

0-789921

На правах рукописи



ФАРДИЕВ РУСТЕМ ФАЙЗУНОВИЧ

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ УСИЛЕННЫХ ОБОЙМОЙ
ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Специальность: 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Казань – 2011

Работа выполнена в ФГОУ ВПО "Казанский государственный архитектурно-строительный университет"

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Мустафин Ильяс Исмагилович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ласьков Николай Николаевич
кандидат технических наук, доцент
Иванов Геннадий Павлович

Ведущая организация: ЗАО «Казанский ГИПРОНИИАВИАПРОМ»

Защита состоится «28» октября 2011 в 13:00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.077.01 при Казанском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, в ауд. 3-203 (зал заседания учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Автореферат разослан «27» сентября 2011 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687460

Учёный секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук

Л.А. Абдрахманова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Современная практика проектирования и строительства зданий тесно связана с реконструкцией, модернизацией или ремонтом существующего жилого и производственного фонда. В последнее время их объёмы настолько возросли, что стали сравнимыми с объёмами «нового» строительства. Подобное положение может быть вызвано одним или несколькими из причин: необходимостью сохранения исторических объектов или увеличения этажности в условиях тесной городской застройки, конструктивными ошибками на стадии проектирования, отклонениями от проекта на стадии изготовления или возведения конструкций здания, необходимостью перепланировки помещений, дефектами и повреждениями конструкций или просто износом конструкций.

В ряде случаев при реконструкции, модернизации или ремонте зданий требуется повышение, либо восстановление несущей способности конструкции путём их усиления.

К числу наиболее ответственных конструкций, подлежащих усилению, относятся сжатые элементы – внецентренно нагруженные железобетонные колонны здания.

Для усиления колонн существует множество способов, отличающихся как по используемым материалам элементов усиления, так и по способам вовлечения элементов усиления в работу. Выбор того или иного способа усиления определяется на основе технико-экономического обоснования и зависит от архитектурно-планировочных и конструктивных требований.

Одним из наиболее эффективных способов усиления железобетонных колонн является способ увеличения площади поперечного сечения с применением железобетонной обоймы. Данный способ усиления за многолетний опыт использования зарекомендовал себя как один из наиболее надёжных способов ввиду ряда причин: эффективное использование усиления при внецентренном сжатии за счёт снижения гибкости элемента, возможность обеспечения совместности работы усиливаемого элемента и обоймы конструктивными мероприятиями, высокая огнестойкость, стойкость к агрессивным средам, стойкость к механическим повреждениям, низкая себестоимость, высокая долговечность.

Принцип работы усиленного элемента в значительной степени отличается от работы обычного сжатого элемента. Поэтому при расчёте подобных конструкций необходимо учитывать ряд немаловажных факторов. Наиболее важными факторами являются: различие в физико-механических характеристиках усиливаемой усиливаемого элемента и обоймы, предыстория нагружения, податливость контактного шва, явления ползучести и усадки бетона, эффект обоймы, наличие повреждений и дефектов в усиливаемой колонне.

На сегодняшний день нет единого аналитического подхода к расчёту подобных конструкций. Недостаточность исследований и отсутствие нормативной базы в данной области затрудняет использование железобетона для усиления, либо приводит к существенному перерасходу материалов, а в ряде случаев – к

появлению малонадежных решений. Всё это свидетельствует о необходимости выполнения дополнительных исследований.

Таким образом, исследования усиленных обоймой внецентренно сжатых железобетонных элементов является актуальным направлением исследований.

Цель и задачи работы

Целью работы является совершенствование методов расчёта внецентренно сжатых элементов, усиленных обоймой.

Для реализации поставленной цели в пределах данной работы были поставлены следующие задачи.

1. Провести анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций.

2. Выполнить численные исследования усиленных элементов для выявления основных закономерностей работы усиленных элементов, а также получения предпосылок для построения расчётной методики и планирования экспериментальных исследований.

3. Выполнить экспериментальные исследования для получения опытных данных по напряжённно-деформированному состоянию и прочности усиленных элементов при различных варьируемых факторах.

4. Разработать методику оценки напряжённно деформированного состояния и прочности усиленного элемента.

5. Разработать практические рекомендации по проектированию усиления внецентренно сжатых железобетонных элементов устройством обоймы.

Научную новизну работы составляют:

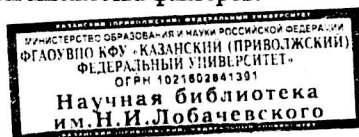
– результаты численных исследований, в которых учитываются такие факторы как: физическая нелинейность, податливость контактного шва, дискретное продольное и поперечное армирование, эксцентриситет приложения нагрузки, толщина обоймы;

– разработанная методика оценки напряжённно-деформированного состояния и прочности контактного шва с нагельной арматурой с учётом нелинейных свойств бетона;

– две разработанные методики оценки напряжённно-деформированного состояния с учётом напряжённного состояния до усиления, податливости контактного шва, различных физико-механических характеристиках материалов в поперечном сечении, нелинейной зависимости деформаций от напряжений для бетона в поперечном сечении, нарушении гипотезы плоских сечений.

Практическая значимость

Предложенный расчётный аппарат может быть использован при проектировании усиления железобетонных колонн и позволит произвести расчёт прочности контактного шва, определить необходимые геометрические и жёсткостные параметры обоймы, выполнить проверку несущей способности усиленного элемента с учётом множества факторов.



Автор защищает:

- результаты численных исследований;
- результаты экспериментальных исследований;
- методику оценки прочности и податливости нагельного соединения;
- две методики оценки напряжённо-деформированного состояния усиленного железобетонного элемента;
- методику оценки прочности усиленного железобетонного элемента.

Обоснованность полученных в работе положений и выводов подтверждается: использованием базовых положений сопротивления материалов и теории железобетона, использованием сертифицированных расчётных программных продуктов.

Достоверность результатов работы проверена сопоставлением результатов, полученных по предложенным расчётным методикам, с результатами экспериментальных и численных исследований, выполненных в достаточном объёме.

Внедрение результатов

Полученная методика оценки применена при разработке конструкций усиления колонн на объекте «16-ти этажный жилой дом по ул. Фучика в Приволжском районе г. Казани». Полученный инженерный метод расчёта усиления внедрён в учебный процесс Казанского государственного архитектурно-строительного университета по дисциплине «Строительные конструкции».

Апробация работы

Результаты работы представлялись и обсуждались: на Международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика» (Пенза, 2008 г); на Международной научной конференции «Проблемы современного строительства» (Пенза, 2009 г); на Международной научно-практической конференции «Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра» (Пенза, 2010 г); на Международной научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы» (Москва, 2010 г), ежегодных республиканских конференциях, семинарах проводимых кафедрой железобетонных конструкций и кафедрой сопротивления материалов Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 публикации в рецензируемых ВАК изданиях.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 139 источников и 1-го приложения. Основной текст изложен на 171 страницах, которые иллюстрируется 79 рисунками и включают 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности исследуемых вопросов, раскрыта научная новизна, практическая значимость, кратко изложена структура работы.

В первой главе представлен анализ экспериментально-теоретических исследований усиления железобетонных изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций.

Все исследования в данной области можно условно разделить на исследования, направленные на изучение обеспеченности совместности работы обоймы и усиливаемого элемента и исследования, направленные на изучение прочности и жёсткости всего усиленного элемента.

Совместность работы усиливаемого элемента и обоймы обеспечивается состоянием контактного шва. Исследованиями прочности, жёсткости контактного шва занимались Бобрящев П.И., Валеев Г.С., Гвоздев А.А., Городецкий Б.Л., Гутковский В.А, Васильев А.П., Дмитриев С.А., Запругин Г.Н., Колчунов В.И., Конводченко В.И., Литвинов И.М., Мартынова Н.Г., Митрофанов В.П., Погребной В.В., Поляков С.В., Сунгагуллин Я.Г., Фатхуллин В.Ш., Хасанов Р.Р., Черкашин А.В., Шорохов Г.Г., Щитиков Б.А. и др.

Большинство методик по оценке прочности и деформативности контактных швов основаны на рассмотрении ограниченных наклонной трещиной опорных участков сборно-монолитных балок и применимы только для изгибаемых элементов. Для внецентренно сжатых элементов данный подход не применим в виду малости или отсутствия поперечных сил.

Напряжённо-деформированное состояние контактного шва согласно многим исследованиям можно оценить либо по формуле Журавского, либо из теории составных стержней при известной податливости контактного шва. Формула Журавского для сжатых элементов не применима в виду малости или отсутствия поперечных сил. Податливость же в случае усиления может быть нулевой, и оценить величину касательных напряжений по теории составных стержней не представляется возможным. Поэтому для оценки напряжённо-деформированного состояния контактного шва усиленных сжатых элементов требуется другой подход.

Исследованием прочности усиленных внецентренно сжатых железобетонных конструкций занимались Астафьев Д.О., Бондаренко С.В., Борисов А.О., Гроздов В.Т., Дворников В.М, Захаров С.Т., Меркулов С.И., Онуфриев Н.М, Пецольд Т.М., Попеско А.И., Лазовский Д.Н, Рабинович Е.А., Санжаровский Р.С., Теряник В.В., Ткаченко А.Е. и др.

Для оценки прочности всего усиленного элемента на сегодняшний день существует несколько многофакторных подходов, учитывающих предысторию нагружения, длительность нагружения усиливаемого элемента, наличие повреждений на усиливаемом элементе, различие в механических характеристиках усиливаемого элемента и обоймы, наличие статических и динамических нагрузок. Большая часть исследований выполнена для изгибаемых элементов.

Недостатком существующих подходов расчёта прочности усиленных элементов является использование гипотезы плоских сечений. При передаче большей части

нагрузки на обойму через контактный шов в поперечном сечении деформации усиливаемого элемента и обоймы будут неравномерными и применение гипотезы плоских сечений может привести к определённым погрешностям.

Во второй главе приведены результаты и анализ численных исследований, выполненных в программных комплексах «ЛИРА», «SCAD», основанных на методе конечных элементов.

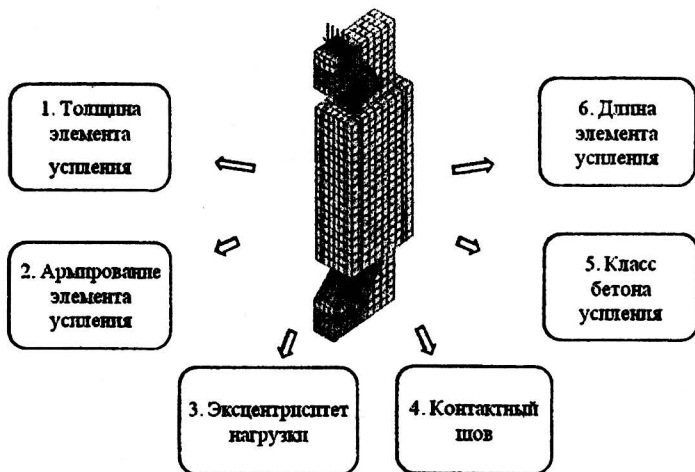


Рис. 1. Программа численных исследований

Образцы моделировались в программных комплексах в виде объёмных физически и геометрически нелинейных элементов с учётом продольного и поперечного армирования при различных варьируемых факторах (рис. 1).

