МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ ИЗ УГЛЕВОЛОКНА

Рязанцев Василий Юрьевич
Специалист отдела Construction транспортная инфраструктура и усиление конструкций ООО "Зика", г. Екатеринбург

Беляев Вадим Анатольевич
Специалист отдела Construction транспортная инфраструктура и усиление конструкций ООО "Зика", г. Москва

Экспериментальная оценка эффективности усиления железобетонных конструкций элементами внешнего армирования из углеволокна

В настоящее время в России растет интерес к усилению конструкций, поврежденных в результате механического воздействия. Степень пригодности здания или сооружения может варьироваться в широких пределах от частично работоспособного до аварийного. Повреждения железобетонных конструкций, полученные в результате сейсмического воздействия, представляют особый интерес после того, как по целому ряду регионов России повышаются требования к сейсмостойкости.

Традиционные методы усиления путем наращивания сечений или изменения расчетной схемы порой ухудшают характеристики сейсмостойкости здания, приводят к возникновению дополнительных зон ослаблений и концентраторов напряжений.

Рассмотрим эксперимент по применению элементов внешнего армирования из углеродного волокна, которые закрепляются на конструкции путем приклеивания на высокопрочные эпоксидные клеи. Такой метод монтажа элементов усиления на поврежденной конструкции не противоречит дополнительным мерам по восстановлению сечений, но не приводит к дополнительному повреждению конструкции в местах анкеровки.

Установка элементов внешнего армирования в виде углеродных холстов типа *SIKAWRAP* (однонаправленный холст с механическими характеристиками: E_{carbon}=238000 МПа) имела цель не допустить развитие повреждений в виде силовых трещин, полученных в ходе загружения.

Приведенные ниже результаты являются первым этапом в программе исследований, разработанной специалистами *НИЦ 26 ЦНИИ* и *НИИЖБ, ЦНИИСК.*

Целью исследований, проведенных на статическом силовом стенде, была оценка влияния элементов внешнего армирования на несущую способность объемного блока (рис.1 и 2) и на перераспределение усилий в элементах исследуемой конструкции.

Рис. 1. Объемный железобетонный блок, предназначенный для испытаний

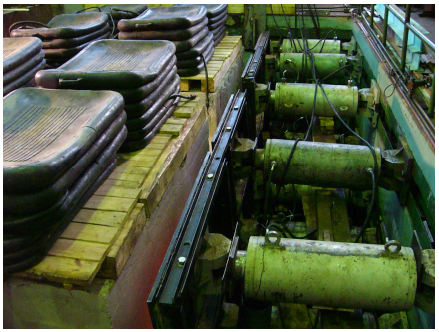

Рис. 2. Размещение моделей в силовом стенде
для создания горизонтальной статической нагрузки

Испытания проводились в два этапа.

На первом этапе объемный железобетонный блок нагружался вертикальной равномерно распределенной нагрузкой до получения характерной картины трещин для плиты перекрытия блока, как опертой по контуру, и горизонтальной нагрузкой, создаваемой домкратами в уровне верхней грани, до появления трещин в бетоне конструкции и достижения максимальных значений усилий на домкратах. Схема нагружения условно представлена на рис. 3, на рис. 4 показано характерное разрушение в виде трещины объемного железобетонного блока после снятия нагрузки.

Образцы фиксировались от опрокидывания в уровне основания специальной траверсой из стального профиля.

Полученные в ходе испытаний формы разрушения носят смешанный характер, поскольку являются результатом наложения двух последовательно прикладываемых систем нагрузок. Образцы перестали воспринимать нагрузку после значительного раскрытия трещин (более 5 мм) и отслоения защитного слоя.

