

Влияние предварительного обжатия бетона композитными материалами на изменение его свойств при сжатии

Д.А. Шилов, А.В. Шилов

Донской государственной технической университет

Аннотация: В процессе длительной эксплуатации железобетонных конструкций зданий и сооружений под действием различных нагрузок и воздействий происходят деструктивные изменения, которые приводят к снижению несущей способности и эксплуатационной пригодности, и, как следствие, к необходимости применения конструктивного усиления. В сжатых элементах, как известно, разрушение бетона происходит в следствие достижения растягивающих напряжений в поперечном направлении предела прочности. При этом одним из эффективных методов усиления таких конструкций является создание поперечных обойм из композитных материалов. В то же время проведенные исследования показывают относительно невысокие напряжения в элементах композитного усиления при достижении конструкцией разрушения. Актуальной задачей данного исследования является изучение влияния предварительного напряжения элементов из углекомпозитных материалов на изменение физико-механических характеристик бетона при сжатии. Рассмотрена технология создания предварительного напряжения и представлены результаты испытания опытных бетонных образцов. Установлено, что усиление элементов предварительно напряженными обоями увеличивает прочность бетона более чем в 2 раза.

Ключевые слова: бетон, железобетон, сжатые элементы, усиление, композитные материалы, предварительное обжатие, прочность, деформативность.

Повышение несущей способности и восстановление эксплуатационной пригодности строительных конструкций является одной из самых часто встречающихся задач в области строительства. Методы усиления железобетонных конструкций композитными материалами активно разрабатываются и исследуются во всем мире. Применение высокопрочных композитных материалов чаще всего рассматривается при усилении растянутой зоны в изгибаемых элементах [1, 2], при этом по результатам различных исследований [3, 4] увеличение несущей способности может достигать 80-90%.

Вместе с тем не менее сложной и перспективной задачей является усиление сжатых элементов каркасных зданий и сооружений, таких как

железобетонные колонны. Исследованиями напряженно-деформированного состояния сечений сжатых железобетонных конструкций [5-7] определены пределы эффективного использования усиления из композитных материалов в зависимости от эксцентриситета приложения внешней силы и гибкости усиливаемых элементов [8, 9].

Механизм изменения напряженно-деформированного состояния бетонных сечений сжатых элементов, усиленных обоями из композитных материалов, наглядно продемонстрирован в исследованиях [10], где изучалось влияние различных типов композитных конфигураций на механические характеристики образцов бетона при осевом сжатии. При этом максимальный эффект усиления был достигнут при применении двухслойной обоймы из композита за счет совместной работы внутреннего и наружного слоя, более равномерного распределения напряжений и меньшего количества мест локализации концентрации напряжений.

Исследования, проведенные в Донском государственном техническом университете на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции» [11], позволили установить, что в момент разрушения железобетонных стоек фактические растягивающие напряжения в углехолсте не превышают 100 МПа, что находится в пределах 10% от предельного сопротивления растяжению. Установленный факт свидетельствует о том, что применяемые методы усиления железобетонных конструкций композитными материалами имеют достаточно большие резервы прочности, которые следует использовать.

Одним из способов повышения эффективности при использовании композитных материалов является создание обжатия бетона путем предварительного натяжения элементов усиления.

В данном исследовании изучалось влияние предварительного обжатия, созданного путем натяжения лент из углехолста, на изменение прочностных

и деформативных характеристик бетона при сжатии. Для получения наиболее достоверных результатов испытанию на центральное сжатие подвергались бетонные образцы с минимальной гибкостью.

Научная новизна работы заключается в экспериментальном и аналитическом исследовании изменения физико-механических характеристик тяжелого бетона при осевом сжатии в условиях предварительного обжатия в поперечном направлении, преднапряженным композитом на основе углехолста.

Объектом исследования являлись бетонные элементы размером 400x100x100 мм, изготовленные из тяжелого бетона класса В25 (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид бетонного образца со скругленными углами

В целях снижения концентрации напряжений и согласно требованиям СП 164.1325800.2014 (Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования) продольные углы призм были скруглены с радиусом 20 мм.

Экспериментальные образцы изготавливались из тяжелого бетона проектной прочностью на сжатие 25 МПа. Выбор прочности бетона был обусловлен тем, что в реальных несущих строительных железобетонных конструкциях наиболее часто встречается бетон класса по прочности на сжатие В25.

Для изготовления опытных образцов использовался портландцемент марки ПЦ 500-Д20, тяжелый щебень фракции 10 мм, прочностью 140 МПа и кварцевый песок с модулем крупности 1,6..1,8. Для увеличения подвижности бетонной смеси использовалась добавка «Оптимист Суперпластификатор С 409». Состав тяжелого бетона естественного твердения на 1 м^3 приведен в табл. 1.

Таблица № 1

Состав тяжелого бетона класса В25

Расход материалов на 1 м^3 бетона, кг				Пластификатор
Цемент	Песок	Щебень	Вода	
460	657	1066	185	8,5

Для моделирования элементов усиления опытных образцов использовалась углеткань с однонаправленными волокнами производства ГК «Росатом (Юматекс)» марки CarbonWrap Tape 530/500. Основные технические характеристики согласно данным производителя: поверхностная плотность 530 г/м^2 , объемная плотность углеродного волокна $1,8\text{ г/см}^3$, прочность на растяжение не менее 4900 МПа, модуль упругости $2,45 \times 10^5$ МПа.

Согласно программе эксперимента, было изготовлено три серии образцов по три бетонных элемента в каждой. В каждой серии один образец испытывался в качестве эталонного, второй оборачивался двумя слоями углехолста, моделируя стандартное усиление, и третий подвергался предварительному обжатию полосами из углеткани.

Для создания предварительного обжатия лабораторных образцов была изготовлена экспериментальная установка (рис.2), позволяющая создавать натяжение в ленте из углехолста шириной 50 мм, обернутой вокруг бетонного элемента с предварительной пропиткой клеевым составом.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки для создания предварительного обжатия бетона

Экспериментальная установка включает в себя стальную силовую раму, движущийся элемент с устройством для захвата ленты из углехолста, механическую лебедку грузоподъемностью до 1,5 т, весы для контроля усилия натяжения ленты до 2,0 т.

С целью создания в экспериментальных образцах начальных напряжений обжатия в поперечном направлении равными 1 МПа, что

несколько превышает прочность обычного тяжелого бетона при растяжении, лента натягивалась на бетон с усилием 5 кН. При этом начальные напряжения в ленте из углехолста составляли 360 МПа.

В результате выполненных работ по созданию предварительного натяжения были созданы три серии образцов для последующего испытания на центральное сжатие (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид экспериментальных бетонных образцов

Опытные образцы испытывались на сжатие до разрушения на гидравлическом прессе П-125. Нагружение производилось поэтапно с шагом 12,5 кН, что составляло 0,05 от предполагаемого разрушающего усилия. При этом деформации измерялись по четырем граням призм индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 200 мм. Суммарная деформация на каждом этапе нагружения определялась как среднее по замерам на четырех гранях.

Максимальные напряжения в бетоне при разрушении эталонного образца достигли 21,25 МПа, определенная предельная сжимаемость составила $1,95 \times 10^{-3}$, при этом начальный модуль упругости составил 23077 МПа. Разрушение образца носило хрупкий характер (рис. 4), свидетельствующий о разрушении бетона в поперечном направлении.



Рис. 4. Эталонный образец до и после испытания

Образец оклеенный двумя слоями углехолста, моделирующий классическое усиление сжатого элемента, имел максимальные напряжения 36,25 МПа, соответствующую им предельную относительную деформацию $2,47 \times 10^{-3}$ и начальный модуль упругости 33300 МПа. При этом следует отметить, что процесс разрушения происходил плавно (рис. 5), без мгновенного разрушения, с постепенным снижением воспринимаемого

усилия и значительным увеличением сжимающих деформаций. Разрыв композитного усиления зафиксирован не был.



Рис. 5. Образец, усиленный по «классической» схеме, до и после испытания

Максимальные сжимающие напряжения в образцах с предварительным обжатием составили 45,82 МПа, предельная сжимаемость увеличилась до $4,97 \times 10^{-3}$ и начальный модуль упругости также увеличился до значения 38800 МПа. Разрушение образцов также носило плавный характер (рис. 6), максимальная зафиксированная деформация при разрушении составила $6,5 \times 10^{-3}$. Физическое разрушение произошло в результате локального смятия бетона вблизи контактной поверхности с плитой прессы.



Рис. 5. Образец, усиленный с предварительным обжатием, до и после испытания

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показывает, что создание предварительного обжатия в поперечном направлении существенно изменяет напряженно-деформированное состояние бетонного сечения при последующем сжатии. Полученные результаты хорошо согласуются с данными [8 – 10]. Так, если «классический» вариант обоймы из углекомпозитного материала в два слоя без преднапряжения, увеличивает прочность бетона до 76%, а предельную деформативность до 27%, то создание предварительного напряжения в поперечном направлении с

величиной 1 МПа, увеличивает прочность бетона более чем в два раза (на 115%) и при этом предельная сжимаемость повышается на 154%.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о положительном влиянии предварительного обжатия в поперечном направлении на изменение физико-механических характеристик бетона и продолжении исследований на железобетонных конструкциях.

Литература

1. Rubin Oleg, Kozlov Dmitry, Antonov Anton, Zhang Junhao. Strengthening of Reinforced Concrete Hydraulic Structures with External Reinforcement System Made of Carbon Fiber-Based Composite Materials with Development of Calculation Recommendations. // Buildings, 2024, 14(12), P. 3739.
2. Sha Lirong, Zhang Ao. Static Load Test and Finite Element Analysis of Phosphogypsum Concrete Composite Slabs. // Buildings, 2025, 15(7), P. 1122.
3. Abid S.R.; Al-Lami K. Critical review of strength and durability of concrete beams externally bonded with FRP. // Cogent Eng., 2018, 5, P. 1525015.
4. Lee C., Bae B., Kim, S., Kim T. Experimental Study on the Flexural Performance of Composite Beams with Lipped Channels. Materials, 2024, 17, P. 6128.
5. Sanginabadi K., Yazdani A., Mostofinejad D., Czaderski C. Bond behavior of FRP composites attached to concrete using EBROG method: A state-of-the-art review // Compos. Структура. 2022, 299, 116060. Pp. 6-12.
6. Bedirhanoglu I., Ilki A., Triantafillou T.C. Seismic Behavior of Repaired and Externally FRP-Jacketed Short Columns Built with Extremely Low-Strength Concrete // J. Compos. Констр. 2022, 26, 04021068. Pp. 15-18.

7. Breveglieri M., Czaderski C. Reinforced concrete slabs strengthened with externally bonded carbon fibre-reinforced polymer strips under long-term environmental exposure and sustained loading. Part 1: Outdoor experiments. // Compos. Part C Open Access 2022, 7, 100239. Pp. 3-13.

8. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О несущей способности усиленных коротких стоек при больших эксцентриситетах // Инженерный вестник Дона, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2631.

9. Польской П.П., Георгиев С.В. Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов // Инженерный вестник Дона, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826.

10. Li Z., Hao G., Du H., Fu T., Liu D., Huang Y., Ji Y. Composite Fiber Wrapping Techniques for Enhanced Concrete Mechanics. // Polymers 2024, 16, P. 2820.

11. Шилов Д.А., Веремеенко А.А., Шилов А.В., Маилян Д.Р. Численное моделирование напряженно - деформированного состояния сжатых железобетонных стоек, усиленных композитными материалами // Инженерный вестник Дона, 2024, № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/5y24/9219.

References

1. Rubin Oleg, Kozlov Dmitry, Antonov Anton, Zhang Junhao. Buildings. 2024, 14(12), 3739.
 2. Sha Lirong, Zhang Ao. Buildings. 2025, 15(7), 1122.
 3. Abid S.R., Al-Lami K. Cogent Eng. 2018, 5, 1525015.
 4. Lee C., Bae B., Kim,S., Kim T. Materials, 2024, 17, P. 6128.
-



5. Sanginabadi K., Yazdani A., Mostofinejad D., Czaderski C. Compos. Структура. 2022, 299, 116060. Pp. 6-12.
6. Bedirhanoglu I., Ilki A., Triantafillou T.C. J. Compos. Констр. 2022, 26, 04021068. Pp. 15-18.
7. Breveglieri M., Czaderski C. Compos. Part C Open Access 2022, 7, 100239. Pp. 3-13.
8. Polskoy P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2631.
9. Polskoy P.P., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826.
10. Li Z., Hao G., Du H., Fu T., Liu D., Huang Y., Ji Y. Polymers 2024, 16, 2820.
11. Shilov D.A., Veremeyenko A.A., Shilov A.V., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/5y24/9219.

Дата поступления: 10.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025