Численные исследования подтвердили предположение о том, что при усилении характер распределения напряжений и усилий в усиливаемом элементе и обойме по длине неравномерный. Получено, что при рассматриваемой схеме нагружения продольные усилия в усиливаемом элементе и в обойме по длине меняются до 2-х раз.

Виртуальные испытания образцов с различными эксцентриситетами приложения продольной силы показали, что железобетонную обойму эффективно применять при отношении эксцентриситета к высоте поперечного сечения $e/h < 0,2$. При $e/h > 0,3$ рекомендуется использовать усиление с более развитым сечением со стороны сжатой зоны.

В численных исследованиях получено, что эффективность усиления высокая при отношении площади обоймы к площади усиливаемого элемента $A_{ad}/A_c < 30\%$ и при классе бетона обоймы на один, два класса выше класса бетона усиливаемого элемента. Использование большей площади поперечного сечения или бетона с высоким классом по прочности на сжатие не приводит к значительному увеличению несущей способности.

При усилении обоймой важным является поперечное армирование. За счёт эффекта всестороннего обжатия при усилении обоймой, снижение шага стержней поперечной арматуры со 150 до 30 мм привело к увеличению несущей способности на 26 % при внецентренном сжатии и на 35 % при центральном сжатии.

В третьей главе описываются методика проведения и анализ результатов экспериментальных исследований согласно принятой программе (рис. 2).

В качестве основных варьируемых факторов приняты: толщина обоймы, поперечное армирование обоймы, наличие шпонок в контактном шве, наличие нагельной арматуры в контактном шве.

Для проведения экспериментальных исследований изготовлено 9 групп образцов, в каждой из которых 3-5 образцов-близнецов. Всего изготовлено 35 образцов. Все геометрические параметры образцов приняты с коэффициентом подобия реальным конструкциям, равным 0,5: длина элементов принята равной 1,5 м, размеры поперечного сечения усиляемого элемента – 15×20 см, толщина обоймы для различных групп принята равной 3, 4, 5 см. Усиляемый образец армируется 4-мя стрежнями продольной арматуры $\varnothing 10$ А-III и поперечной – $\varnothing 5$ Вр-I с шагом 200 мм. Железобетонная обойма армируется 4-мя стрежнями продольной арматуры $\varnothing 10$ А-III, поперечной – $\varnothing 5$ Вр-I с шагом 100, 50 мм. Для предотвращения преждевременного разрушения, оголовки усиляемого элемента армированы дополнительной арматурой и перед испытанием усиливались наружными уголками.

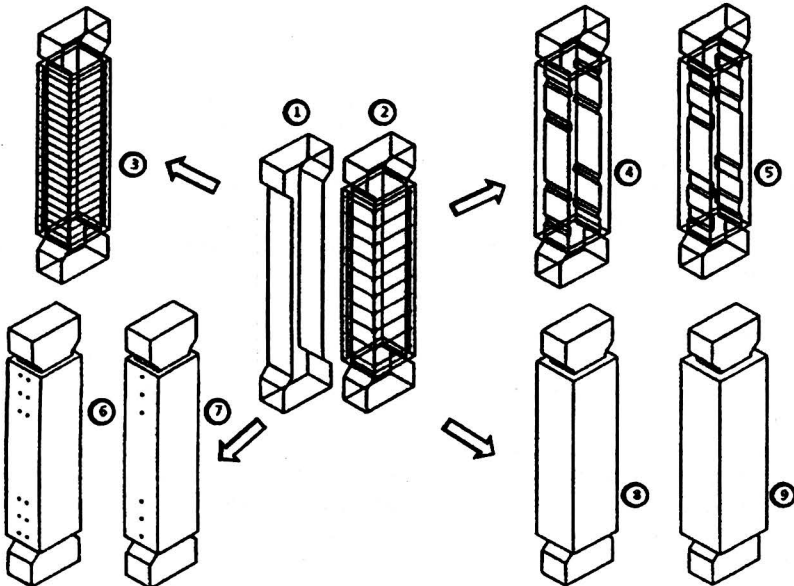


Рис. 2. Программа экспериментальных исследований

Для комплексной оценки напряженно-деформированного состояния элементов при испытаниях использовалась система фиксации деформаций и усилий, состоящей из тензорезисторов, индикаторов часового типа, специально разработанной рамы для определения прогибов, мензур (рис. 3).

Образование трещин у всех образцов начиналось с появления продольных трещин в верхней части обоймы (рис. 3) при нагрузке, составляющей 60-80 % от разрушающей. У образцов с гладкой поверхностью контактного шва наблюдалось нарушение его сплошности.

Разрушение образцов с базовым усилением происходило по бетону сжатой зоны усиливаемого элемента внутри обоймы в верхней или нижней части при одновременном разрушении обоймы от растягивающих усилий. Эффект усиления образцов с базовым усилением составил 77 %.

Несущая способность образцов, усиленных обоймами с толщинами 30, 40 и 50 мм, при увеличении поперечного сечения на 82, 114 и 150 % увеличилась соответственно на 77, 101, 116 % по сравнению с несущей способностью образцов без усиления. Приблизительно у половины образцов с толщинами обоймы 40 и 50 мм наблюдалось нарушение сплошности контактного шва.

Использование двух симметричных рядов шпонок со стороны сжатой и растянутой зоны длиной 5 см в контактном шве оказалось достаточным для обеспечения прочности контактного шва. Обеспеченность прочности шва способствует более эффективной передаче усилий на обойму и разгрузке усиливаемого образца. При использовании шпоночного соединения эффективность усиления составила 147 %. Недостатком данного способа усиления является необходимость снижения площади поперечного сечения усиливаемого элемента на 5-15 % при устройстве шпонок.

Испытания образцов с нагельной арматурой, пересекающей контактный шов показали, что при одном ряде расположения нагельной арматуры наблюдался эффект проскальзывания обоймы относительно усиливаемого элемента, контактный шов при этом можно считать податливым. При двойном ряде расположения нагельной арматуры проскальзывания обоймы относительно усиливаемого элемента не наблюдалось, прочность контактного шва оказалась обеспеченной. Эффективность усиления у образцов с нагельной арматурой составила: 116% – при податливом шве и 164 % – при жёстком шве.

Наибольший эффект усиления, который составил 198 %, получен при использовании увеличенного вдвое поперечного армирования обоймы. Трещиностойкость данных образцов в виду увеличенного армирования оказалась на 20-30 % выше по сравнению с трещиностойкостью всех остальных образцов. За счёт этого при нагружении более эффективно происходило обжатие обоймой усиливаемого элемента, прочность контактного шва оказалась выше за счёт больших сил трения и сил механического зацепления. Обеспеченность прочности контактного шва способствовала эффективному включению обоймы в работу усиленных образцов.

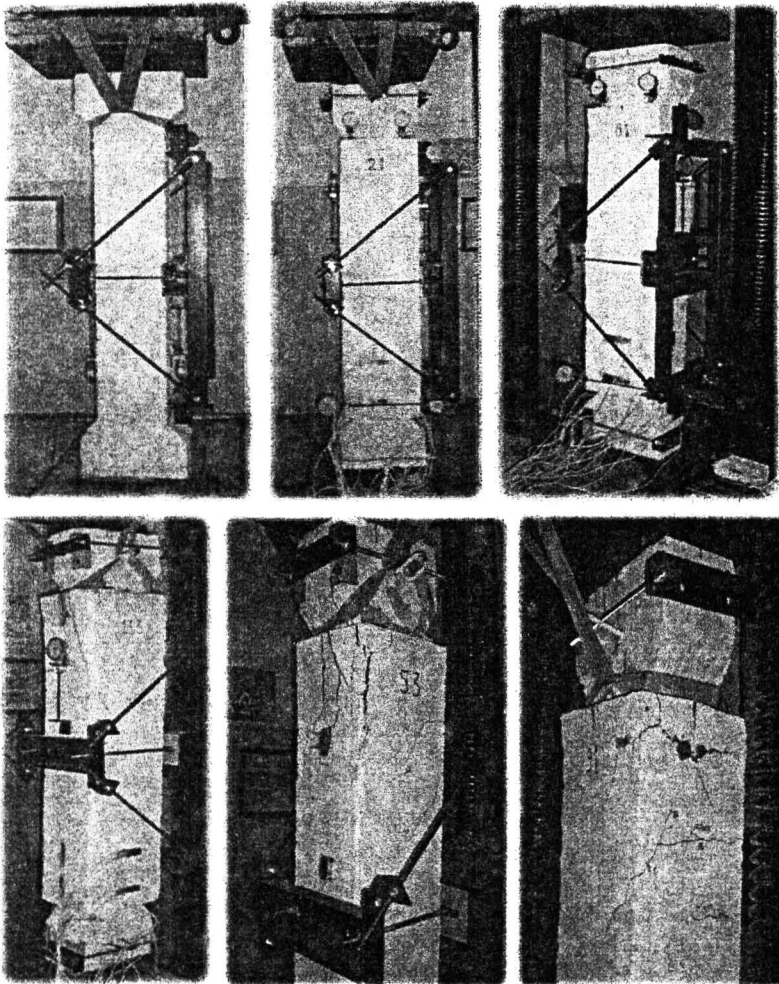


Рис. 3. Испытание образцов

В четвёртой главе рассмотрены: две методики оценки напряжённо-деформированного состояния, методика оценки прочности и деформативности контактного шва с нагельной арматурой, методика оценки прочности усиленного элемента, инженерная методика оценки прочности усиленного элемента, рекомендации по конструированию усиления.

Первая методика оценки напряжённо-деформированного состояния основана на определении напряжений в элементарных площадках поперечного сечения (рис. 4) через кривизну и начальные относительные деформации:

$$\varepsilon_i = \chi_0 x + \varepsilon_0 - \text{до усиления,}$$

$$\varepsilon_i = (\chi_0 + \chi_1)x + \varepsilon_0 + \varepsilon_1 - \text{после усиления,}$$

(1)

где χ_0 , ε_0 – кривизна и начальные деформации элемента в т. О от нагрузки N_0 приложенной до усиления, χ_1 , ε_1 – кривизна и начальные деформации элемента в т. О от нагрузок ($N_0 + N_1$) приложенных после усиления, x – координата центра тяжести элементарной площадки dA .

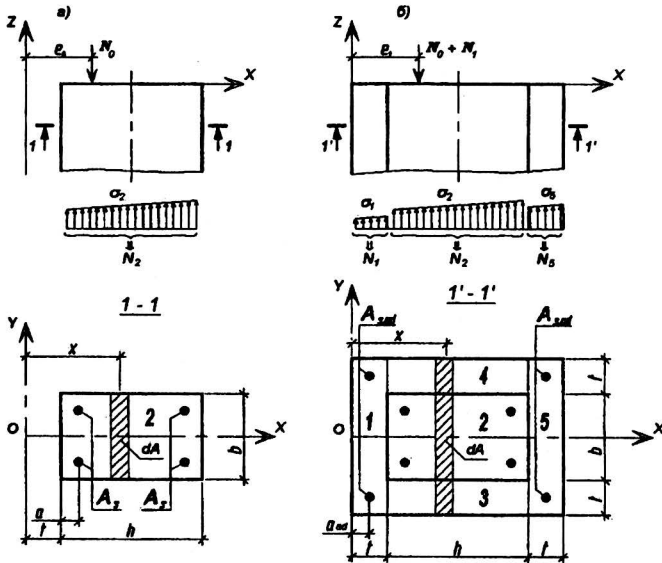


Рис. 4. Расчётная схема элемента: а) – до усиления, б) – после усиления, A_s – площадь арматуры усиливаемого элемента, $A_{s,ad}$ – площадь арматуры обоймы

Связь между деформациями и напряжениями для бетона принимается нелинейной по методике ЕКБ-ФИП:

$$\sigma = R_{ult} \left(\frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \right),$$

(2)

$$\text{где } \eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ult}}, \quad k = \frac{E_b \varepsilon_{ult}}{R_{ult}},$$

ε_{ult} – предельные относительные деформации сжатия или растяжения бетона, R_{ult} – предельное сопротивление бетона сжатию или растяжению, где E_b – модуль деформации бетона.

Расчёт производится в два этапа. На первом этапе определяются кривизна χ_0 и начальные деформации элемента ε_0 для неусиленного элемента из уравнений равновесия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma N_x = 0: b \int_t^{t+h} \sigma_2 dx + (\chi_0(t+a) + \varepsilon_0) E_s A_s + \\ + (\chi_0(t+h-a) + \varepsilon_0) A_s = N_0, \\ \Sigma M_o = 0: b \int_t^{t+h} \sigma_2 x dx + (t+a)(\chi_0(t+a) + \varepsilon_0) E_s A_s + \\ + (t+h-a)(\chi_0(t+h-a) + \varepsilon_0) A_s = N_0 e_0. \end{array} \right. \quad (3)$$

На втором этапе определяются кривизна χ_1 и начальные деформации элемента ε_1 для усиленного элемента также из уравнений равновесия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma N_x = 0: (b+2t) \int_0^t \sigma_1 dx + 2t \int_t^{t+h} \sigma_3 dx + \\ + (b+2t) \int_{t+h}^{2t+h} \sigma_5 dx + \\ + ((\chi_0 + \chi_1)(t+a) + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) E_s A_s + \\ + ((\chi_0 + \chi_1)(t+h-a) + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) E_s A_s + \\ + ((\chi_0 + \chi_1) a_{ad} + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) E_s A_{s,ad} + \\ + ((\chi_0 + \chi_1)(2t+h-a_{ad}) + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) E_s A_{s,ad} + \\ + b \int_t^{t+h} \sigma_2 dx = N_0 + N_1, \\ \Sigma M_o = 0: (b+2t) \int_0^t \sigma_1 x dx + b \int_t^{t+h} \sigma_2 x dx + \\ + 2t \int_t^{t+h} \sigma_3 x dx + (b+2t) \int_{t+h}^{2t+h} \sigma_5 x dx + \\ + (t+h-a)((\chi_0 + \chi_1)(t+h-a) + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) A_s + \\ + (t+a)((\chi_0 + \chi_1)(t+a) + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) A_s + \\ + a_{ad}((\chi_0 + \chi_1) a_{ad} + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) A_{s,ad} + \\ + (2t+h-a_{ad})((\chi_0 + \chi_1)(2t+h-a_{ad}) + (\varepsilon_0 + \varepsilon_1)) A_{s,ad} = \\ = (N_0 + N_1) e_1. \end{array} \right. \quad (4)$$

Полученные соотношения для определения ε_0 , ε_1 и χ_0 , χ_1 из решения системы (4) при подстановке в формулы (1), (2) позволяют получить требуемые деформации и напряжения в поперечном сечении элемента.

Недостатком первой методики является то, что в любом поперечном сечении по длине элемента получается одно и то же НДС, т.е. решается плоская задача.

Вторая методика оценки напряжённо деформированного состояния основана на кусочно-линейном законе деформирования точки в поперечном сечении.

Суть методики заключается в следующем. Поперечное сечение усиленного элемента разбивается на 5 областей (рис. 5).

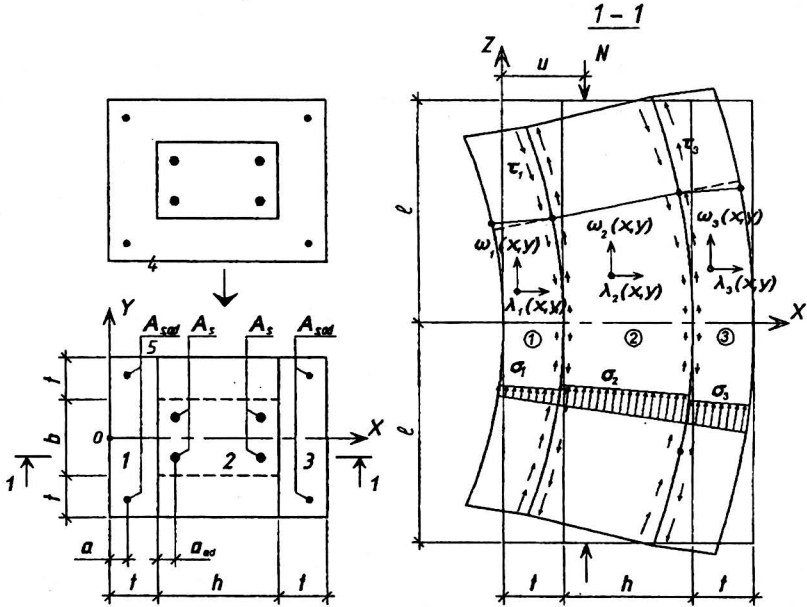


Рис. 5. Расчётная схема с ломанным поперечным сечением

Принимается, что сжимающая сила приложена по центральной оси сечения на некотором расстоянии u от оси X . При внецентренном приложении нагрузки каждая из областей испытывает перемещения сжатия ω и изгиба λ , зависящие от координат x и z , принимающие значения $\omega 1 \dots \omega 8$, $\lambda 1 \dots \lambda 4$ на границах между областями:

$$\begin{aligned}
 \omega_1(x, z) &= \left(\omega 1 \frac{t-x}{t} + \omega 2 \frac{x}{t} \right) z + \left(\omega 3 \frac{t-x}{t} + \omega 4 \frac{x}{t} \right) z^3, \\
 \omega_2(x, z) &= \left(\omega 2 \frac{t+h-x}{h} + \omega 5 \frac{x-t}{h} \right) z + \left(\omega 4 \frac{t-x}{h} + \omega 6 \frac{x}{h} \right) z^3, \\
 \omega_3(x, z) &= \left(\omega 5 \frac{2t+h-x}{t} + \omega 7 \frac{x-t-h}{t} \right) z + \\
 &+ \left(\omega 6 \frac{2t+h-x}{t} + \omega 8 \frac{x-t-h}{t} \right) z^3, \\
 \lambda_1(x, z) &= \left(\lambda 1 \frac{t+h-x}{t} + \lambda 2 \frac{x}{t} \right) z^2, \quad \lambda_2(x, z) = \left(\lambda 2 \frac{t+h-x}{h} + \lambda 3 \frac{x-t}{h} \right) z^2, \\
 \lambda_3(x, z) &= \left(\lambda 3 \frac{2t+h-x}{t} + \lambda 4 \frac{x-t-h}{t} \right) z^2.
 \end{aligned} \tag{5}$$

При известных деформациях относительные деформации ϵ , нормальные напряжения σ и усилия N в бетоне каждого из рассматриваемых участков и арматуре ($N_b, N_c, N_{cad}, N_{cad}$), касательные напряжения τ и усилия по контактному швам T , изгибающие моменты M для i -го стержня определяются из известных соотношений:

$$\begin{aligned}\epsilon_{zi}(x, z) &= \frac{\partial \omega_i}{\partial z}, \\ \gamma_i(x, z) &= \frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial z}, \\ \sigma_{zi}(x, z) &= \frac{R_{ult} \epsilon_{zi} (R_{ult} (2\epsilon_{zi} - 2\epsilon_{ult}) + E_{bt} \epsilon_{ult} (-2\epsilon_{zi} + 3\epsilon_{ult}))}{E_{bt} \epsilon_{ult}^3}, \\ \tau_i(x, z) &= G_i \gamma_i, \\ N_i(z) &= \int_A \sigma_{zi}(x, z) dx, \\ M_i(z) &= \int_A \sigma_{zi}(x, z) x dx, \\ T_i(x) &= \int_A \tau_i(x, z) dz.\end{aligned}\tag{6}$$

Для определения 12-ти неизвестных $\omega_1 \dots \omega_8, \lambda_1 \dots \lambda_4$ для каждого из стержней использованы по два уравнения равенства нулю продольных сил и моментов:

$$\left\{ \begin{aligned} N_1(z=0) - N_1(z=l) + N_{cad}(z=0) - N_{cad}(z=l) + T_2(x=t) &= 0, \\ M_1(z=0) + M_{cad}(z=0) + t \cdot T_2(x=t) &= 0, \\ N_2(z=0) - N_2(z=l) + N_c(z=0) - N_c(z=l) + N_i(z=0) - N_i(z=l) + \\ + T_1(x=t) + T_3(x=t) - N &= 0, \\ M_2(z=0) + M_c(z=0) + M_i(z=0) + t \cdot T_1(x=t) + (t+h) \cdot T_3(x=t) - N \cdot u &= 0, \\ N_3(z=0) - N_3(z=l) + N_{cad}(z=0) - N_{cad}(z=l) + T_2(x=t+h) &= 0, \\ M_3(z=0) + M_{cad}(z=0) + (t+h) \cdot T_2(x=t+h) &= 0, \\ N_1(z=0) + N_2(z=0) + N_3(z=0) + N_{cad}(z=0) + N_c(z=0) + \\ + N_i(z=0) + N_{cad}(z=0) - N &= 0, \\ M_1(z=l) + M_2(z=l) + M_3(z=l) + M_{cad}(z=l) + M_c(z=l) + \\ + M_i(z=l) + M_{cad}(z=l) - N &= 0, \end{aligned} \right.\tag{7}$$

а также два уравнения равенства касательных усилий на границе между областями и два уравнения равновесия внутренних малых элементов:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(x=t) + T_2(x=t) = 0, \\ T_2(x=t+h) + T_3(x=t+h) = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{z1}(x=t/2, z=l/2)}{\partial z} + \frac{\partial \tau_1(x=t/2, z=l/2)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{z3}(x=t+h+t/2, z=t+h+t/2)}{\partial z} + \\ + \frac{\partial \tau_3(x=t+h+t/2, z=t+h+t/2)}{\partial x} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

При подстановке решения систем уравнений (7), (8) в выражения (5), (6) получены требуемые функции перемещений, напряжений и усилий в произвольных точках усиленного элемента.

При податливом контактном шве, например, при использовании нагельной арматуры на границе смежных областей перемещения будут отличаться на величину деформаций нагеля, которые можно определить по методике, описанной ниже. Для учёта податливости контактного шва в общей системе уравнений использованы вместо уравнений равновесия внутренних малых элементов дополнительно два уравнения (9), учитывающих смещение контактных поверхностей за счёт податливости нагельного соединения.

$$\begin{aligned} \omega_1(x=t, z=g) &= \omega_2(x=t, z=g) - 2 \frac{b \int_s^l \tau_2(x, z) dz}{2EI_s \lambda^3}; \\ \omega_2(x=t+h, z=g) &= \omega_3(x=t+h, z=g) - 2 \frac{b \int_s^l \tau_2(x, z) dz}{2EI_s \lambda^3}; \end{aligned} \quad (9)$$

где λ – параметр определяемый по формуле:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_{el} d_{sw}}{4E_s I_s}}, \quad (10)$$

Расчёт прочности усиленного элемента реализован на основании имеющихся выражений напряжённо-деформированного состояния и заключается в выражении предельной нагрузки N_{ult} при подстановке в системы уравнений (4), (7) (8) вместо значений напряжений соответствующих значений расчётных сопротивлений в соответствии с одним из трёх возможных предельных напряжённых состояний:

1) когда напряжения в бетоне и арматуре сжатой зоны не достигают предельных значений, а напряжения в растянутой арматуре достигают предельных значений;

2) когда напряжения в растянутой арматуре не достигают предельных значений, по мере увеличения нагрузки сначала напряжения в бетоне достигают предельных значений в пределах всей сжатой зоны, затем напряжения в сжатой арматуре достигают предельных значений;

3) когда напряжения в растянутой арматуре не достигают предельных значений, по мере увеличения нагрузки напряжения в сжатой арматуре достигают предельных значений первыми, затем напряжения в бетоне достигают предельных значений в крайних наиболее сжатых фибрах поперечного сечения.

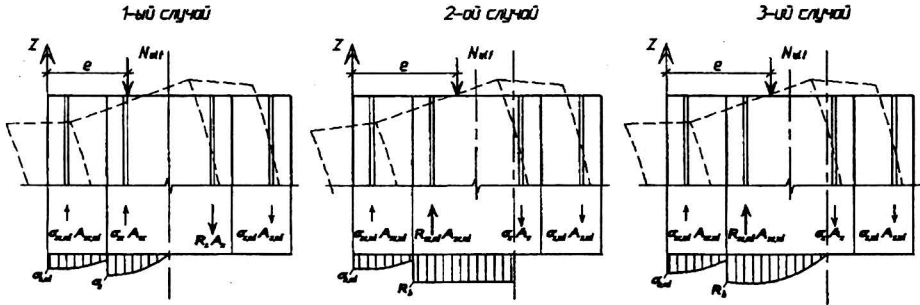


Рис. 6. Возможные предельные случаи напряжённо состояния

Для гибких усиленных элементов для учёта влияния прогиба элемента на изменение эксцентриситета приложения нагрузки в сечении расположенном в средней части по длине обоймы за расчётную координату приложения нагрузки u_p принимается сумма величины начальной координаты приложения нагрузки u и горизонтального перемещения верха обоймы в результате прогиба:

$$u_p = u + \lambda_2 (x = u, z = l), \quad (11)$$

где $\lambda_2 (x = u, z = l)$ – перемещения, получаемые в результате решения систем уравнений (7), (8).

Для выполнения практических расчётов при случайных эксцентриситетах приложения нагрузки предложен упрощённый инженерный метод расчёта, учитывающий приближённо некоторые из особенностей работы усиленных элементов. За несущую способность усиленных элементов принимается сумма предельных внутренних усилий с введением поправочных коэффициентов:

$$N_{ult} = \psi \varphi [R_b A_c + R_s A_s + k_1 (k_b R_{b,ad} A_{ad} + R_{s,ad} A_{s,ad})], \quad (12)$$

где ψ – коэффициент учитывающий соотношение эксцентриситета приложения нагрузки к высоте поперечного сечения и принимаемый равным:

$$\psi = 1,5 - \frac{e}{h}; \quad (13)$$

e – эксцентриситет приложения нагрузки; h – высота сечения усиливаемого элемента; φ – коэффициент продольного изгиба, принимаемый согласно нормам проектирования; $R_{b,ad}$ – расчётное сопротивление бетона обоймы, принимаемое согласно нормам проектирования табличному значению в соответствии с классом бетона; R_b – расчётное сопротивление бетона усиливаемого элемента, которое для учёта эффекта всестороннего обжатия рекомендуется принимать по аналогии с

определением расчётного сопротивления при косвенном армировании по формулам:

$$R_b = R_{b0} + \theta \mu_{xy} R_{sw}, \quad (14)$$

где R_{b0} – начальное расчётное сопротивление бетона; R_{sw} – расчётное сопротивление стали поперечной арматуры; θ – коэффициент эффективности косвенного армирования, определяемый из выражения:

$$\theta = \frac{1}{0,23 + \frac{\mu_{xy} R_{sw}}{R_b + 10}}; \quad (15)$$

μ_{xy} – процент поперечного армирования; A_c, A_{ad} – площадь сжатой части поперечного сечения бетона соответственно усиливаемого элемента и обоймы; $R_s, R_{s,ad}$ – расчётное сопротивление арматуры усиливаемого элемента и обоймы; $A_s, A_{s,ad}$ – суммарная площадь поперечного сечения арматуры соответственно усиливаемого элемента и обоймы; k_t – коэффициент, учитывающий соотношение площадей усиливаемого элемента и обоймы и принимаемый равным:

$$k_t = \frac{0,8}{e^{b+h}}; \quad (16)$$

t – толщина усиливаемого элемента, b – ширина сечения усиливаемого элемента; k_b – коэффициент, учитывающий соотношение сопротивления бетона обоймы и усиливаемого элемента и принимаемый равным:

$$k_b = 0,5 + \sqrt{\frac{R_{b,ad} - R_b}{4R_{b,ad}}} \text{ при } R_{b,ad} > R_b;$$

$$k_b = 0,5 \text{ при } R_{b,ad} < R_b.$$
(17)

Для оценки сопротивления контактного шва с нагельной арматурой предлагается использовать методику, предложенную Сунгатуллиним Я.Г., Фатхуллиным В.Ш., Валеевым Г.С., но с учётом нелинейных законов деформирования бетона в виде формулы (2) и рассмотрения нагельного стержня как балки на упругом основании.

Для аналитической оценки нагельного эффекта рассматривается отсечённая часть обоймы с поперечным стержнем, на которую со стороны усиливаемого элемента действует касательное усилие N_{sh} (рис. 7).