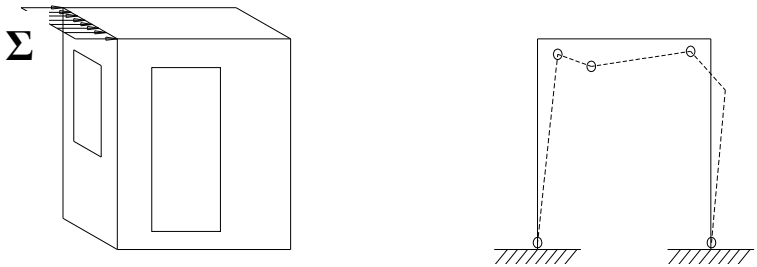

Рис. 3. Схема нагружения статической нагрузкой объемного железобетонного блока

Рис. 4. Характерные повреждения железобетонного блока после достижения максимальных усилий

В отличие от традиционного подхода к усилению элементами внешнего армирования, когда до установки элементов усиления восстанавливают сплошность и первоначальные габариты сечения путем инъектирования трещин и заполнения сколов ремонтными растворами, элементы внешнего армирования были установлены непосредственно на образец без какого либо дополнительного ремонта.

На втором этапе, после усиления моделей элементами внешнего армирования из углеродного волокна все повторялось (рис.5). При этом фиксировались перемещения в выбранных точках блоков и максимальные усилия на домкратах (рис.6).

В результате испытаний было установлено, что использование углепластиковых полотен в качестве элементов усиления является эффективным и позволяет восстанавливать несущую способность поврежденных конструкций практически до первоначальных значений. Усиленный блок способен воспринимать внешнюю нагрузку, составляющую 90% от максимальной, при которой произошло разрушение неповрежденной конструкции.

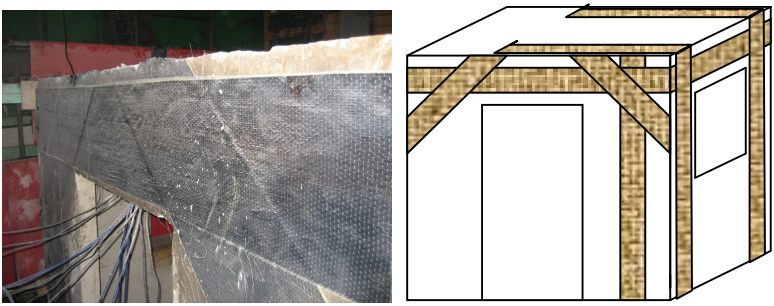

Рис. 5. Блоки, усиленные углепластиками,
после повторного нагружения

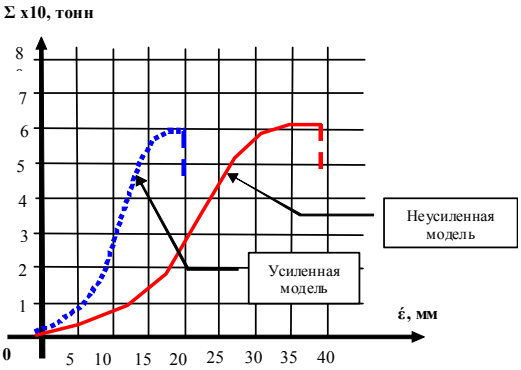

Рис. 6. Диаграмма нагружения. По оси ординат – усилия на домкратах, т;
по оси абсцисс – горизонтальные перемещения, мм

К вопросу усиления железобетонных и бетонных элементов мостов

Потребность в усилении железобетонных пролетных строений обычно возникает в связи с необходимостью повышения их несущей способности по нормальным и главным растягивающим напряжениям. Несущая способность пролетных строений зависит от их срока эксплуатации и технического состояния.

С использованием базы данных Автоматизированной информационно-аналитической системы управления техническим состоянием искусственных сооружений (*АСУ ИССО*) [1] произведен анализ конструкций и технического состояния железобетонных пролетных строений, эксплуатируемых на сети железных дорог России.

По данным *АСУ ИССО* на 01.11.2007 г., на сети железных дорог России эксплуатируется около 37000 шт. железобетонных пролетных строений, запроектированных под нагрузки 1907, 1925, 1931 (Н7 и Н8), 1962 (С14) гг. На первом месте по распространенности стоят пролетные строения, запроектированные под нагрузку С14 1962 г. (45%), далее расположились пролетные строения под нагрузки Н8 (39%), Н7 (7%), 1907 г. (4%) и 1925 г. (2%) (рис.7).

