

Кондратчик А.А., Марчук В.А., Третьяк С.В.

КОСВЕННОЕ АРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

Введение

Идея увеличения прочности бетона за счет сдерживания его поперечных деформаций при действии продольной силы появилась давно: Консидер М. (1900г. – спираль Консидера); Абрамов Н.М. (1904г. – проволочные переплеты); Некрасов В.П. (1907г. – сетки); Передерий Г.П. (бетон в трубе); Гитман Ф.Е.(СССР) и Маней (США) (1944-1951гг. – первые опыты с преднапряжением поперечной арматуры [1]. Поперечное армирование бетона было предложено французским ученым Консидером, который обнаружил «эффект сдерживания» при испытании образцов на осевое сжатие совместно с приложением бокового гидростатического давления. Пассивное ограничение поперечных деформаций происходит при непосредственном проявлении последних благодаря силам сцепления любого вида поперечной арматуры с бетоном в сечении.

Идея использования косвенной арматуры в элементах из напрягающего бетона предполагает создание внутреннего напряженного состояния в сечении (самонапряжения) до приложения внешней нагрузки, т.е. создания активного противодействия поперечным деформациям.

Косвенная арматура в элементах из бетона на портландцементе

В МИСИ совместно с НИИЖБ Поповым Н.Н., Трекиным Н.Н. и Матковым Н.Г. [2] были исследованы призмы с косвенным армированием, испытали шесть серий призм размером 20х20х80 см, армированных продольной арматурой из стали класса Ат-VI и поперечной арматурой в виде сварных сеток из арматурной стали класса А-III. Каждая серия опытных образцов отличалась процентом продольного и поперечного армирования и призменной прочностью бетона.

В результате проведенных опытов следует, что с увеличением поперечного (косвенного) армирования, при постоянном продольном армировании ($\mu_e = 1.6\%$), деформации, соответствующие максимуму несущей способности элемента, возросли в три раза и достигли 1,5% для образцов с наибольшим косвенным армированием ($\mu_{xy} = 5.4\%$).

Анализ деформирования показал, что сетки поперечного армирования влияют на работу призм при сжатии не с момента приложения нагрузки а с уровня напряжений $(0.4...0.6)R_{b,red}$. Эта стадия относится к началу образования микротрещин в бетоне и интенсивному приросту поперечных деформаций. Чем мощнее косвенное армирование, тем в большей степени оно препятствует росту поперечных деформаций бетона, сдерживая процесс разрушения. Наличие же продольной высокопрочной арматуры повышает продольные предельные деформации образцов. В призмах с косвенным армированием ($\mu_{xy} = 5.4\%$) при увеличении продольного армирования с 0 до 3,3% предельные продольные деформации соответствующие максимальной нагрузке, возросли на 50%.

Исследование напряженно-деформированного состояния бетона, армированного поперечными сетками, проводилось

Васильевым И.П., Матковым Н.Г. и Филипповым Б.П.[3] в лаборатории железобетонных конструкций НИИЖБ на коротких колоннах сечением 210 х 390 мм из бетона марок 400, 600 и 750 с продольной арматурой 4 \varnothing 14 А-III и 4 \varnothing 25 А-III. Поперечные сетки изготавливались из арматуры класса А-III диаметром 6-14 мм с ячейками $a_1 \times a_2 = 45 \times 45, 60 \times 60, 90 \times 90$ мм. Сетки устанавливались с шагом $S=60-100$ мм.

В результате исследований было выявлено, что предельная деформативность бетона повышается с увеличением косвенного армирования. Повышенная деформативность сжатых элементов с косвенным армированием связана с большими пластическими деформациями и проявляется при высоких напряжениях в бетоне после выключения из работы защитного слоя (при $0.8-0.9 N_p^{on}$). При нагрузках менее 0.7 от разрушающей модуль деформации бетона, армированного сетками, мало отличается от модуля деформации обычного бетона соответствующей прочности.

В работе [4] приводятся результаты исследования Рогового С.И. Было испытано 37 колонн сечением 160х240 мм, высотой 1300 мм и 14 колонн сечением 210х330 мм, высотой 1600 мм. В качестве продольной симметрично расположенной арматуры применялась сталь классов А-II и А-III, процент армирования принимался от 0.28% до 3.5%. Сетки поперечного армирования выполнялись из стали классов В-I (\varnothing 4 и \varnothing 5 мм) и А-I (\varnothing 6 и \varnothing 8 мм). Процент косвенного армирования изменялся от 1.8% до 3.5%.

