

Расчет усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами

Магистр ГОУ СПбГПУ А.А. Дьячкова, профессор ГОУ СПбГПУ В.Д. Кузнецов*

В последние годы проблеме обеспечения надежности строительных конструкций на всех стадиях их возведения и эксплуатации, особенно в случае их ремонта и усиления, уделяют значительное внимание как российские, так и зарубежные исследователи. Это связано с растущей необходимостью обеспечить надежную эксплуатацию уникальных, дорогих, исторически значимых конструкций, демонтаж и замена которых значительно дороже ремонта или невозможна вообще. Повреждения железобетонных конструкций, как правило, связаны с коррозией, перегрузкой отдельных элементов и неправильной эксплуатацией, ошибками проектирования и производства работ.

Усиление строительных конструкций композитными материалами является на сегодняшний день самым «бережным» методом восстановления и повышения эксплуатационных характеристик строительных конструкций. Вместе с тем в отечественной научно-технической литературе до настоящего времени отмечается лишь незначительное количество обобщающих публикаций по этому типу усиления.

Исторически применение технологии внешнего армирования в нашей стране связано с железобетонными конструкциями мостов. Впервые в России элементами из углеволокна были усилены практически одновременно эстакада, входящая в состав третьего транспортного кольца Москвы (фирмой «Триада-Холдинг»), и железнодорожный мост в г. Домодедово Московской области (фирмой «Практик») [1].

Важным качеством композиционных материалов, имеющим существенное значение при выборе системы усиления железобетонной конструкции, является их упругое деформирование, вплоть до разрушения: они не обладают пластическими свойствами, и их разрушение носит хрупкий характер. В силу этого при проектировании усиления железобетонных элементов композиционными материалами необходимо накладывать ограничения на величину упругих деформаций бетона и стали, работающих совместно с композиционным материалом. Также необходимо иметь в виду, что упругий характер деформирования композиционного материала не способствует перераспределению напряжений в усиливаемой конструкции [2].

Применение композиционных материалов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами усиления:

- высокая прочность на растяжение;
- коррозионная стойкость;
- простота применения;
- высокая усталостная прочность;
- отсутствие размерных ограничений.

Выбор типа композиционного материала для усиления определяется условиями эксплуатации и назначением усиливаемой конструкции. Для усиления железобетонных конструкций применяются элементы в виде лент и холстов. Механические характеристики элементов внешнего армирования варьируются в следующих пределах: модуль упругости 70000-640000 МПа, прочность на растяжение 1700-4800 МПа [1].

При усилении железобетонных конструкций с применением лент необходимо решить проблему анкеровки ленты на конструкции, что приводит к необходимости устройства закладных деталей — стальных или из углехолста.

Наиболее распространенное решение при усилении железобетонных конструкций с применением углеволокна — расположение элемента внешнего армирования со стороны наиболее растянутого волокна в пролетной зоне изгибаемых конструкций, хотя имеется успешный опыт усиления сжатой зоны. В зоне действия пролетных моментов могут устанавливаться как ленты, так и холсты. В последнее время имеет место тенденция широкого распространения холстов. Это связано с их более высокими механическими характеристиками, простотой монтажа и надежностью анкеровки.

Важной областью применения элементов внешнего армирования является усиление приопорных участков в зоне действия поперечных сил. В этих зонах, как правило, располагают углехолсты вдоль линии главных растягивающих напряжений. Их можно наклеивать в несколько слоев и формировать любые сечения, необходимые по расчету.

Применение элементов внешнего армирования для усиления сжатых, внецентренно сжатых железобетонных элементов типа колонн, пилонов, простенков производится двумя способами. Во-первых, для усиления «коротких» элементов (с соотношением высоты к габариту поперечного сечения не более 10) эффективно устройство бандажей из углехолста, создающих «эффект обоймы» по типу косвенного

армирования. Во-вторых, установка углехолста вдоль сжатого элемента является дополнительной рабочей арматурой.

В данной работе предложен метод расчета усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами на основе конечно-элементной модели в ПК SCAD Office с применением идеи преднапряжения конструкции, реализуемой через режим «Монтаж».

В некоторых случаях для изгибаемых железобетонных конструкций возможно использование предварительно напряженных композиционных материалов. Применение предварительно напряженных полос композиционного материала имеет ряд преимуществ в сравнении с ненапрягаемыми: увеличивается момент сопротивления усиливаемой конструкции, замедляется процесс трещинообразования, требуется меньшая площадь сечения материала усиления, увеличивается допустимая нагрузка на железобетонную конструкцию. Но к значительным недостаткам можно отнести: увеличение стоимости и трудоемкости из-за усложнения технологии работ, применение дополнительного оборудования и увеличение продолжительности работ.

Введение идеи преднапряжения за счет включающихся в совместную работу с усиливаемой конструкцией разгружающих элементов сопровождается изменением первоначальной расчетной схемы конструкции (т.е. повышением степени внешней статической неопределимости или изменением места передачи нагрузки) и/или ее напряженного состояния.

При этом различают разгружающие элементы жесткие, или неподатливые, и гибкие, имеющие упругую податливость. К первым относятся элементы усиления, жесткость которых мало отличается от жесткости усиливаемой конструкции, ко вторым — элементы, жесткость которых значительно меньше жесткости усиливаемой конструкции.

Жесткие разгружающие элементы применяются в тех случаях, когда необходимо значительное увеличение нагрузки после усиления конструкции и когда не представляется возможным осуществить их достаточное предварительное напряжение. Гибкие элементы используются для усиления конструкций, на которые действует в основном постоянная нагрузка, и когда усиление выполняется при полном или почти полном загрузении конструкции.

Режим «Монтаж» предназначен для моделирования поведения конструкции (определения ее напряженно-деформированного состояния) в процессе возведения. Процесс возведения сооружения и, соответственно, расчет разбивается на несколько этапов (стадий монтажа). Расчет каждого следующего этапа выполняется с учетом напряженно-деформированного состояния конструкции, определенного по результатам расчета предыдущих этапов. При переходе от одной стадии к другой в программе предусмотрена возможность включения и исключения из модели элементов конструкции, учет различного типа статических и динамических нагрузок, изменение модуля упругости материала, условий опирания и примыкания. По результатам расчета могут быть получены расчетные сочетания усилий, комбинации загружений, выполнен подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций.

Основные расчетные положения:

- при проектировании усиления железобетонных конструкций так же использовался метод расчета по предельным состояниям;
- система усиления спроектирована на восприятие растягивающих усилий с учетом совместной деформации внешней арматуры и бетона конструкции;
- в предельном состоянии изгибаемого элемента усилия в сжатой зоне воспринимаются бетоном и сжатой стержневой арматурой, а в растянутой – стержневой арматурой и внешней композитной арматурой;
- учитывается, что несущая способность конструкции достаточна для восприятия постоянной и ограниченной временной нагрузки в случае повреждения системы усиления по каким-либо причинам.

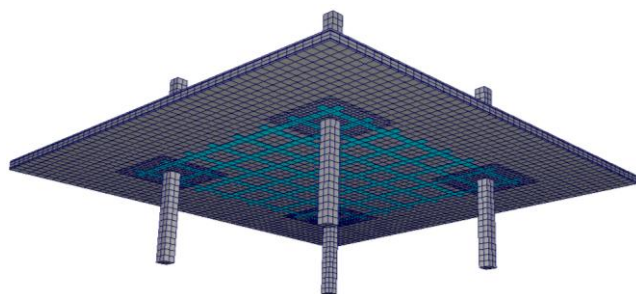


Рисунок 1. Общий вид расчетной схемы в ПК SCAD Office

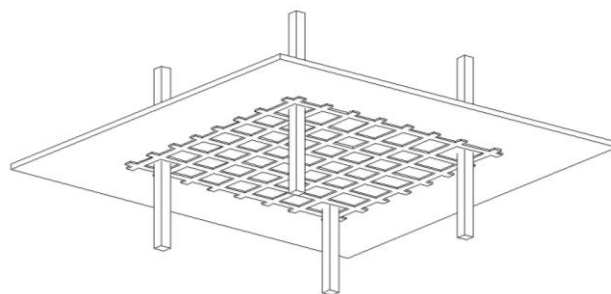


Рисунок 2. Схема усиления пролета плиты углепластиком SikaWrap 530(C)

В качестве объекта исследования выбран фрагмент каркасной конструктивной схемы здания в пределах одного пролета в двух направлениях (рис. 1, 2): безбалочная монолитная железобетонная плита перекрытия толщиной 300 мм, монолитные железобетонные колонны сечением 400x400 мм, шаг колонн 7,5 на 7,5 м. Принятый пролет 7,5 м обусловлен более наглядными результатами исследования: большими деформациями вследствие увеличения нагрузки, очевидным вовлечением в работу элементов системы усиления, получением характерных зависимостей напряженно-деформированного состояния.

Принципиальная схема усиления плиты такова: наклейка на нижнюю поверхность накладок композитной арматуры (углепластика) с направлением волокон вдоль оси конструкции и поверх них поперечных накладок с направлением волокон перпендикулярно продольным накладкам. Включение в работу внешнего армирования из углепластика в эксплуатационном состоянии происходит за счет применения системы предварительного напряжения. Эта система позволяет прогнуть плиту вверх (напрячь), затем приклеить внешнюю арматуру, которая впоследствии воспримет на себя растягивающие усилия и обеспечит несущую способность усиливаемой плиты. Каждый этап усиления конструкции моделируется в режиме «Монтаж».

Система усиления из композитных материалов представляет собой ткани из углеродных волокон Sika Wrap530C(VP) (толщина – 0,293мм, ширина – 300мм, вес – 530 г/м²; модуль упругости – 231000 Н/мм²; прочность на растяжение – 3800 Н/мм²; деформация при разрыве – 1,64%; плотность – 1,8г/см³) и эпоксидный клей Sikadur-330 (прочность на сжатие – 65 Н/мм²; прочность на срез – 6 Н/мм²; адгезия к бетону 4 Н/мм²; деформация при разрыве – 1,64%; модуль Юнга – 3800 Н/мм²) [3, 4].

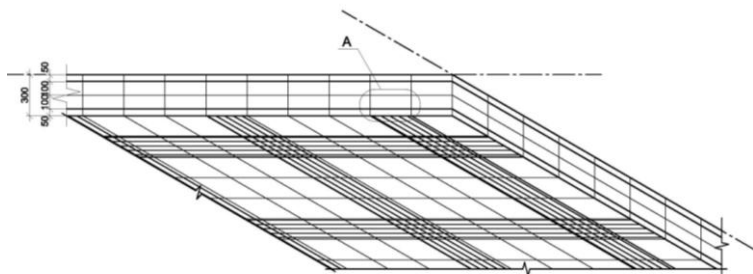


Рисунок 3. Фрагмент плиты с углепластиком: схема в МКЭ

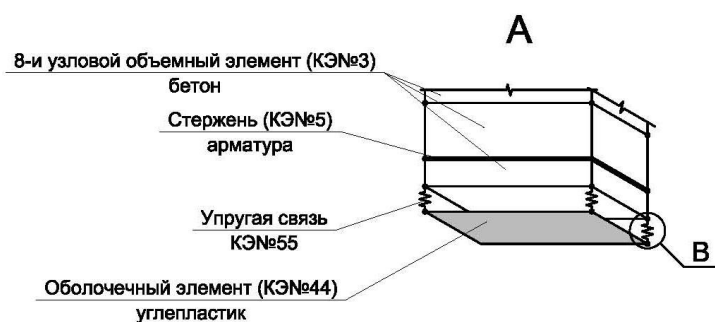


Рисунок 4. Фрагмент конечно-элементной расчетной схемы

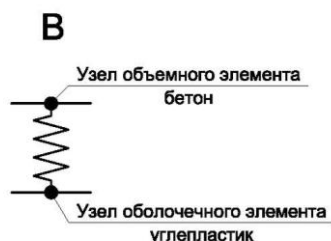


Рисунок 5. Упругая связь в МКЭ, моделирующая сцепление между бетоном и углепластиком

Были рассчитаны две модели: железобетонной плиты без усиления и с системой усиления из композиционных материалов. В результате было получено уменьшение вертикальных деформаций и растягивающих напряжений в бетоне во второй модели до уровня, соответствующего требованиям нормативных документов. Уже на последнем этапе «Монтажа», когда в работу схемы включился углепластик и

С учетом свойств отдельных компонентов усиления пролетной части плиты в программе задаются свойства не отдельно ткани и клея, а свойства ткани, пропитанной клеем, при толщине слоя 1 мм согласно данным производителя: модуль упругости – 63000 Н/мм². Сетка из углепластиковых пластин была принята с шагом 1200 мм в двух направлениях, т.к. примером послужила плита, работающая в двух направлениях.

В свою очередь, модуль упругости бетона был снижен в 3,5 раза в соответствии с рекомендациями СП 52-101-2003 (учет ползучести бетона при длительном действии нагрузки) и составил для бетона класса В25 8571 МПа [5].

Набор конечных элементов, моделирующих расчетную схему в SCAD Office (рис. 3-5):

- объемный конечный элемент – 3-й тип КЭ – несущие железобетонные колонны и перекрытие;
- оболочечный конечный элемент – 44-й тип КЭ – внешние холсты из углепластика;
- специальный конечный элемент – 55-й тип КЭ, моделирующий упругую связь между узлами и учитывающий податливость материала между смежными узлами;
- пространственный стержень – 5-й тип КЭ, моделирующий арматурные стержни.

нагрузка была приложена только лишь от собственного веса конструкции, значение вертикальных деформаций уменьшилось примерно на 1,1%, а растягивающих напряжений – на 1,5% по сравнению с начальным напряженно-деформируемым состоянием плиты до монтажа системы усиления из углепластика (рис. 6, 7).

Разрабатываемый расчетный метод усиливаемых железобетонных конструкций (плит) позволяет получать более точную картину напряженно-деформированного состояния конструкции до усиления и после усиления, в отличие от традиционного ручного расчета. По результатам расчета возможен подбор более адекватной схемы усиления – за счет изменения геометрии или жесткостных характеристик углепластика.

Показано, что применение методики расчета позволяет повысить качество проектирования усиления железобетонных плит, сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.

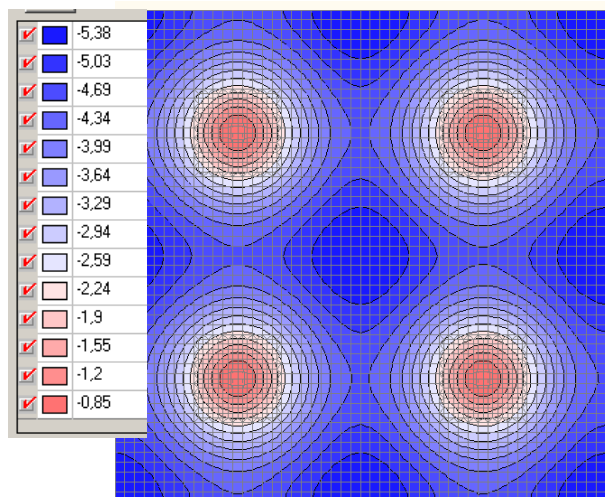


Рисунок 6. Вертикальные деформации от собственного веса плиты без системы усиления

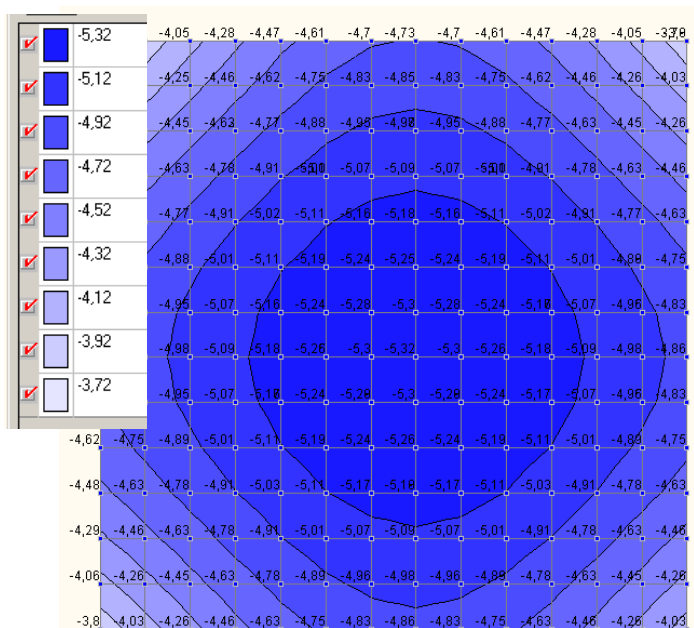


Рисунок 7. Вертикальные деформации от собственного веса плиты с системой усиления из углепластика (фрагмент центральной пролетной части)

Литература

1. Строительная компания «Практик» // <http://www.usilenie.ru>.
2. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М., 2007.
3. Технологическая карта ID №02 04 01 02 001 0 000xxx SikaWrap®-530C (VP) // www.sika.ru.
4. Технологическое описание материала ID №02 04 01 04 001 0 000004 Sikadur-330 // www.sika.ru.
5. СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры».

**Антонина Алексеевна Дьячкова, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Тел. моб.: +7(911)287-48-39

Эл. почта: antonina2004@list.ru