Нормативный срок эксплуатации железобетонных пролетных строений составляет 70 лет. На сети железных дорог эксплуатируется 18% пролетных строений, срок эксплуатации которых превышает нормативный. Техническое состояние конструкций во многом определяется их сроком и условиями эксплуатации. Среди показателей условий эксплуатации отметим грузонапряженность линии, климатический регион расположения сооружения, возвышение пролета над уровнем земли или межени воды, а также прочие факторы, такие как сейсмичность района, наличие агрессивных сред и др. Эксплуатация мостов включает в себя следующие основные элементы: постоянные надзор и уход; систему осмотров; технический учет; содержание; планово-предупредительный ремонт (текущий ремонт); капитальный ремонт; реконструкцию; замену мостов; планирование мостовых работ; проектирование ремонтных и строительных работ; систему контроля всех видов проводимых работ.

Пролетные строения имеют дефекты и повреждения, образование и развитие которых обусловлено их конструктивными и технологическими особенностями и условиями эксплуатации. В табл.1 приведены данные об основных дефектах и повреждениях несущих конструкций пролетных строений.

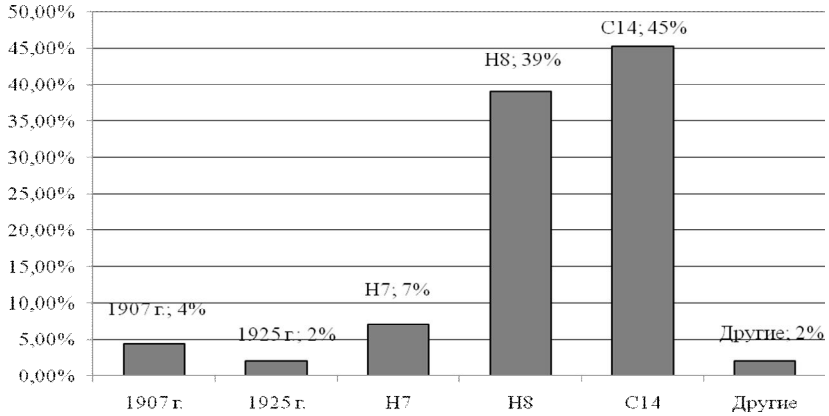

Рис. 7. Пролетные строения по расчетным нормам

Таблица 1

Неисправности железобетонных пролетных строений

Дефекты и повреждения	Число пролетных строений (%) от общего количества каждого их типа под различную нагрузку			
	1907 г.	1925 г.	1931 г.	1962 г.
Бетон низкой прочности (меньше 10 МПа)	0,07	0,27	0,24	0,04
Раковины в бетоне	2,04	2,79	2,64	0,71
Недостаточный защитный слой арматуры или его отсутствуе	3,49	4,51	2,36	0,53
Выщелачивание цементного камня	10,47	13,13	10,61	4,41
Морозное разрушение бетона	0,79	1,19	1,34	0,37
Коррозия рабочей арматуры	0,72	1,19	0,27	0,10
Трещины, изменяющие раскрытие под нагрузкой	0,26	0,13	0,23	0,07
Трещины, не изменяющие раскрытие под нагрузкой	9,03	10,34	5,94	2,84
Нарушение гидроизоляции (промокания)	1,38	3,05	0,72	0,65

Как видно из табл.1, наибольшее количество неисправностей имеют пролетные строения, запроектированные под нагрузку 1907, 1925 и 1931 гг. (52% пролетных строений от общего количества), что может быть связано в первую очередь с большим сроком их эксплуатации. Самыми распространенными неисправностями пролетных строений являются: выщелачивание цементного камня (8%); трещины, не изменяющие величину раскрытия под нагрузкой (5%); раковины в бетоне (2%); недостаточный или отсутствующий защитный слой рабочей арматуры (2%). Имеющиеся неисправности со временем могут привести к существенному снижению грузоподъемности пролетных строений. С каждым годом грузонапряженность железнодорожных линий увеличивается, в планы компании *ОАО «РЖД»* входит введение в эксплуатацию новых локомотивов с нагрузкой на ось, превышающей нормативную нагрузку Н8. В перспективные планы входит и повышение скоростей движения поездов. Встает вопрос о необходимости повышения грузоподъемности поврежденных железобетонных пролетных строений.