Из данной работы следует, что косвенное армирование, создавая эффект обоймы, сдерживает развитие поперечных деформаций, резко повышает деформативность бетона и несущую способность конструкций, работающих на сжатие. При наличии косвенной арматуры значительно снижается хрупкость бетона, что позволяет при его высокой марке не применять понижающий коэффициент условий работы. Сочетание высокопрочного бетона с такой арматурой даёт существенную экономию материалов. Повышая деформативность сжатого бетона, косвенное армирование создаёт лучшие условия для работы продольной арматуры. Это позволяет использовать высокопрочную стержневую арматуру на сжатие до напряжений, приближающихся к условному пределу текучести.

Из опытов [4], так же как и в работе [3], было установлено, что косвенная арматура наиболее эффективно включается в работу после появления в бетоне микротрещин. Создавая объёмное напряженно-деформируемое состояние, такая арматура повышает границу трещинообразования, область упругой упруго-пластической работы бетона. При невысоких уровнях нагружения (до $0.6N_p$) и кратковременном действии нагрузки интенсивность развития продольных деформаций бетона у образцов с различным косвенным армированием ($0 < \mu_{xy} \leq 3\%$) одинаковая. Отсюда следует, что на величину начального модуля упругости бетона поперечное сетчатое армирование существенного влияния не оказывает. При высоких уровнях загрузки продольные и поперечные дефор-

Кондратчик Александр Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета, директор НИИ ПС.

Марчук Виталий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Третьяк Светлана Вячеславовна, аспирант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 220017, г. Брест, ул. Московская, 267.

мации образцов к моменту разрушения значительно больше деформаций колонн с одной продольной арматурой [5].

Мируминовым М.Н. [6] было испытано 40 образцов. Из них 14 образцов испытывались на внецентренное сжатие. Все образцы имели длину 1200 мм. Образцы первой серии имели постоянное сечение 400x400 мм. Образцы второй серии имели также квадратное сечение 400x400 мм, а по концам крестообразное сечение. Продольная арматура состояла из четырех стержней $\varnothing 16$ и $\varnothing 32$ мм из стали класса А-III. Для стержней сеток поперечного армирования была применена сталь класса А-III ($\varnothing 6$ и $\varnothing 10$ мм). Сетки располагались по всей высоте образцов с шагом $S=60 - 80$ мм, по всей длине образца, а также в сочетании с обычными хомутами, при этом сетки устанавливались по концам.

В результате опытов [6] установлено, что наличие косвенного армирования в виде поперечных сеток значительно повышает прочность и трещиностойкость концов колонн. Увеличение процента армирования сетками с 2% до 4.4%, т.е. более чем в два раза, повысило несущую способность в среднем только в 1.4 раза. С ростом процента косвенного армирования эффективность использования сеток снижается вследствие ухудшения условий анкеровки в бетоне. С повышением марки бетона эффективность использования косвенного армирования возрастает.

Виноградова О.В. [5] исследовала образцы-призмы размерами 15x15x60 см с продольной арматурой и сетками, расположенными с шагом 8, 12 и 16 см. Продольная арматура в образцах состояла из четырех стержней диаметром $\varnothing 12$ мм (сталь класса А-III). В результате выяснила, что уменьшение шага сеток вдвое – с 16 до 8 см – повысило разрушающую нагрузку только на 1.7%, а расход косвенной арматуры повысился в два раза, т.е. на 100%. При шаге сеток 12 см разрушающая нагрузка осталась почти такой же как и при 16 см. Проведенные Виноградовой О.Ф. экспериментальные исследования выявили целесообразность увеличения шага сеток с 8 см до 12 см.

При внецентренном сжатии, как показывают опыты различных авторов [1-9], наличие сеток в сжатой зоне повышает ее предельную деформативность как и при центральном нагружении. При нагрузках, близких к разрушающим, наблюдается интенсивное перераспределение усилий по сечению элемента. Эпюра напряжений сжатой зоны бетона, по мере приближения к разрушающей нагрузке, стремится к прямоугольной форме. Такое напряженное состояние обеспечивает хорошее включение в работу сеток косвенного армирования.

Васильевым И.П., Матковым Н.Г. и Филипповым Б.П. [3] были испытаны элементы с косвенным армированием на внецентренное сжатие. В результате выяснили, что при внецентренном сжатии элементов с косвенным армированием поперечными сетками в широком диапазоне изменения эксцентриситета прочность сжатой зоны сечения используется с большой полнотой. Измерения деформаций стержней поперечных сеток подтверждают это положение. При внецентренном сжатии колонн в стадии, близкой к разрушению, не только крайние стержни сеток более сжатой грани достигали предела текучести. Это важное преимущество сеток перед спиральным армированием показывает, что при спиральном армировании с ростом эксцентриситета усилия загрузки эффект обоймы падает, а при большем эксцентриситете – полностью исчезает. Для внецентренно сжатых элементов с поперечными сетками величина эксцентриситета не снижает эффекта косвенного армирования. Расположение поперечной сетки частично в растянутой зоне сечения внецентренно сжатого элемента не влияет на работоспособность ее в сдерживании поперечных деформаций и повышении прочности сжатой зоны.

Таким образом, как следует из результатов представленных исследований, косвенное армирование повышает несущую

способность сжатых элементов за счёт того, что оно препятствует деформированию элементов в поперечном направлении. Дальнейшего повышения несущей способности можно было бы добиться, выполнив предварительное напряжение косвенной арматуры, т.к. это повышало бы нагрузку, при которой начинается интенсивное микротрещинообразование в поперечном направлении. Наиболее целесообразным способом предварительного напряжения косвенной арматуры в такой ситуации представляется применение напрягающего бетона.

Косвенная арматура в элементах из напрягающего бетона

Исследования элементов с косвенной арматурой из бетона на напрягающем цементе (НЦ-20) были проведены Мартиросовым Г.М. и Мартиросяном Р.В. [7]. Ими были испытаны образцы-призмы размером 200x200x800 мм. на центральное сжатие. В качестве косвенной арматуры использовали сварные сетки из стержней диаметром 6 и 10 мм класса А-III продольную арматуру (4 стержня диаметром 6 мм из стали класса А-I) устанавливали конструктивно для фиксации сеток. Минимальное количество арматуры позволило более четко выявить влияние косвенного армирования. Сетки с размером ячеек 60 мм изготавливали с помощью точечной сварки, расстояние между сетками составляло 60 мм.

Процесс самонапряжения длился 4-5 сут. Потери самонапряжения в результате усадки бетона к началу испытаний составили в среднем 25%. За эталонные были приняты образцы с таким же каркасом, изготовленные из бетона той же прочности на портландцементе. Самонапряжение не изменило картину разрушения, характерную для образцов из бетона на легком заполнителе, армированных поперечными сетками. Полученная величина самонапряжения бетона несколько изменила характер деформирования элементов за счет предварительного обжатия в поперечном направлении, увеличилась зона упругой деформации и упругопластической работы элемента, отдалилось трещинообразование бетона и разрушение образца, возросли предельные деформации. Самонапряжение значительно повысило эффективность косвенного армирования. Результаты испытаний показали, что даже применение напрягающего цемента с низкой активностью (НЦ-20) заметно увеличивает несущую способность сжатых элементов, армированных сварными сетками.

Проанализировав изменение сопротивления сжатию элементов с применением различных цементов и видов армирования можно убедиться, что применение НЦ в элементах с косвенным армированием значительно повышает их прочность (таблица 1).

Формирование напряженного состояния в сечении с косвенной арматурой

В сечении, армированном сеткой, будет формироваться двухосное напряженное состояние, благодаря ограничению деформаций по осям x и y . Алгоритм определения усилий по главным направлениям (x и y) должен быть реализован в следующем порядке.

1. Определяются деформации бетона вдоль осей x и y ($\epsilon_{CE,x0}$ и $\epsilon_{CE,y0}$), соответствующие деформациям при одноосном ограничении расширения

$$\epsilon_{CE,x0} = \frac{f_{CE,d} \cdot K_{px}}{\rho_{lx} \cdot E_S}; \quad \epsilon_{CE,y0} = \frac{f_{CE,d} \cdot K_{py}}{\rho_{ly} \cdot E_S}; \quad (1)$$

где

$$K_{px} = \sqrt{\frac{1.57 \rho_{lx}}{0.0057 + \rho_{lx}}}; \quad K_{py} = \sqrt{\frac{1.57 \rho_{ly}}{0.0057 + \rho_{ly}}}; \quad (2)$$

Таблица 1. Влияние различных видов армирования на повышение сопротивления сжатию бетона

| Прочность бетона | Вид армирования | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|--|---|---|
| | на ПЦ без арматуры [10] | на ПЦ с прод. арматурой [10] | на ПЦ с косвенной арматурой [10] | на ПЦ с прод. и косвенной арматурой [10] | на НЦ с прод. и косвенной арматурой $\rho_{xy} = 0.024$ [7] | на НЦ с прод. и косвенной арматурой $\rho_{xy} = 0.058$ [7] |
| αf_{cd} , МПа | 42.8 | 43.29 | 54.89 | 55.39 | 67.13 | 71.3 |

$f_{CE,d}$ – энергоактивность напрягающего цемента.

