

Ю. Г. Москалькова, С. В. Данилов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВОЙ РАБОТЫ КОЛОНН, УСИЛЕННЫХ СТАЛЬНОЙ ОБОЙМОЙ

Во введении рассмотрены характерные дефекты, уточняющие критерии оценки технического состояния железобетонных колонн, и организационно-технологические мероприятия по восстановлению эксплуатационных качеств железобетонных колонн для различных категорий их технического состояния. Отмечено, что устройство стальной обоймы является одним из самых эффективных и распространенных методов повышения несущей способности колонн. Рассмотрены варианты усиления железобетонных колонн стальной обоймой (в том числе стальной обоймой с обетонированием), а также способы передачи нагрузки на усиленные колонны. Описаны сложности при реализации экспериментальных исследований, связанные в том числе с размерами опытных образцов и методикой испытания разрушающими методами. Обоснованы преимущества численного моделирования работы усиленных железобетонных колонн для прогнозирования их напряженно-деформированного состояния после усиления. Отмечены возможные сложности при постановке численных экспериментов, связанные с неоднородностью бетона как строительного материала. В связи с этим определена цель настоящего исследования: эмпирически обосновать целесообразность применения метода конечных элементов для моделирования работы под нагрузкой железобетонных колонн, усиленных стальной обоймой. В основной части приведены результаты экспериментальных и численных исследований работы бетонных призм, усиленных стальной обоймой, при осевом кратковременном сжатии. Рассмотрены различные способы приложения нагрузки: ко всему сечению и только на бетонное ядро (без нагружения ветвей стальной обоймы). Подробно описаны методика проведения эксперимента и параметры численного моделирования. По результатам исследований отмечена хорошая сходимости расчетных значений напряжений и деформаций, полученных при численном моделировании, с опытными данными. В заключении установлено, что для описания силовой работы железобетонных колонн, усиленных стальной обоймой, численное моделирование методом конечных элементов обеспечивает получение корректных результатов независимо от способа приложения нагрузки.

Ключевые слова: бетон, железобетон, колонна, усиление, стальная обойма, сжатие, метод конечных элементов.

Введение. В нормальных эксплуатационных условиях большинство конструкций за установленный нормативный срок службы не исчерпывают физико-механических качеств материалов. Наряду с этим из-за неудовлетворительного ухода, нарушения правил технологической и технической эксплуатации сроки службы отдельных конструкций значительно сокращаются.

Техническое состояние железобетонных колонн определяется их соответствием показателям качества, предъявляемым при проектировании, изготовлении, монтаже и их эксплуатации. Если по меньшей мере один из показателей качества не обеспечивается, то это означает, что железобетонная колонна имеет дефект. Анализ дефектов, присущих железобетонным колоннам, показал, что все они в той или иной степени влияют на снижение несущей способности колонн. В соответствии с существующей методикой [1] оценку технического состояния железобетонных колонн производят по пяти категориям технического состояния (КТС). В зависимости от КТС предложены следующие мероприятия по восстановлению эксплуатационных качеств железобетонных колонн (таблица 1).

Москалькова Юлия Георгиевна, канд. техн. наук, доц., доц. каф. промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Мира, 43, 212000, г. Могилёв, Беларусь; e-mail: julia43@tut.by

Данилов Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доц. каф. промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Мира, 43, 212000, г. Могилёв, Беларусь; e-mail: danilov2901@mail.ru

Таблица 1 – Мероприятия по восстановлению эксплуатационных качеств железобетонных колонн

Категория технического состояния железобетонных колонн	Характерные дефекты и повреждения	Степень физического износа, %	Мероприятия по восстановлению эксплуатационных качеств железобетонных колонн
I – исправное (хорошее) состояние	Единичные малозначительные дефекты, не снижающие несущую способность и долговечность колонны	10	Дефекты устраняются в процессе технического обслуживания
II – работоспособное (удовлетворительное) состояние	Единичные или многочислен-ные малозначительные дефекты, существенно не снижающие несущую способность и долго-вечность колонны	30	Дефекты устраняются в процессе технического обслуживания и текущего ремонта
III – ограниченно работоспособное состояние	Многочисленные малозна-чительные или единичные значительные дефекты. Несущая способность и долговечность существенно снижены	50	Дефекты устраняются в процессе ремонта и местного усиления
IV – неработоспособное (неудовлетворительное) состояние	Многочисленные значительные или единичные, многочисленные критические дефекты	70	Дефекты устраняются в процессе капитального ремонта и усиления на всю высоту колонны
V – предельное (предаварийное) состояние	Массовые значительные или многочисленные, массовые критические дефекты	90	Требуются срочная разгрузка колонн и устройство времен-ных креплений с последую-щей разборкой и заменой

Наиболее сложными и трудоемкими в реализации являются технические решения по восстановлению и усилению железобетонных колонн, относящихся к IV категории технического состояния (степень физического износа до 50 %), характеризующейся многочисленными значительными или единичными, многочисленными критическими дефектами (таблица 1).

Как показывает практика ремонтно-восстановительных работ, при усилении железобетонных колонн, относящихся к IV КТС, в большинстве случаев применяются следующие способы усиления:

- усиление железобетонными обоймами и рубашками;
- усиление двухсторонними и односторонними наращиваниями;
- усиление стальными обоймами и стальными обоймами с обетонированием [2–6].

Метод усиления железобетонных колонн с помощью стальной обоймы имеет очень широкую практику применения и, можно сказать, является одним из основных методов усиления колонн.

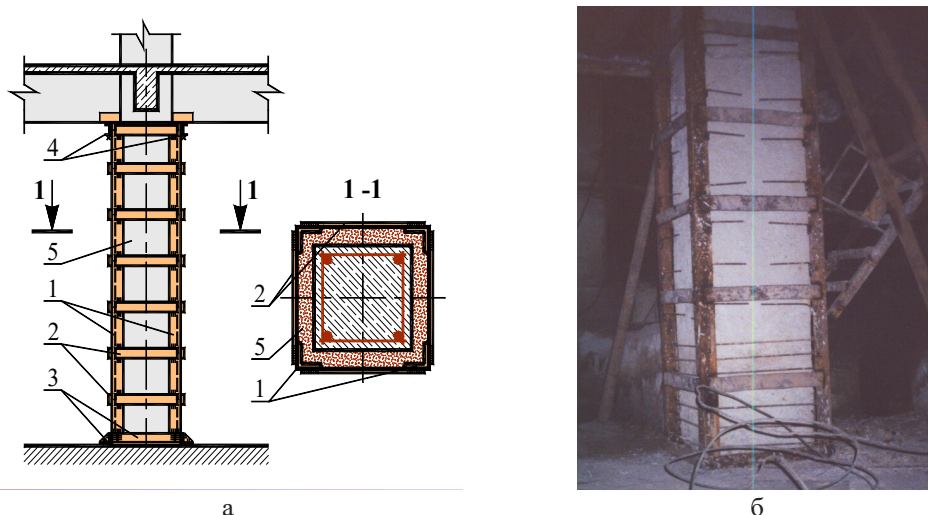
Выполненная аналитически-расчетным методом многокритериальная оценка приведенных способов по трудоемкости производства работ и прямым затратам показала, что наиболее эффективным с точки зрения сбалансированности показателей эффективности (затрат труда и прямых затрат) является способ восстановления и усиления железобетонных колонн устройством стальной обоймы с обетонированием (рисунок 1).

Эффективность способа усиления железобетонной колонны стальной обоймой с обетонированием зависит от включения в совместную работу стальной обоймы и бетонного ядра. Это может быть достигнуто за счет оптимальной схемы их нагружения. Возможно применение трех различных схем нагружения этих элементов. Для каждой из схем можно выделить характерные особенности:

1) передача нагрузки на все сечение усиленной железобетонной колонны – колонна и все элементы усиления должны быть включены в совместную работу;

2) передача нагрузки только на бетонное ядро усиливаемой колонны – продольные нагрузки передаются на колонну через бетонное ядро;

3) передача нагрузки на колонну через стальные элементы усиления – схема применима для трубобетонных сжатых элементов.



Пояснения: а – схема усиления; б – реализация данного способа; 1 – продольные элементы стальной обоймы; 2 – поперечные планки стальной обоймы; 3 – опорные уголки; 4 – упорные элементы; 5 – обетонирование.

Рисунок 1 – Восстановление и усиление железобетонной колонны стальной обоймой с обетонированием

В практике строительства применяются все перечисленные схемы нагружения усиленных железобетонных колонн. Наряду с этим работа под нагрузкой железобетонных колонн, усиленных стальной обоймой с обетонированием, мало изучена [7–10] и требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Однако проведение натурных испытаний является трудоемким и дорогостоящим процессом, а создание адекватных моделей колонн для испытания в лабораторных условиях затруднительно, что связано со значительными размерами опытных образцов. В целях адаптации размеров образцов к испытательному оборудованию зачастую опытные образцы имеют значительные расхождения в сравнении с реальными конструкциями: часто образцы не армированы или коэффициент их армирования значительно превышает значения, принимаемые для колонн; гибкость опытных образцов имеет очень низкое значение ввиду соотношения размеров поперечного сечения и высоты (если принимать шарнирные условия закрепления); граничные условия не соответствуют граничным условиям реальных колонн (железобетонные колонны обычно жестко заделаны в фундаменты); обойма имеет множество конструктивных различий с обоймой реальных колонн и т.п. То есть выводы по результатам испытаний можно делать только применительно к колоннам соответствующих гибкостей, но никак не ко всем колоннам, поскольку силовая работа колонн с различными гибкостями значительно отличается.

С этой точки зрения актуальным представляется использование численного моделирования, которое позволит прогнозировать работу усиленных колонн и обеспечит возможность оптимизировать процесс выбора способа усиления железобетонных колонн и варианта их нагружения.

Метод конечных элементов является наиболее распространенным методом численного моделирования работы конструкций. Тем не менее устойчивость

состояния равновесия железобетонных конструкций методом конечных элементов моделировать сложно. Сложности численного моделирования работы железобетона связаны с тем, что при определенных напряжениях происходит нарушение структурной целостности бетона, связанное с образованием микротрещин и последующим их развитием. Конечные элементы, на которые разбита сплошная среда железобетонной конструкции колонны, не могут повторять трещинообразование как физический процесс разрушения, протекающий в реальной конструкции, и это, очевидно, может повлиять на точность результатов.

В этой связи целью проведенных экспериментальных исследований являлось обоснование возможности численного моделирования силовой работы усиленных железобетонных колонн с использованием конечно-элементных моделей. Рассматривалось усиление стальной облоймой. Подобные исследования были выполнены в [11] для композитных сталебетонных элементов (сечение из двух двутавров, соединенных стальными листами, с заполнением внутренней полости бетоном). Данные, представленные в [11], позволяют предположить, что при моделировании бетонных призм, усиленных стальной облоймой, будут получены корректные результаты.

Экспериментальные исследования работы бетонных призм на осевое сжатие. Объем эксперимента включал испытания 16 опытных призм квадратного поперечного сечения с геометрическими размерами $100 \times 100 \times 600$ мм, усиленных стальной облоймой. Также были изготовлены 8 контрольных образцов без усиления с аналогичными геометрическими размерами. Размеры опытных образцов определялись мощностью имеющихся установок для создания разрушающей нагрузки.

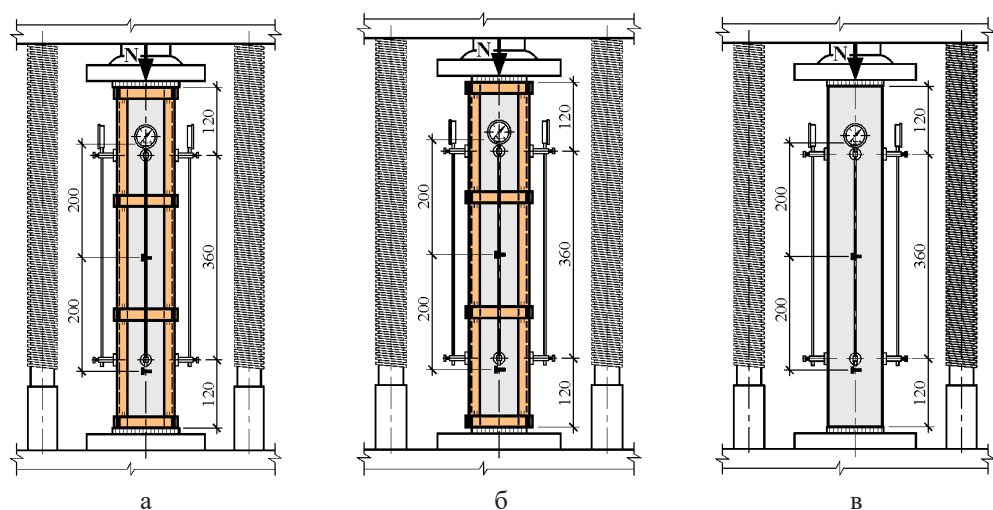
Опытные усиленные и контрольные призмы изготавливались из обычного бетона со следующими характеристиками, полученными по результатам испытаний с учетом статистической изменчивости: средняя кратковременная прочность на осевое сжатие $f_{cm} = 16,85$ МПа, средняя прочность на растяжение $f_{ctm} = 1,2$ МПа, средний модуль упругости $E_{cm} = 28,85$ ГПа.

Для приготовления бетона применялся портландцемент марки, расход вяжущего составлял 290 кг/м^3 . В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5–20 мм, в качестве мелкого – кварцевый песок с плотностью 1520 кг/м^3 и модулем крупности 1,61. Бетонная смесь для изготовления образцов приготавливалась с осадкой конуса 4–6 см и водоцементным отношением В/Ц = 0,65.

Для усиления опытных призм использовалась стальная облойма. Продольные элементы облоймы состояли из равнополочных уголков № 20, соединенных между собой поперечными планками $100 \times 20 \times 4$ мм при помощи электродуговой сварки. Уголок и поперечные пластины изготовлены из стали С245 с механическими характеристиками: предел текучести $f_y = 245$ МПа, предел временного сопротивления $f_u = 370$ МПа, модуль упругости $E_s = 206$ ГПа (аналогичная сталь применялась для изготовления стальных облойм в исследованиях [12]).

Для нагружения образцов использовался гидравлический пресс МС-500. Нагружение производилось ступенчато, по 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки, непрерывно, без толчков, со скоростью нагружения 0,2–0,3 МПа в секунду. На каждой ступени приложения нагрузки делались пятиминутные выдержки, во время которых производились снятия показаний по приборам сразу же после приложения нагрузки и после пятиминутной выдержки.

Испытание призм проводилось в лаборатории отдела качества ГУКДПП «Институт «Могилёвсельстройпроект». Напряженно-деформированное состояние бетона опытных образцов исследовалось с помощью тензорезисторов и механических индикаторов часового типа. Деформации бетона измерялись на боковых гранях основного сечения. Схемы испытания и расположение приборов показаны на рисунке 2.



Пояснения: а – схема нагружения по всему сечению усиления; б – схема нагружения бетонного ядра; в – схема нагружения опытных образцов без усиления.

Рисунок 2 – Схемы испытания опытных образцов

Таблица 2 – Результаты испытания опытных образцов

Шифр призмы	Контролируемые параметры бетона при разрушающей нагрузке		Разрушающая нагрузка, кН		Среднее квадратичное отклонение S , кН	Коэффициент вариации V , %	Коэффициент Стьюдента t_p ($P = 0,95$)	Критерий Романовского t' ($P = 0,95$)	Относительная погрешность результатов Δ , %
	Относительные деформации ε_c	Напряжения в бетоне σ_c , МПа	Опытное значение	Среднее значение					
Нагружение опытных образцов, усиленных стальной обоймой, по всему сечению									
П-1	$82 \cdot 10^{-5}$	16,2	364	366,1	2,59	0,71	2,37	2,51	4,74
П-2	$90 \cdot 10^{-5}$	17,1	368						
П-3	$88 \cdot 10^{-5}$	16,8	366						
П-4	$87 \cdot 10^{-5}$	16,6	363						
П-5	$82 \cdot 10^{-5}$	16,3	365						
П-6	$86 \cdot 10^{-5}$	16,5	370						
П-7	$89 \cdot 10^{-5}$	17,0	364						
П-8	$90 \cdot 10^{-5}$	17,2	369						
Нагружение опытных образцов, усиленных стальной обоймой, только на бетонное ядро									
П-9	$75 \cdot 10^{-5}$	16,0	264	266,0	1,77	0,67	2,37	2,51	4,46
П-10	$77 \cdot 10^{-5}$	16,7	266						
П-11	$76 \cdot 10^{-5}$	16,2	264						
П-12	$80 \cdot 10^{-5}$	16,9	268						
П-13	$82 \cdot 10^{-5}$	17,1	267						
П-14	$76 \cdot 10^{-5}$	16,3	267						
П-15	$79 \cdot 10^{-5}$	16,8	268						
П-16	$74 \cdot 10^{-5}$	15,8	264						
Нагружение контрольных образцов без усиления									
ПК-1	$44 \cdot 10^{-5}$	14,8	162	163,0	1,41	0,87	2,37	2,51	3,32
ПК-2	$48 \cdot 10^{-5}$	15,8	164						
ПК-3	$47 \cdot 10^{-5}$	15,6	162						
ПК-4	$53 \cdot 10^{-5}$	16,8	164						
ПК-5	$45 \cdot 10^{-5}$	15,2	161						
ПК-6	$46 \cdot 10^{-5}$	15,4	162						
ПК-7	$52 \cdot 10^{-5}$	16,5	164						
ПК-8	$49 \cdot 10^{-5}$	16,0	165						

Примечание – Для шифрования использованы следующие условные обозначения: П – призма (с усилением); ПК – призма контрольная (без усиления).

Нагрузка на опытные образцы передавалась через стальные распределительные пластины следующими способами:

- 1) нагрузка передавалась на опытные образцы, усиленные стальной обоймой, по всему сечению усиленного образца (рисунок 5а);
 - 2) нагрузка передавалась на опытные образцы, усиленные стальной обоймой, только на бетонное ядро, без нагружения стальной обоймы (рисунок 5б);
 - 3) нагрузка передавалась на все поперечное сечение контрольного образца (рисунок 5в).
- Результаты и статистическая обработка экспериментальных данных приведены в таблице 2.

Численное моделирование работы опытных призм. Для всех типов испытанных на сжатие опытных призм – бетонных и усиленных стальной обоймой – была создана пространственная модель в программном комплексе Lira-Windows (блок нелинейных расчетов). Исследуемую упругую область модели разбили на 2560 треугольных элементов, используя автоматизированную разбивку.

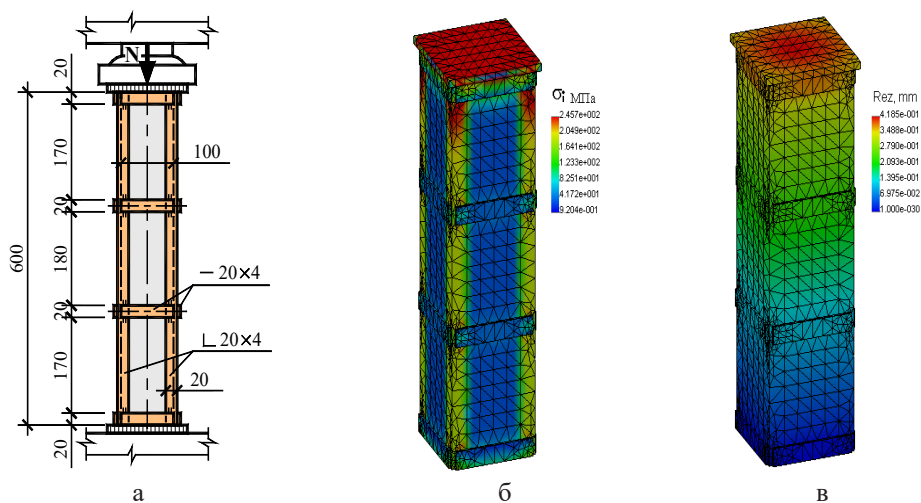
Для определения напряженного состояния элементов теоретические значения продольных и поперечных напряжений, деформаций и перемещений вычислялись для моделей образцов с использованием следующих характеристик:

- геометрические характеристики: усиленная модель образца квадратного сечения и размерами $600 \times 600 \times 100$ мм;
- характеристики бетона [13; 14]: $f_{cm} = 16,0$ МПа, $f_{ctm} = 1,2$ МПа, $E_{cm} = 33$ ГПа, коэффициент поперечных деформаций (Пуассона) $\nu_c = 0,2$, плотность $\rho = 2400$ кг/м³;
- характеристики стали обоймы усиления [15; 16]: $f_y = 245$ МПа, $f_u = 370$ МПа, $E_s = 206$ ГПа.

При моделировании нагружение образцов задавалось следующими способами:

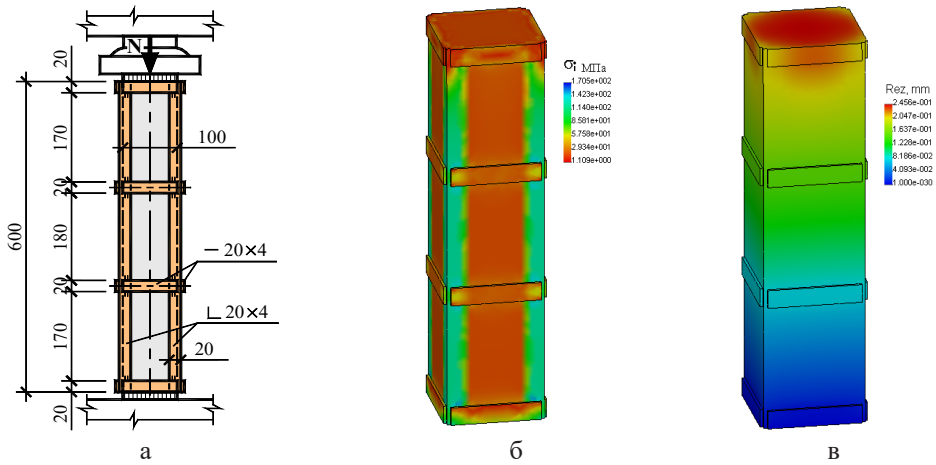
- 1) нагружение опытной призмы, усиленной стальной обоймой, по всему сечению, включая усиление;
- 2) нагружение опытной призмы, усиленной стальной обоймой, только на бетонное ядро, без нагружения ветвей обоймы;
- 3) нагружение контрольного (неусиленного) образца по всему сечению.

Исследование упругопластического деформирования моделей проводилось с использованием «пошагового» метода нагружения. С помощью данного подхода удалось получить зависимости продольных деформаций и напряжений при рассмотренных способах нагружения. Результаты приведены на рисунках 3–5.



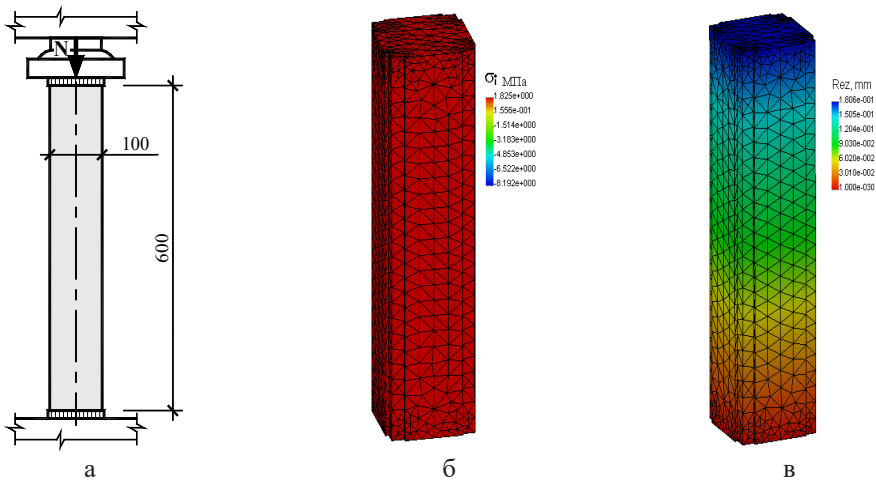
Пояснения: а – схема нагружения; б – эквивалентные напряжения, МПа; в – результирующие деформации, мм.

Рисунок 3 – Схема нагружения и распределение эквивалентных напряжений и результирующих деформаций при нагружении модели призмы, усиленной стальной обоймой, по всему сечению



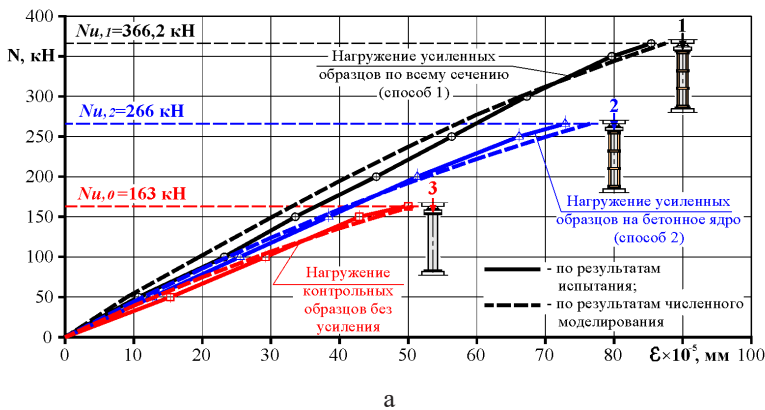
Пояснения: а – схема нагружения; б – эквивалентные напряжения, МПа; в – результирующие деформации, мм.

Рисунок 4 – Схема нагружения и распределение эквивалентных напряжений и результирующих деформаций при нагружении модели призмы, усиленной стальной обоймой, только на бетонное ядро

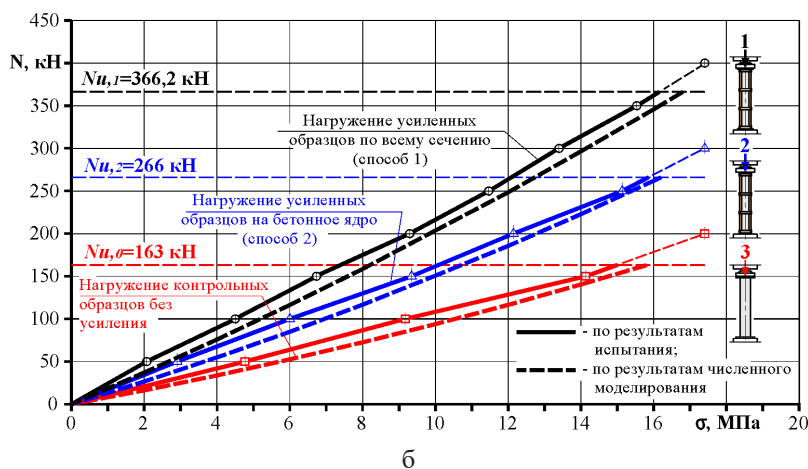


Пояснения: а – схема нагружения; б – эквивалентные напряжения, МПа; в – результирующие деформации, мм.

Рисунок 5 – Схема нагружения и распределение эквивалентных напряжений и результирующих деформаций при нагружении модели призмы без усиления



а



Пояснения: а – изменение результирующих деформаций; б – изменение сжимающих напряжений.

Рисунок 6 – Изменение результирующих деформаций и сжимающих напряжений в бетоне с ростом нагрузки при рассмотренных способах усиления

Результаты численного моделирования в сравнении с опытными данными приведены на графиках (рисунок 6).

Заключение. Сопоставление экспериментальных и численных результатов показывает, что конечно-элементарная модель корректно отражает характер и величину усилий в центрально-сжатых бетонных и сталебетонных элементах независимо от способа приложения нагрузки. В связи с этим рекомендуется использовать численное моделирование методом конечных элементов для описания силовой работы железобетонных колонн, в том числе усиленных стальной обоймой, с целью прогнозирования их напряженно-деформированного состояния после усиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техническое состояние зданий и сооружений : СН 1.04.01-2020. – Введ. 2021–03–23. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 69 с.
2. Xu, C. X. Study on seismic behavior of encased steel jacket-strengthened earthquake-damaged composite steel-concrete columns / C. X. Xu [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2018. – Vol. 17. – P. 154–166. – doi: 10.1016/j.jobe.2018.02.010.
3. Kim, S. H. Seismic retrofit of rectangular RC bridge columns using wire mesh wrap casing / S. H. Kim, D. K. Kim // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2011. – Vol. 15, issue 7 – P. 1227–1236.
4. Montuori, R. Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load / R. Montuori, V. Piluso // Engineering Structures. – 2009. – Vol. 31, issue 2. – P. 539–550. – doi: 10.1016/j.engstruct.2008.10.005.
5. Belal, M. F. Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket / M. F. Belal, H. M. Mohamed, S. A. Morad // Housing and Building National Research Center Journal. – 2015. – Vol. 11, issue 2. – P. 201–212. – doi: 10.1016/j.hbrcej.2014.05.002.
6. El-Badawy Sayed, A. Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Columns Using Steel Jackets; Mechanical Performance and Applications / A. El-Badawy Sayed // Journal of Engineering Sciences. – 2009. – Vol. 37, issue 3. – P. 563–580. – doi: 10.21608/JESAUN.2009.126485.
7. Казачек, В. Г. Обследование и испытание зданий и сооружений : учебник для вузов / В. Г. Казачек, Н. В. Нечаев, С. Н. Нотенко ; под ред. В. И. Римшина. – М. : Высш. шк., 2006. – 655 с.
8. Лазовский, Д. Н. Проектирование реконструкции зданий и сооружений : учеб.-метод. комплекс : в 3 ч. / Д. Н. Лазовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – Ч. 2 : Оценка состояния и усиление строительных конструкций. – 340 с.
9. Лазовский, Д. Н. Теория расчета и конструирование усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Д. Н. Лазовский. – Минск, 2000. – 376 с.
10. Неразрушающие методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практ. пособие / Т. М. Пецольд [и др.] ; под общ. ред. А. А. Васильева. – Гомель : БелГут, 2007. – 146 с.

11. Kwaśniewski, L. Finite element modeling of composite concrete-steel columns / L. Kwaśniewski, E. Szmigiera, M. Siennicki // Archives of Civil Engineering. – 2011. – LVII, 4. – P. 374–388. – doi: 10.2478/v.10169-011-0027-z.

12. Khalifa, E. S. Experimental and analytical behavior of strengthened reinforced concrete columns with steel angles and strips / E. S. Khalifa, S. H. Al-Tersawy // Int. J. Adv. Struct. Eng. – 2014. – Vol. 6, issue 2. – P. 1–14. – doi: 10.1007/s40091-014-0061-6.

13. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 2020–09–16. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 244 с.

14. Eurocode 2: Design of concrete structures : EN 1992–1–1:2004:E. – Part 1–1 : General rules and rules for buildings. English version. – Brussels : European Committee for Standardization, 2004. – 227 p.

15. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций : ТКП EN 1993–1–1–2009* (02250). – Переиздание с Изменением № 1. – Введ. 2010–01–01. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2014. – Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий (с изменениями). – 184 с.

16. Eurocode 3: Design of steel structures : EN 1993–1–1:2005:E. – Brussels : European Committee for Standardization, 2005. – Part 1–1 : General rules and rules for buildings. English version. – 91 p.

Поступила в редакцию 12.10.2021.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science”

Vol. 11, No. 2, 2021, pp. 112–121

© Yanka Kupala State University of Grodno, 2021

Experimental substantiation of finite element modeling of the power work of columns strengthened with a steel jacketing

Yu. G. Moskalkova¹, S. V. Danilov²

¹ *Belarusian-Russian University (Belarus)*

Mira Ave., 43, 212000, Mogilev, Belarus; e-mail: julia43@tut.by

² *Belarusian-Russian University (Belarus)*

Mira Ave., 43, 212000, Mogilev, Belarus; e-mail: danilov2901@mail.ru

Abstract. The characteristic defects of columns are discussed in the introduction. These defects are a technical condition of evaluation indicator of reinforced concrete (RC) columns. The organizational and technological actions for strengthening and repairing RC columns for various evaluation indicators of technical condition are also discussed. It is noted, that establishing RC columns in steel jackets is an effective and common method to increase bearing capacity. Different types of steel jacketing (including strengthening with steel jacketing and concrete coating) and the method of applying the load are considered. The realization of experimental research has some difficulties. This is due to the sizes of specimens and the destructive method. The advantages of numerical simulation of RC columns strengthened by steel angles and strips for predicting stress-strain states are justified. Possible difficulties in the formulation of numerical experiments associated with concrete heterogeneity as a building material are noted. The purpose of the study is to determine the experimental practicability of using the finite element method to simulate process modeling under the on-load operation of the RC columns strengthened with a steel jacketing. The main part presents the results of experimental and numerical studies on the short-term compression of concrete prisms strengthened with a steel jacketing. Various methods of applying the load are considered: to the entire cross-section and only to the concrete core (without loading the steel angles). The testing technique and the parameters of numerical simulation are described in detail. The results of the study show a good agreement with the calculated values of stresses and strains obtained in numerical simulation and experimental data. In conclusion, it is stated that the numerical simulation by the finite element method provides correct results regardless of the way the load is applied for the behaviour of RC columns strengthened with a steel jacketing.

Keywords: concrete, reinforced concrete, column, strengthening (metal), steel jacketing, compaction, finite element method.

References

1. Technical condition of buildings and facilities [*Tekhnicheskoe sostoianie zdanii i sooruzhenii*] : BC 1.04.01-2020. Minsk, 2021, 69 p.

2. Xu C. X. [et al.]. Study on seismic behavior of encased steel jacket-strengthened earthquake-damaged composite steel-concrete columns. *Journal of Building Engineering*, 2018, vol. 17, p. 154-166. doi: 10.1016/j.job.2018.02.010.

3. Kim S. H., Kim D. K. Seismic retrofit of rectangular RC bridge columns using wire mesh wrap casing, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 2011, vol. 15, issue 7, pp. 1227-1236.
4. Montuori R., Piluso V. Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load. *Engineering Structures*, 2009, vol. 31, issue 2, pp. 539-550. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.10.005.
5. Belal M. F., Mohamed H. M., Morad S. A. Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket. *Housing and Building National Research Center Journal*, 2015, vol. 11, issue 2, pp. 201-212. doi: 10.1016/j.hbrj.2014.05.002.
6. El-Badawy Sayed A. Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Columns Using Steel Jackets; Mechanical Performance and Applications. *Journal of Engineering Sciences*, 2009, vol. 37, issue 3, pp. 563-580. doi: 10.21608/JESAUN.2009.126485.
7. Kazachek V. G., Nechaev N. V., Notenko S. N. Inspection and testing of buildings and structures [*Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzheniy*]; Ed. by V. I. Rimshin. Moscow, 2006, 655 p.
8. Lazovski D. N. Designing the reconstruction of buildings and structures. Part 2 : Assessment of the condition and strengthening of building structures [*Proektirovanie rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy. Ch. 2 : Otsenka sostoianiya i usilenie stroitel'nykh konstruksii : ucheb.-metod. kompleks : v 3 ch.*]. 2nd ed. Novopolotsk, 2008, 340 p.
9. Lazovski D. N. Theory of calculation and design of strengthening of reinforced concrete structures of operating building structures [*Teoriya rascheta i konstruirovaniye usileniya zhelezobetonnykh konstruksii ekspluatiruemyykh stroitel'nykh sooruzheniy : dis. ... d-ra tekhn. nauk*]. Minsk, 2000, 376 p.
10. Petsold T. M. [et al.]. Non-destructive methods for assessing and predicting the technical state of reinforced concrete structures operating in air [*Nerazrushaiushchie metody otsenki i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoianiya zhelezobetonnykh konstruksii, ekspluatiruiushchikhsia v vozdushnykh sredakh : prakt. posobie*]; Ed. by A. A. Vasiliev. Gomel, 2007, 146 p.
11. Kwaśniewski L., Szmigiera E., Siennicki M. Finite element modeling of composite concrete-steel columns. *Archives of Civil Engineering*, 2011, LVII, 4, pp. 374-388. doi: 10.2478/v.10169-011-0027-z.
12. Khalifa E. S., Al-Tersawy S. H. Experimental and analytical behavior of strengthened reinforced concrete columns with steel angles and strips. *Int. J. Adv. Struct. Eng*, 2014, vol. 6, issue 2, pp. 1-14. doi: 10.1007/s40091-014-0061-6.
13. Concrete and reinforced concrete structures [*Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii*] : BR 5.03.01-2020. Minsk, 2020, 244 p.
14. Eurocode 2: Design of concrete structures : EN 1992-1-1:2004:E. Part 1-1 : General rules and rules for buildings. English version. Brussels, 2004, 227 p.
15. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings [*Evrokod 3. Proektirovanie stal'nykh konstruksii. Chast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlia zdaniy*] : TCP EN 1993-1-1-2009* (02250). Minsk, 2014, 184 p.
16. Eurocode 3: Design of steel structures : EN 1993-1-1:2005:E. Part 1-1: General rules and rules for buildings. English version. Brussels, 2005, 91 p.



Уважаемые авторы!

Более подробно требования к оформлению материалов, а также условия для принятия материалов см. на сайте журнала

<http://vesnik.grsu.by>