Основным способом реконструкции железобетонных мостов старых лет проектировки на сети железных дорог России является замена старых

пролетных строений на новые. За последние шесть лет было заменено около 1314 пролетных строений, в среднем 219 в год. Результаты анализа технического состояния эксплуатируемых пролетных строений свидетельствуют, что в ближайшие годы может возникнуть необходимость в замене 30% пролетных строений. Основываясь на количественных показателях замен пролетных строений, выполненных в предыдущие годы, можно подсчитать, что на замену всех старых пролетных строений может потребоваться не менее 50 лет. Без сомнений, таким видом реконструкции трудно решить проблему повышения грузоподъемности железобетонных пролетных строений. Одним из способов решения может стать усиление основных несущих конструкций мостов с использованием новых материалов.

На практике усиление железобетонных пролетных строений чаще всего производят путем увеличения их поперечного сечения добавлением нового материала (арматуры, бетона) и реже – путем изменения статической схемы моста, подведением шпренгелей. Небольшое усиление – до 15% по нормальным напряжениям достигается добавлением растянутой арматуры поясов главных балок. Значительно большее усиление железобетонных пролетных строений (до 15-35%) обеспечивается приваркой дополнительного арматурного каркаса, состоящего из продольных и наклонных стержней и коротких хомутов, и увеличением таким образом высоты сечения главных балок. Трудоемкость установки арматурного каркаса заключается в сложности обеспечения его связи с существующей арматурой. В случае усиления пролетных строений по главным растягивающим напряжениям балки заключают в железобетонные оболочки с толщиной стенок не менее 5 см, армируя их отогнутыми стержнями и хомутами. Возможность усиления железобетонных пролетных строений изменением их расчетной схемы по сравнению с металлическими пролетными строениями крайне ограничена. Для железобетонных пролетных строений при изменении их статической схемы необходимо обеспечить совпадение знаков эксплуатационных эпюр внутренних усилий до и после усиления. Из всех известных решений этому в наибольшей степени отвечают шпренгельные конструкции усиления. Работы по устройству шпренгельных конструкций сложные и трудоемкие, их должны выполнять рабочие высокой квалификации. Так же есть разработки в направлении усиления железобетонных пролетных строений стальными элементами (листами и прокатами). В этих решениях используется принцип внешнего армирования путем наклейки стальных элементов на поверхность усиливаемого элемента при помощи наклонных и вертикальных тяг.

Можно определить несколько существенных недостатков усиления пролетных строений с использованием арматурного каркаса, железобетонных оболочек и металла. Некоторые из них – это большой собственный вес материалов усиления, плохая связь элементов арматурного

каркаса усиления с существующей арматурой балок пролетного строения, неустойчивые к коррозии металл и бетон, возможность затруднения дальнейшей эксплуатации пролетных строений.

Необходимость в усилении опор в основном может возникнуть в связи с неудовлетворительным физическим состоянием их кладки, когда методом капитального ремонта невозможно восстановить прочность опоры до требуемых значений, а также при недостаточной грузоподъемности конструктивных элементов (тела и фундаментов опоры) ограничивающий пропуск более тяжелых нагрузок. На сети железных дорог в основном возводились массивные конструкции промежуточных опор. Как правило, такие конструкции имеют большой запас прочности. Необходимость их усиления или переустройства может возникнуть в крайне редких случаях.

За последние несколько лет в России при усилении железобетонных мостов стали применять композитные (составные) материалы − искусственные материалы, содержащие различного рода волокна. Основные физико-механические характеристики волокон приведены в табл.2.

Таблица 2

Характеристики волокон

Материал	Модуль упругости E, ГПа	Предел прочности при растяжении, $\sigma_г$, МПа	Деформация при разрыве $\varepsilon_г$, %
E-стекло	70 – 80	2000 – 3500	3,5 – 4,5
Углеволокно (высокоупругое)	390 – 760	2400 – 3400	0,5 – 0,8
Углеволокно (высокопрочное)	240 – 280	4100 – 5100	1,6 – 1,73
Арамид-волокно	62 – 180	3600 – 3800	1,9 – 5,5
PBO	270	5800	2,1

Есть много преимуществ использования таких систем усиления, некоторые из них – это малый собственный вес, хорошие механические характеристики, коррозионная стойкость. Композитные материалы для строительного усиления доступны в различных геометрических формах от ламинатов, используемых для усиления элементов с плоской ровной поверхностью, до тканевых, которые легко повторяют форму усиливаемых элементов. Композитные материалы так же удобны для применения в случаях, когда необходимо сохранить внешний вид усиливаемых конструкций (памятники архитектуры и истории) или когда традиционные технологии усиления становятся неэффективными.