2. Определяется влияние ограничения расширению по оси x армированием по оси y :

при $\rho_{lx} \leq \rho_{ly}$; $\epsilon_{CE,x} = (0.98 + 16\rho_{ly} - 12\rho_{lx})\epsilon_{CE,x0}$ (3)

при $\rho_{lx} \geq \rho_{ly}$; $\epsilon_{CE,x} = (0.98 + 16\rho_{lx} - 12\rho_{ly})\epsilon_{CE,x0}$ (4)

3. Определяется влияние ограничения расширению по оси y армированием по оси x :

при $\rho_{ly} \leq \rho_{lx}$; $\epsilon_{CE,y} = (0.98 + 16\rho_{lx} - 12\rho_{ly})\epsilon_{CE,y0}$ (5)

при $\rho_{ly} \geq \rho_{lx}$; $\epsilon_{CE,y} = (0.98 + 16\rho_{ly} - 12\rho_{lx})\epsilon_{CE,y0}$ (6)

Приведенные зависимости справедливы при использовании напрягающих бетонов с маркой по самоупрочению до Sp 4.0 и косвенном армировании в сечении, удовлетворяющем условиям:

$$0.005 \leq [(\rho_{lx})u(\rho_{ly})] \geq 0.03 \quad (7)$$

4. Определяется общее усилие в арматурных стержнях, ориентированных по соответствующей оси

$$P_{CE,x} = \epsilon_{CE,x} \cdot E_S \cdot A_{sx}; \quad P_{CE,y} = \epsilon_{CE,y} \cdot E_S \cdot A_{sy} \quad (8)$$

Не менее важным является вопрос о формировании напряженного состояния между сечениями, где расположены сетки косвенного армирования. Этот вопрос и подлежат исследованию в дальнейшем.

Заключение

Анализ ранее проведенных исследований элементов с косвенным армированием свидетельствует о том, что:

- Косвенное армирование сдерживает развитие поперечных деформаций, резко повышает деформативность бетона и несущую способность конструкций, работающих на сжатие.
- Косвенная арматура наиболее эффективно включается в работу после появления в бетоне микротрещин. При невысоких уровнях нагружения и кратковременном действии нагрузки интенсивность развития продольных деформаций бетона у образцов с различным косвенным армированием одинаковая.
- Армирование поперечными сетками дает возможность значительно повысить прочность бетона, как при центральном, так и при внецентренном сжатии. Эффективность косвенного армирования при внецентренном сжатии практически остается равной эффективности при центральном сжатии.
- Косвенное армирование внецентренно сжатых элементов существенно повышает деформативность бетона сжатой зоны, что позволяет использовать в таких элементах высокопрочную стержневую арматуру.

- Исследования элементов из бетона на напрягающем бетоне практически отсутствуют, а выполненные подтверждают экономическую эффективность их продолжения.

Вывод. Таким образом, использование косвенной арматуры в конструкциях из напрягающего бетона на локальных участках (участки приложения концентрированной нагрузки), в сжатой зоне сечений (при изгибе и внецентренном сжатии), на всей протяженности (сжатые стержневые элементы) позволит не только повысить прочностные характеристики бетона, но и его трещиностойкость.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карпинский В.И. Бетон в предварительно напряженной спиральной обойме. М.: Оргтрансстрой, 1961. – 183 с.
2. Попов Н.Н., Матков Н.Г., Трекин Н.Н. Влияние косвенного армирования на деформативность бетона/ Бетон и железобетон – 1986 - №11 – С. 33-35
3. Матков Н.Г., Васильев А.П., Филиппов Б.П. Прочность и деформативность сжатых элементов с косвенным армированием / Бетон и железобетон – 1973 - №4 – С. 17-19.
4. Роговой С.И. Экспериментально-теоретические исследования кососжатых железобетонных элементов с косвенным сетчатым армированием. Автореф. дисс. канд. техн. наук, 1981. – 24с.
5. Виноградова О.Ф. Экспериментальные исследования центральносжатых железобетонных элементов с косвенным армированием сетками нового типа. – Сб. трудов ЛИИЖТ, вып. 350, 1973.
6. Мируминов М.Н. Сопротивление местному сжатию торцов железобетонных колонн, армированных поперечными сетками. Автореф. дисс. канд. техн. наук, 1977. – 21с.
7. Мартиросов Г.М., Мартиросян Р.В. Повышение эффективности косвенного армирования / Бетон и железобетон – 1980 - №9 – С.12-13.
8. Лукша Л.К., Мацкевич А.С., Мордич А.И. Сжатые элементы с косвенной листовой арматурой / Бетон и железобетон, 1989 – №1 – с.28-30.
9. Довгалюк В.И. Исследование работы центральносжатых железобетонных колонн с косвенной и продольной арматурой / Бетон и железобетон, 1971 - №11 – с.20-22.
10. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. Мн., 2003.
11. Зарубен А.С. К вопросу расчета элементов с поперечным косвенным армированием. – «Труды научно-исследовательского института бетона и железобетона», 1978, вып. 40. – С. 35-41.
12. Марчук В.А. Деформации и собственные напряжения несимметрично двухосно армированных плоских элементов из напрягающего бетона на стадии его расширения. Автореф. Дисс. канд. техн. наук. 05.23.01/ БрГТУ. – Брест, 2002. – 17с.

Статья поступила в редакцию 15.02.07