.A. PAVLENKO, P.V. OSIPOV*

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
ООО "Нанотехнологический центр композитов")  
(Moscow State University of Civil Engineering, Nanotechnology Center of Composites)  
E-mail: 5059144@mail.ru, posipov@nccrussia.com

*Выполнены исследования влияния системы внешнего армирования композитными материалами на основе углеволокна на несущую способность конструкций ядер жесткости, выполненных из монолитного железобетона, при действии сейсмических нагрузок. Определен механизм работы усиленных образцов и выявлены основные конструктивные требования, позволяющие повысить сейсмостойкость. Представлена модель расчета несущей способности железобетонной конструкции ядра жесткости, усиленного композитными материалами на основе углеволокна.*

*Investigated the influence of the external reinforcement system by composite materials based on carbon fibers on the carrying capacity of stiffening cores construction made from reinforced concrete under seismic loading. Defined the mechanism of working of the reinforced samples and identified basic construction requirements, which helps increase seismic stability. There is a model of calculation of the bearing capacity of reinforced concrete stiffening cores reinforced composite materials.*

**Ключевые слова:** железобетон, сейсмоусиление, внешнее армирование, углеродные волокна.

**Keywords:** reinforced concrete, seismic reinforcement, external reinforcement, carbon fiber.

В настоящее время у нас в стране и за рубежом накоплен большой опыт применения композитных материалов на основе углеволокна с использованием свода правил [3], устанавливающим основные требования по проектированию усиления или восстановления железобетонных конструкций. В то же время вопросы, связанные со схемами и методами усиления композитными материалами при сейсмоусилении зданий и сооружений, проработаны не в полной мере. Кроме того, до конца не изучены безопасность восстанавливаемых зданий с изменяющейся конструктивной схемой несущих систем и физической нелинейностью

материалов [4...7]. В связи с этим целью данной работы является экспериментально-теоретическое исследование новых способов усиления железобетонных конструкций с использованием системы внешнего армирования на основе углеволокна с разработкой расчетной модели, позволяющей оценить несущую способность конструкций после усиления.

Выбор конструктивного решения опытных фрагментов зданий из монолитного железобетона основан на анализе результатов выполненной в 2011-2012 гг. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) работы по оценке фак-

тической сейсмостойкости более 2000 зданий и сооружений объектов МЧС России [10], расположенных в районах с сейсмичностью от 6 до 10 баллов. На основании проведенного анализа установлено, что сейсмостойкость большинства зданий и сооружений, выполненных из монолитного железобетона, каркасных и панельных конструкций, возводимых, в том числе из монолитного железобетона, обеспечивается в основном за счет ядер жесткости.

Для оценки влияния усиления системой внешнего армирования на основе углеволокна, в рамках данной работы, был принят опытный фрагмент, являющийся аналогом монолитного железобетонного ядра жесткости в виде лифтовой шахты или лестничной клетки в зданиях, возводимых в районах с сейсмичностью до 10 баллов. Всего были испытаны три фрагмента 2-этажных ядер жесткости, изготовленных в масштабе 1:3, из которых два фрагмента были усилены системой внешнего армирования из композитных материалов на основе углеволокна. Расчет и конструирование образцов выполняли с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР для сейсмической нагрузки 7 баллов. Варианты усиления разработаны в соответствии с рекомендациями [2], [8], [9].

Вертикальные несущие конструкции опытных фрагментов толщиной 60 мм, а также два перекрытия толщиной по 100 мм каждое выполнялись из монолитного бетона класса В25. Армирование опытных фрагментов осуществлялось двумя армосетками по внешней и внутренней граням конструк-

ций из арматуры класса А400 диаметром 6 мм, установленной с шагом 200 мм, согласно требованиям [3]. В стенах, перпендикулярных действию нагрузки, были выполнены по два проема на каждом этаже. Усиление опытного фрагмента № 2 выполнялось наклейкой двунаправленной сетки FibArm Grid HS 600/1000 со специальной пропиткой, с помощью ремонтного состава FibArm Repair FS по всей наружной поверхности, с обрезом сетки у основания образца. Фрагмент № 3 усиливался двунаправленными тканями FibArm Tape-450 также по всей поверхности образца. Нахлест сеток и тканей составлял не менее 200 мм. При усилении опытных фрагментов применяли углеродные анкерные жгуты FibArm Anchor, выведенные на внутренние грани конструкции через отверстия в образце и зафиксированные на клеевом составе.

Учитывая результаты испытаний второго фрагмента, в опытном фрагменте № 3 была дополнительно выполнена анкеровка наклеиваемого материала у основания, которая обеспечивалась с помощью железобетонного пояса высотой 200 мм. Армирование пояса выполнялось Г-образными выпусками арматуры, приваренными к швеллерам основания с шагом 150 мм и горизонтальными арматурными анкерами диаметром 8 мм, установленными в стены образца с шагом 150 мм (рис. 1 – схема анкеровки углеродного волокна опытных фрагментов №2 и №3). Крепление образцов к силовому полу испытательной установки осуществлялось сваркой, что обеспечивало жесткое защемление конструкции.

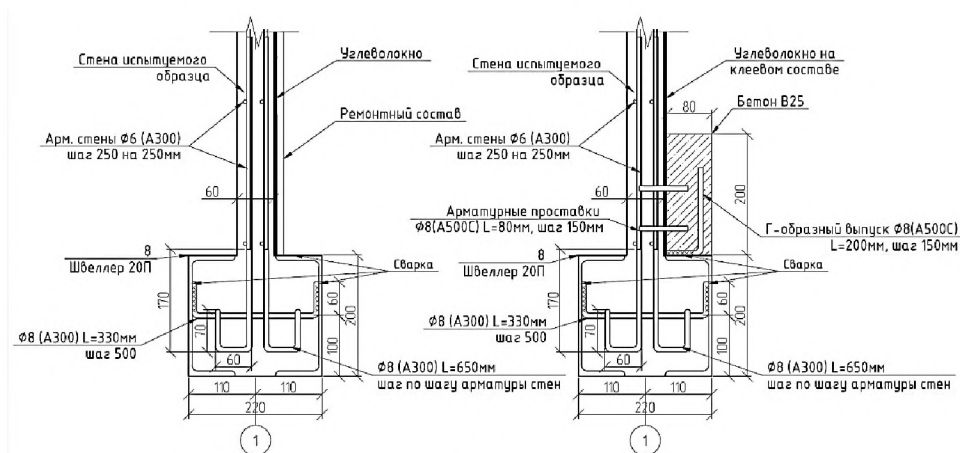


Рис. 1

Нагружение опытных фрагментов осуществляли горизонтальной нагрузкой, приложенной в уровне перекрытия первого этажа, моделирующей действие горизонтальной сейсмической нагрузки [1] на здание в реальных условиях. Нагружение осуществляли в испытательном стенде, представляющим собой силовую раму с гидроцилиндром, оснащенный индуктивным датчиком перемещения типа LVDT и датчиком силоизмерительным тензорезисторным (модель MTS/661.31F-01) ступенями по 10,0 кН. После достижения заданного уровня нагрузки на каждой ступени нагружения осуществлялась выдержка образца под нагрузкой до стабилизации показаний датчика перемещений гидроцилиндра, после чего производился осмотр образца для

фиксации трещин, а также записи показаний индикаторов перемещений в уровне приложения нагрузки и в верхних контрольных точках. Для определения перемещений контрольных точек в уровне приложения нагрузки применялись электронные индикаторы перемещений типа ИЦ (Micron) с диапазоном измерений 0...50 мм, с ценой деления 0,01 мм, с погрешностью измерений 0,03 мм. Для определения перемещений верхней части образца применяли электронный тахеометр Sokkia CX105. Маркировку контрольных точек выполняли в виде пленочных геодезических марок, обозначенных "Т1" и "Т2". Стрелкой с обозначением "ГЦ" указано место и направление приложения нагрузки (рис. 2 – схема испытаний. Общий вид испытаний).

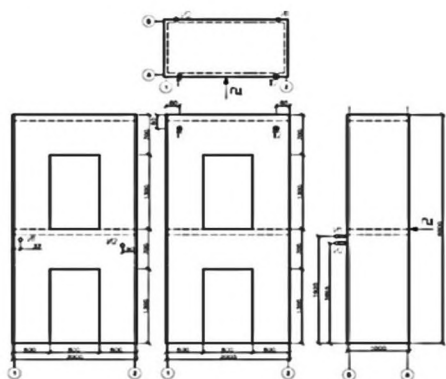


Рис. 2

Проведенные испытания показали, что разрушение первого опытного фрагмента без усиления сопровождалось образованием горизонтальных трещин по наружной грани стены фрагмента, перпендикулярной приложению нагрузки и наклонных трещин на стенах, параллельных приложению нагрузки в области нижней половины пер-

вого этажа. С ростом нагрузки происходило увеличение количества трещин, вплоть до разрушения, при нагрузке  $P=18,5$  т (рис. 3-а, характер разрушения опытного фрагмента №1). При данной нагрузке перемещения образца составили в средней части 34,0...37,0 мм и в верхней части 67,0...69,0 мм.

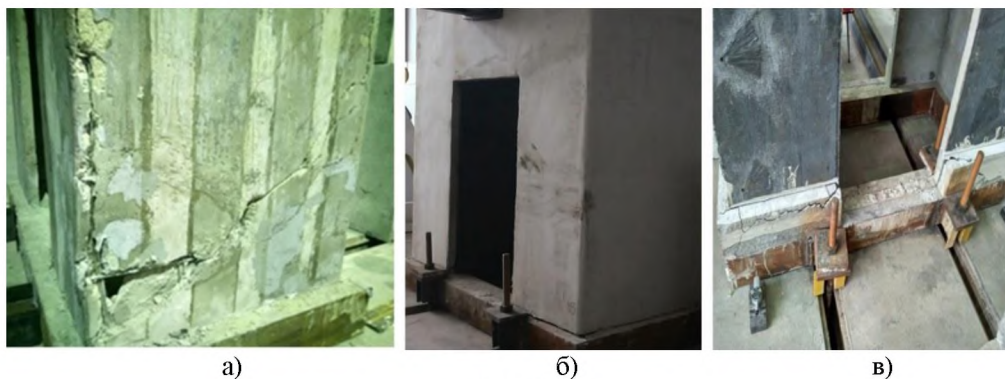


Рис. 3

При нагружении второго опытного фрагмента трещины начинали образовываться по наружной грани стены, перпендикулярной приложению нагрузки, и на стенах, параллельных приложению нагрузки. С ростом нагрузки наиболее интенсивно происходил рост трещины у основания фрагмента вдоль силового контура стены, перпендикулярной приложению нагрузки. Увеличение ширины раскрытия трещины у основания фрагмента и последующее разрушение фрагмента в данном сечении при нагрузке, равной  $P=15,0$  т, произошло из-за отсутствия усиления в зоне действия максимального изгибающего момента и соответственно снижения жесткости в данном сечении (рис. 3-б, характер разрушения опытного фрагмента №2). Кроме этого, внешнее армирование композитным материалом привело к резкому снижению количества трещин в стенах фрагмента и одновременно к концентрации напряжений в слабом, неусиленном сечении у основания. Перемещения усиленного фрагмента при разрушающей нагрузке не отличались от эталонного фрагмента и составили в средней части 34,0...35,0 мм и в верхней части 69,0 мм.

В процессе нагружения третьего фрагмента в зоне действия максимального изгибающего момента включается в работу дополнительный железобетонный пояс, который обеспечивает достаточное сцепление системы внешнего армирования с бетоном. Разрушение образца произошло в верхнем сечении дополнительного железобетонного пояса при нагрузке  $P=23,0$  т, что на 25% превышает несущую способность эталонного фрагмента (рис. 3-в, характер разрушения опытного фрагмента №3). При этом перемещения при разрушающей нагрузке составили в средней части 26,5...27,0 мм и в верхней части 62,0...65,0 мм, что свидетельствует о повышении общей жесткости образца при его усилении системой внешнего армирования.

Для расчетной оценки влияния усиления композитными материалами на основе углеволокна на несущую способность железобетонных ядер жесткости разработаны расчетные модели в программном комп-

лексе ЛИРА-САПР, позволяющие сопоставить теоретические расчеты с результатами проведенных испытаний.