В строительстве преимущественно применяют композитные материалы, состоящие из стеклянных волокон, угольных волокон, арамидных волокон и волокон РВО (полипарафениловые бензобисокзали). С физической точки зрения при усилении перспективно применять композиты на основе угольных волокон и волокон РВО, так как они наряду с высоким пределом прочности при разрыве имеют модуль упругости не ниже, чем у стальной арматуры (см. табл.2). Суть метода усиления заключается в установке композитных лент или тканей на тщательно подготовленной поверхности усиливаемого элемента при помощи эпоксидных смол. Зарубежный опыт показывает, что усиление пролетных строений с использованием современных композитных материалов экономичнее по сравнению с традиционными методами усиления. Технология проста и не требует использования кранового оборудования и временных опор.

Технико-экономическая эффективность внедрения технологии складывается из экономии средств при применении усиления железобетонных пролетных строений вместо их замены на новые конструкции. Стоимость замены одного железнодорожного пролетного строения составляет 8-16 млн руб. Стоимость усиления одного железобетонного пролетного строения современными композитными полимерными материалами составляет 1-2 млн руб. Экономия средств на одно пролетное строение может составлять 7-14 млн руб. При потребности в замене железобетонных пролетных строений по причине недостаточной грузоподъемности 15-25 шт. в год на одной железной дороге экономический эффект на одной железной дороге может составить 140 млн руб.

Вывод

Анализ отечественного и, главным образом, зарубежного опыта указывает на явную целесообразность и экономическую эффективность применения композитных материалов при усилении несущих конструкций. Технология имеет все шансы занять ведущее место на российском рынке и потеснить традиционные методы усиления.

Библиографический список

1. Экспериментальная оценка эффективности усиления железобетонных конструкций элементами внешнего армирования из углеволокна / С.Н. Савин, А.Л. Мочалов, В.С. Беляев, С.В. Демишин, М.В. Савина, А.А. Ковалев, А.В. Грановский, А.В. Пасюта // УДК 69.058; 624.011.78.
2. Бокарев С.А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений на основе новых информационных технологий. – Новосибирск, 2002. – 281 с.

3. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. – Rome, 2004. – 144 с.
4. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы. – М., 1996. – 214 с.
5. Разработка рекомендаций по применению композитных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений: Отчет о НИР / ФГУП «РОСДОРНИИ», руководитель В.И. Шестериков – контракт № 5-Н от 24.09.2007 г.; этапы №2 и №3. – М., 2007 – 100 с.
6. Кондращенко В.И., Ярмаковский В.Н., Гузенко С.В. О применении конструкционных легких бетонов в мостостроении // Транспортное строительство. – 2007. - №9. – С.10-13.
7. Рыбалов Ю.В. Перспективная технологическая модель информационного обеспечения системы управления содержанием мостовых сооружений на автомобильных дорогах // Вестник СГУПС. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2006. – Вып.13. – С.103-110.
8. Корчинский И.Л.,. Бороздин Л.А. и др. Сейсмостойкое строительство зданий. – М.: Высшая школа, 1971.
9. Руководство. Проектирование сейсмостойких зданий. Т.3 / Под ред. С.В. Полякова. – М.: СН, 1971.
10. Васильев А.П., Быченков Ю.П., Тябликов Ю.Е. Прочность стыков и узлов железобетонных каркасов многоэтажных зданий при нагрузках типа сейсмических // Бетон и железобетон, 1968, №8.
11. Meier H. CFK — Schubverstarkungselemente. Si+A Heft, Nr.43, 1998.
12. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: Стройиздат, 2004, 144с.
13. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования.