

Сравнительный анализ классического и современного методов усиления коротких стоек при больших эксцентриситетах

П.П. Польской, В.А. Мурадян, А.Г. Никитин

Донской государственный технический университет

г. Ростов-на-Дону

Аннотация: Проведено сравнение эффективности традиционного и инновационного методов усиления коротких сжатых стоек работающих при больших эксцентриситетах. Наибольшая несущая способность, согласно экспериментов, получена при усилении стоек внешней продольной композитной арматурой в виде двух полос – ламелей в растянутой зоне в сочетании с поперечными трехслойными хомутами из углеткани, расположенной с шагом 190мм. Характеристики элементов усиления стоек для классического метода получены расчетным путем с использованием наращивания сечения коротких стоек со стороны растянутой зоны. При сравнении стоимости материалов и трудозатрат установлено, что в инновационный метод оказался заметно дороже классического, однако позволяет значительно снизить срок введения в эксплуатацию колонн.

Ключевые слова: колонна, стойка, элемент, бетон, железобетон, композитный материал, углепластик.

Повышение эффективности и долговечности строительных конструкций на современном этапе развития строительной индустрии невозможно без использования новых или современных видов материалов и конструкций на их основе. В настоящий момент можно уже четко говорить о том, что к таким видам строительных материалов относятся высокопрочные бетоны и композитные материалы. В первую очередь для строительства это касается композитных материалов на основе углеродных волокон.

Это связано с особенностью таких материалов, как высокая прочность, а для композитных материалов - легкость, повышенная коррозионная стойкость, простота изготовления новых и усиления существующих конструкций, которая заключается в наклеивании композитных материалов на подготовленную железобетонную поверхность.

Не секрет, что все новое, включая строительные материалы и конструкции, должно проходить тщательную экспериментальную проверку и апробацию.

С учетом вышеизложенного, кафедра железобетонных и каменных конструкций ДГТУ, начиная с 2005 года проводит исследования высокопрочных бетонов [1-5], а после 2012 года - проводит обширные эксперименты по комплексному исследованию железобетонных конструкций с использованием стекло и углепластиков в качестве внутренней и внешней рабочей арматуры. Ценность проводимых исследований состоит еще и в том, что испытания проводятся на опытных образцах, близких по своим размерам к натурным.

Результаты таких исследований нашли широкое освещение в отечественной и зарубежной печати. В их числе исследования [6], которые связаны с использованием круглой стекло и углепластиковой арматуры в качестве рабочей. Вопросы использования внешней композитной арматуры в качестве элементов усиления для изгибаемых элементов отражены в работах [7], опубликованных в России и [8-9] - за рубежом.

Наряду с исследованиями технических параметров усиленных конструкций, важно оценить и эффективность использования существующих методов усиления. Настоящая статья посвящена оценке эффективности коротких сжатых элементов с гибкостью $\lambda_n=10$, усиленных с использованием бетона и арматуры – классический метод и внешним композитным армированием – инновационный. За основу взяты экспериментальные данные выполненные на кафедре железобетонных и каменных конструкций ДГТУ. Результаты этих опытов приведены в табл. № 1 с целью проведения анализа.

Таблица № 1

Результаты испытания коротких стоек, усиленных углепластиком при осевом эксцентриситете $e_0=4\text{см}$

Характеристики опытных образцов	Шифр стоек	Прочность бетона \bar{R} , МПа	Характер усиления углепластиком	Предельные деформации		Опытные значения		Коэффициент усиления N_y/N
				Сжатие $\varepsilon_e \cdot 10^{-3}$	Растяжение $\varepsilon_{ст} \cdot 10^{-3}$	Прочность кН N_y	Прогобы $f_{мм}^{exp}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сечения-250x125 (h) мм $l_0=1200\text{мм}$, $\lambda_{н1}=10$; $e_0=4$. Продольное армирование 4Ø12 A500 ($\mu_s=1.45$) хомуты – Ø6 B500, $s=180$	ВК	40,6	Эталон	5,53	4,47	422,2	9,15	-
	ВКУ-Х ₁	40,6	Хомут шириной 50мм, шаг 190мм.	6,5	5,68	$\frac{482,5}{482,5}$	9,32	1,4
	ВКУ-Х ₁ L _p	40,6	Хомут шириной 50мм, шаг 190мм+2 полосы углеламината $b=50$; $t=1,4\text{мм}$	6,16	3,14	$\frac{530,0}{530,0}$	7,17	1,25
	ВКУ-Х ₄ L _p	50,6	Хомут в центре 240мм, на остальной длине 50мм с шагом 190мм +2 полосы углеламината $b=50$; $t=1,4\text{мм}$	4,65	2,95	$\frac{608,0}{487,8}$	8,875	$\frac{1,44}{1,16}$

Исследовались образцы гибкостью $\lambda_n = 10$, сечением 250x125 (h) мм и длиной 1200 мм. Продольная арматура состояла из 4Ø12 A500, а поперечные вязаные хомуты были изготовлены из Ø6 B500 и установлены с шагом $s_{wv} = 180$ мм.

Исходя из табл. №1 оптимальным вариантом для сравнения с классическим методом усиления была выбрана стойка ВКУ-Х₁L_p, усиленная внешними хомутами шириной 50 мм с шагом 190 мм и двумя углеламинатами толщиной 1,4 мм и шириной 50 мм. Разрушающая нагрузка составила 530 кН, что в 1.26 раза прочнее эталонного образца, который показал прочность 422,2 кН.

Для сравнения экономической эффективности инновационного метода усиления и классического для эталонного образца, согласно [10], была запроектирована набетонка со стороны растянутой грани. В качестве величины внешней нагрузки было принято опытное значение прочности усиленного углепластиком образца – 530 кН.

По результатам расчета получены следующие данные:

Значение коэффициентов А и В для универсального метода расчета:

$$A = \frac{[N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_{sred} - R_{bred} \cdot b(h_0 + a_0)]}{0,5R_{sadd}} =$$
$$= \frac{[530 \cdot 10^3 + 435(100) \cdot 2,26 - 400(100) \cdot 2,26 - 18,6(100) \cdot 25 \cdot (10 + 5)]}{0,5 \cdot 435(100)} = -7,34$$
$$B = \frac{0,5[R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_{sred}]^2 + [R_{sc} \cdot A'_{sred} \cdot a' - R_s \cdot A_s \cdot h_0 + N(g - h_0)] \cdot R_{bred} \cdot b}{0,5[R_{sadd}]^2} +$$
$$+ \frac{N[R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_{sred}] + 0,5N}{0,5[R_{sadd}]^2} = \frac{0,5[435(100) \cdot 2,26 - 400(100) \cdot 2,26]^2}{0,5 \cdot [435(100)]^2} +$$
$$+ \frac{[400(100) \cdot 2,26 \cdot 2,5 - 435(100) \cdot 2,26 \cdot 10 + 530 \cdot 10^3 \cdot (11,61 - 10)] \cdot 18,6(100) \cdot 25}{0,5 \cdot [435(100)]^2}$$
$$+ \frac{530 \cdot 10^3 \cdot [435(100) \cdot 2,26 - 400(100) \cdot 2,26] + 0,5 \cdot 530 \cdot 10^3}{0,5 \cdot [435(100)]^2} = 9,19 \text{ см}^2$$

Площадь дополнительной рабочей арматуры:

$$A_{sadd} = -\frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} = -\left(-\frac{7,34}{2}\right) - \sqrt{\frac{7,34^2}{4} - 9,19} = 1,60 \text{ см}^2$$

Площадь утраченного сечения арматуры:

$$\Delta A_{sadd} = 0,25 \cdot A_s = 0,25 \cdot 2,26 = 0,565 \text{ см}^2$$

Полная площадь дополнительной арматуры:

$$A_{sadd}^{total} = A_{sadd} + \Delta A_{sadd} = 1,60 + 0,565 = 2,165 \text{ см}^2$$

Принимает 2∅16A500C, $A_{sadd} = 4,02 \text{ см}^2$.