В расчетных моделях усиление фрагментов учитывалось повышением процента армирования при задании жесткости конечных элементов. Процент армирования увеличивался пропорционально за счет усиления образца системой внешнего армирования углеволокном. При моделировании опытных фрагментов без анкерной системы внешнего армирования у основания (образец №2) повышалась жесткость всех конечных элементов, кроме ряда нижних конечных элементов. При моделировании фрагмента с анкерной системы внешнего армирования за счет устройства дополнительного железобетонного пояса (образец №3) была повышена жесткость всех конечных элементов. Изополя главных растягивающих напряжений и характер разрушения расчетных моделей показаны на рис. 4 (изополя напряжений опытных фрагментов №1, 2, 3 при нагрузке 18,5; 15 и 23 тонны соответственно).

В расчетной модели первого эталонного фрагмента после приложения фактической разрушающей нагрузки  $P=18,5$  т на стенах, параллельных горизонтальной нагрузке, образовалась область пластических шарниров, которая совпадает с областью образования трещин в образце при проведении испытаний (рис. 4-а – изополя напряжений и расчетный характер разрушения опытного фрагмента №1, кг·см<sup>2</sup>).

В расчетной модели второго опытного фрагмента при нагрузке  $P=15,0$  т пластические шарниры образовались в нижнем ряду конечных элементов стены, перпендикулярной горизонтальной нагрузке, что отражает фактическую картину разрушения фрагмента – по сечению без усиления у основания образца (рис. 4-б – изополя напряжений и расчетный характер разрушения опытного фрагмента №2, кг·см<sup>2</sup>). Важно отметить, что данная схема усиления, без анкерной системы внешнего армирования у основания, дала отрицательный эффект – разрушающая нагрузка оказалась меньше на 20%, чем у эталонного фрагмента.

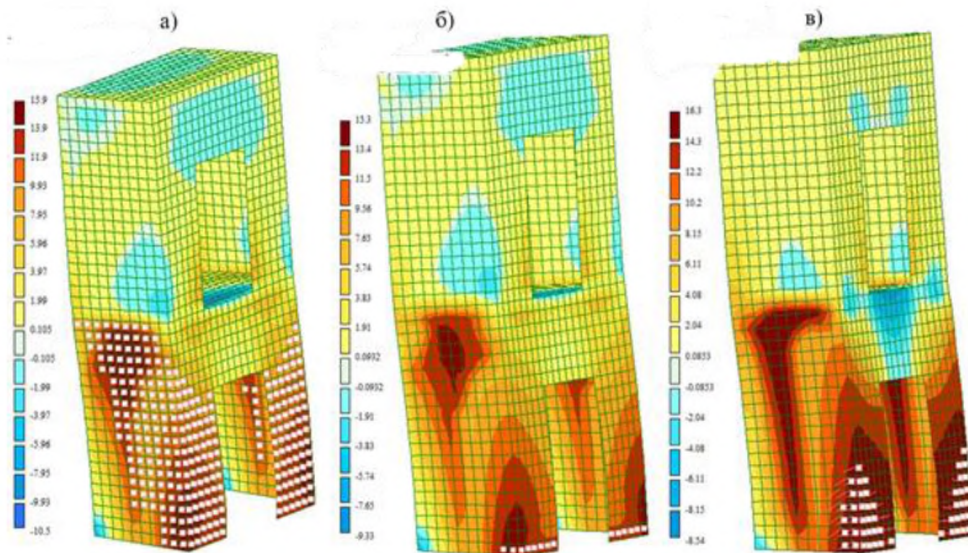


Рис. 4

В расчетной модели третьего опытного фрагмента с анкерной системой внешнего армирования у основания с помощью дополнительного железобетонного пояса характер возникновения пластических шарниров идентичен эталонному фрагменту. Однако область пластических шарниров значительно меньше, что может свидетельствовать о повышении несущей способности образца в целом (рис. 4-в – изополя напряжений и расчетный характер разрушения опытного фрагмента №3, кг·см<sup>2</sup>). Аналогичный эффект был получен и при проведении испытаний – фактическая разрушающая нагрузка составила  $P=23,0$  т, что оказалось выше на 25%, чем у эталонного фрагмента.