Расчетная площадь дополнительной арматуры:

$$A_{sad}^{fact} = A_{sad}^{teor} - \Delta A_{sad} = 4,02 - 0.565 = 3,455 \text{ см}^2$$

Высота сжатой зоны бетона:

$$x = \frac{[N + R_s \cdot A_{sred} - R_{sc} \cdot A'_{sred}]}{R_{bred} \cdot b} = \frac{[530 \cdot 10^3 + 435(100) \cdot 5,715 - 400(100) \cdot 2,26]}{18,6(100) \cdot 25}$$

$$= 14,8 \text{ см}$$

Несущая способность сечения:

$$\begin{aligned} M_{adutt} &= R_{bred} \cdot b \cdot x (h_{ord} - 0,5x) + R_{sc} \cdot A'_{sred} (h_{ord} - a') = \\ &= 18,6(100) \cdot 25 \cdot 14,8(20,78 - 0,5 \cdot 12,69) + 400(100) \cdot 2,26(20,78 - 2,5) = \\ &= 110,3 \cdot 10^5 \text{ Н} > N_{ad} \cdot e_{ad} = 530 \cdot 10^3 \cdot 11,61 = 61,533 \cdot 10^5 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Оценка эффективности рассматриваемых методов осуществлялась на основе сравнения стоимости материалов и трудозатрат.

Перечень и последовательность работ, предусмотренный для **классического** метода усиления следующий:

- при необходимости разгрузить колонну до уровня 65% от предельной нагрузки;
- удаление защитного слоя бетона в местах приварки коротышей;
- нанесение насечки для улучшения сцепления старого бетона с новым;
- изготовление деталей для арматурного каркаса с целью обеспечения совместной работы дополнительной арматуры посредством приваривания ее к существующей арматуре через коротыши;
- приварка коротышей и арматуры усиления к существующей арматуре;
- обеспыливание поверхности колонны сжатым воздухом;
- промывка водой под давлением;
- установка опалубки;

- укладка и уплотнение суперпластичной бетонной смеси под давлением с использованием бетононасосов снизу-вверх через штуцеры;
- снятие опалубки;
- уход за бетоном в течении 28 суток с соблюдением тепловлажностного режима.

Перечень и последовательность работ, предусмотренный для **композитного** метода усиления следующий:

- при необходимости разгрузка колонны до уровня 65% от предельной нагрузки;
- очистка поверхности от цементно-песчаного молока до оголения крупного заполнителя с использованием шлифовальных кругов;
- закругление четырех углов радиусом 2 см;
- обеспыливание поверхности сжатым воздухом;
- покрытие всей поверхности грунтовкой;
- при необходимости – нанесение шпаклевки;
- нанесение первого и последующих слоев клеевого состава;
- последовательное наклеивание трех слоев ткани;
- нанесение финишного слоя клея;
- нанесение крупнозернового песка на финишный слой клея (обсыпка);
- оштукатуривание колонны цементно-песчаным раствором марки 100 по сетке толщиной 20 мм.

Продолжительность работ по усилению стойки с использованием углеламината и трехслойного углехолста составляет с учетом технологии нанесения грунтовки, шпаклевки и клеевого состава – 2,5-3 смены.

Полное отвердевание композитных клеев наступает через 7-8 суток от начала выполнения работ.

Стоимостное выражение вышеперечисленных работ приведено в табл. №2.

Таблица № 2

Сравнение стоимости и трудозатрат работ по усилению опытных колонны железобетоном и композитными материалами.

Способ усиления	Стоимость материалов, тыс.руб.	Стоимость работ, тыс.руб.	ИТОГО, тыс.руб.	Остановка производства для	
				выполнения работ по усилению, дней	набора прочности элемента, дней
Классический	1,058	1,270	2,328	2-4	28
Композитный	10,270	0,885	11,155	2	7-8

Примечание:

1) Рыночная стоимость 1 м² углеткани толщиной 0,166 мм по состоянию на сентябрь 2018 г. составляет 6.116 тыс. рублей;

2) Рыночная стоимость 1 м.п. углеламината толщиной 1.4 мм по состоянию на сентябрь 2018 г. составляет 3.071 тыс. рублей;

3) В стоимость 1 м² композитной ткани и ламината входит стоимость всех расходных материалов – грунтовки, шпаклевки и клеевого состава;

4) Стоимость работ на устройство набетонки получена согласно сметному расчету в соответствии с расценками по состоянию на сентябрь 2018 г.

Сравнение традиционного и инновационного методов усиления показало, следующее:

- Стоимость усиления композитным методом заметно выше по сравнению с традиционным, так как стоимость углепластика в настоящий момент во много раз превышает стоимость железобетона. Однако стоимость работ при традиционном методе выше.

- Инновационный метод позволяет снизить срок введения колонн в эксплуатацию до 7-8 суток, вместо 28 суток при классическом.

- При усилении без остановки производства важным фактором является отсутствие сварных работ и необходимость использования лесов и специального оборудования.

По совокупности изложенного, самоокупаемость затрат при композитном усилении наступит раньше, что указывает на большую рациональность нового метода.

Литература

1. Щуцкий В.Л., Чубаров В.Е., Коробкин А.П., Гриценко М.Ю. Исследование трещиностойкости и деформативности цилиндрических опор ЛЭП // Научное обозрение. -2017. -№12
URL: sced.ru/ru/index.php?Itemid=156&catid=39&id=618:nauchnoe-obozenie-12-2017&option=com_content&view=article
2. Щуцкий В.Л., Коробкин А.П., Шевченко А.С., Стельмах С.А. Исследование работы конических опор электропередач в качестве стоек для антенных башенных надстроек // Науковедение, 2017, Том 9, №4
3. Mailyan D.R., Aksenov V.N., Aksenov N.B. Energy-efficient reinforced concrete columns made of concrete, grade B90...B140 // Advances in Intelligent and Soft Computing. 2018. V.692. pp. 536-542.
4. Сухарева А.В., Аксенов В.Н. Сравнительный анализ эффективности использования кесонных перекрытий Skydome в современных многоэтажных зданиях при стандартном шаге колонн // Инженерный вестник Дона. 2016. №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885
5. Радченко А.В., Аксенов В.Н. Методы расчета каркасных зданий из монолитного железобетона на прогрессирующее обрушение на примере 17-

- этажного жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2016. №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879
6. Польской П.П., Хишмах М., Михуб А. О возможности использования круглых углепластиковых стержней в качестве рабочей арматуры для изгибаемых элементов // Научное обозрение. 2012. №6. С. 211-213.
7. Рябинович Л.Р. Мизернюк Б.Н. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций здания и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения // Харьковский ПростройНИИ проект, НИИЖБ – М.: Стройиздат, 1992.-191с.
8. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444. URL: link.springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.
9. Mander J. B.; Priestley M. J. N., Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete // Journal of structural Engineering. Vol. 114. №8. 1988. URL: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
10. Польской П.П. Проектирование и расчет железобетонных конструкций, усиленных наращиванием сечений // Учебное пособие. – Ростов – на – Дону: РГСУ, 2011. –163с

References

1. Shhuckij V.L., Chubarov V.E., Korobkin A.P., Gricenko M. Ju. Nauchnoe obozrenie.-2017.-№12
URL: sced.ru/ru/index.php?Itemid=156&catid=39&id=618:nauchnoe-obozrenie-12-2017&option=com_content&view=article
2. Shhuckij V.L., Korobkin A.P., Shevchenko A.S., Stel'mah S.A. Naukovedenie V 9, №4 2017 URL: naukovedenie.ru/PDF/43TVN417.pdf
3. Mailyan D.R., Aksenov V.N., Aksenov N.B. Advances in Intelligent and Soft Computing. 2018. V.692. pp. 536-542.
-



4. Suhareva A.V., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3885
5. Radchenko A.V., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2016. №4.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3879
6. Pol'skoj P.P., Hishmah M., Mihub A. Nauchnoe obozrenie. 2012. №6. pp. 211-213.
7. Rjabinovich L.R. Mizernjuk B.N. Har'kovskij ProstrojNII proekt, NIIZhB – M.: Strojizdat,1992.pp.-191
8. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444
URL: link.springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.
9. Mander J. B.; Priestley M. J. N., Park R. Journal of structural Engineering. Vol. 114. №8. 1988. UL: [doi.org/10.1061/ \(ASCE\) 0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)).
10. Pol'skoj P.P. Uchebnoe posobie. Rostov na Donu: RGSU, 2011.pp.163