## ВЫВОДЫ

1. Разрушение эталонного опытного фрагмента ядра жесткости из монолитного железобетона при действии горизонтальной нагрузки произошло от среза железобетонного наклонного сечения боковых стен при горизонтальной нагрузке, равной 18,5 т.

2. Усиление опытного фрагмента двуправленными сетками FibArm Grid HS 600/1000 со специальной пропиткой на ремонтном составе FibArm Repair FS без обеспечения анкерной системы внешнего армирования у основания привело к снижению разрушающей нагрузки до  $P=15,0$  т.

Снижение вызвано отсутствием усиления в зоне действия максимального изгибающего момента, концентрации напряжений в слабом, не усиленном, сечении и соответственно снижением жесткости в данном сечении.

3. Усиление опытного фрагмента двуправленными тканями FibArm Tape - 450, наклеенными при помощи двухкомпонентного эпоксидного клея FibArm Resin 530+, совместно с устройством дополнительного железобетонного пояса высотой 200 мм, обеспечивающим анкерную систему внешнего армирования у основания фрагмента, привело к повышению разрушающей нагрузки до  $P=23,0$  т, что на 25% выше несущей способности эталонного фрагмента.

4. Предложенный алгоритм расчета монолитных ядер жесткости, за счет увеличения процента армирования, при усилении системой внешнего армирования на основе углеволокна с достаточной для практических расчетов точностью может проводиться с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР.

## ЛИТЕРАТУРА

- СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*.
- СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.

3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменением №1).

4. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 467, 2014. P.404...409.

5. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку // Строительство: наука и образование. – 2013, № 4. С.2.

6. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2011, № 2-1. С. 77...83.

7. Забегаяев А.В., Тамразян А.Г., Люблинский В.А., Арутюнян Р.Г. Безопасность восстанавливаемых зданий с изменяющейся конструктивной схемой несущих систем и физической нелинейностью материала // Бетон и железобетон. – 2000, № 1. С. 12...15.

8. Альбом конструктивных решений по сейсмическому усилению элементов железобетонных каркасных зданий композитными материалами FibARM на основе углеволокна. – М.: ХК "Композит", 2012.

9. СТО 2256-002–2011. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. – М.: ХК "Композит", 2012.

10. Оценка сейсмостойкости зданий и сооружений МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГО ЧС (ФЦ), 2011.

2. SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnykh konstrukcij kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya.

3. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003 (s Izmenenijem N1).

4. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching method of optimization of bending reinforced concrete slabs with simultaneous assessment of criterion function and the boundary conditions // Applied Mechanics and Materials. – V. 467, 2014. P.404...409.

5. Tamrazjan A.G., Avetisjan L.A. Raschet vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnyh jelementov na kratkovremennuju dinamicheskiju nagruzku // Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie. – 2013, № 4. S.2.

6. Tamrazjan A.G. Rekomendacii k razrabotke trebovanij k zhivuchesti zdaniy i sooruzhenij // Vestnik MGSU. – 2011, № 2-1. S. 77...83.

7. Zabegaev A.V., Tamrazjan A.G., Ljublinskij V.A., Arutjunjan R.G. Bezopasnost' vosstanavlivaemyh zdaniy s izmenjajushhejsja konstruktivnoj shemoj nesushhih sistem i fizicheskoj nelinejnost'ju materiala // Beton i zhelezobeton. – 2000, № 1. S. 12...15.

8. Al'bom konstruktivnyh reshenij po sejsmousileniju jelementov zhelezobetonnyh karkasnyh zdaniy kompozitnymi materialami FibARM na osnove uglevolokna. – М.: НК "Композит", 2012.

9. СТО 2256-002–2011. Sistema vneshnego armirovaniya iz polimernyh kompozitov FibARM dlja remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij. – М.: НК "Композит", 2012.

10. Ocenka sejsmostojkosti zdaniy i sooruzhenij MChS Rossii. – М.: FGBU VNII GO ChS (FC), 2011.

#### REFERENCES

1. SP 14.13330.2011. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah. Aktualizirovannaja redakcija SNiP II-7-81\*.

Рекомендована Ученым советом МГСУ. Поступила 10.04.17.