Из уравнений равновесия нагельной арматуры получено, что в предельном состоянии, соответствующем достижению в бетоне под нагелем предельных напряжений, растягивающее усилие будет равно:

$$N_s(x) = \frac{\pi d_{sw}^2 E_s k_1 R_b^2 (2R_b - 5E_b \varepsilon_{ult})^2}{16k_1 R_b^4 - 80e_b k_1 R_b^3 e_{ult} + 81d_{sw}^4 E_b^2 E_s^2 k_1^{-3} \varepsilon_{ult}^2 + 100E_b^2 k_1 R_b^2 \varepsilon_{ult}^2}, \quad (18)$$

где $k_1 = \sqrt{\frac{k_{st}}{d_{sw}^3 E_s}}$;

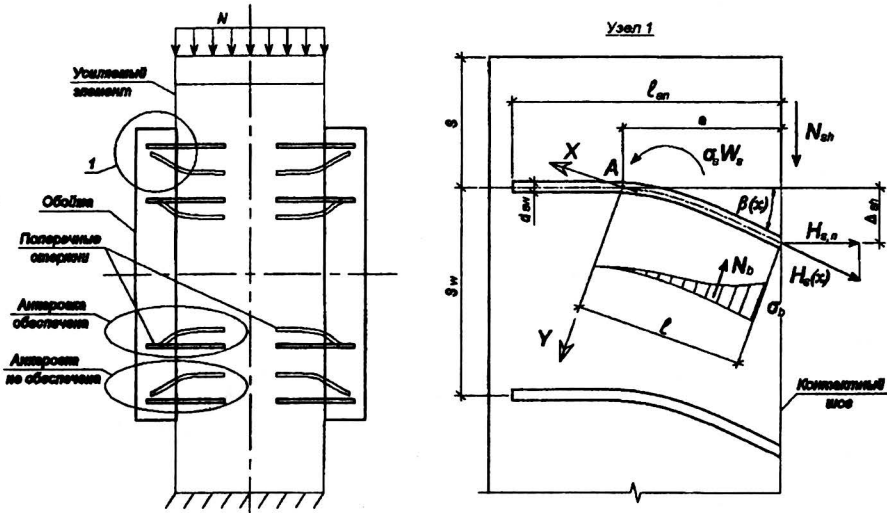


Рис. 7. Расчётная схема нагельного соединения

где d_{sw} – диаметр нагельной арматуры; k_{el} – коэффициент упругости бетонного основания под нагелем, который можно приближённо определить согласно законам механики грунтов по формуле:

$$k_{el} = \frac{3E_b}{d_{sw}(3 + \nu - 2\nu^2)}, \quad (19)$$

ν – коэффициент Пуассона для бетона.

Предельное значение касательного усилия N_{sh} при этом составляет:

$$N_{sh,ult} = \frac{9\pi^{5/4} d_{sw}^5 E_b E_s^2 k_1^{-3} R_b^2 e_{ult} (5E_b \varepsilon_{ult} - 2R_b)}{4(16k_1 R_b^4 - 80e_b k_1 R_b^3 e_{ult} + 81d_{sw}^4 E_b^2 E_s^2 k_1^{-3} \varepsilon_{ult}^2 + 100E_b k_1 R_b^2 \varepsilon_{ult}^2)}. \quad (20)$$

Сопротивление шва за счёт нагельной арматуры в случае, когда анкеровка стержня обеспечена, будет определяться суммой сопротивления бетона под стержнем и силы трения между бетонными поверхностями:

$$R_{sh,s} = \left(\frac{N_{sh,ult}}{b_{sh} S_w} + \frac{H_{s,n}}{b_{sh} S_w} k_{fr} \right) n_{s,r} n_{s,c} - \text{при обеспеченности анкеровки}; \quad (21)$$

$$R_{sh,s} = \frac{N_{sh,ult}}{b_{sh} S_w} n_{s,r} n_{s,c} - \text{при необеспеченности анкеровки};$$

где $H_{s,n}$ – нормальная составляющая растягивающего усилия в арматуре H_s , создающая силу трения между бетонными поверхностями; $k_{fr} = 0,63$ – коэффициент трения бетонных плоскостей; b_{sh} – ширина усиливаемого элемента;

S_w – шаг стержней; $n_{s,r}$ – количество рядов стержней; $n_{s,r}$ – количество столбцов стержней.

Обеспеченность анкеровки проверяется согласно действующим нормам проектирования.

Полученные методики оценки напряжённо-деформированного состояния усиленного элемента позволяют получить характер распределения напряжений (рис. 8), деформаций (рис. 9) и усилий, как в поперечном сечении, так и по длине элемента, прогиб элемента (рис. 10), касательные напряжения по контактному шву (рис. 11).

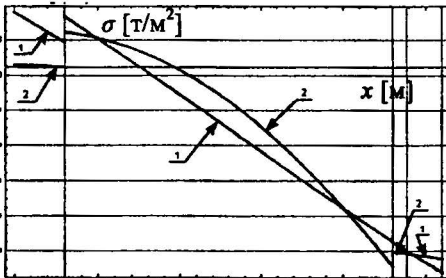


Рис. 8. График зависимости напряжений от координаты x в поперечном сечении элемента: 1 – линейное решение, 2 – нелинейное решение

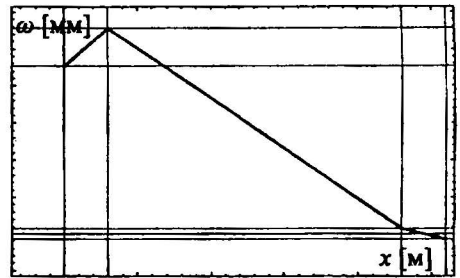


Рис. 9. График зависимости продольных деформаций ω от координаты x в поперечном сечении усиленного элемента

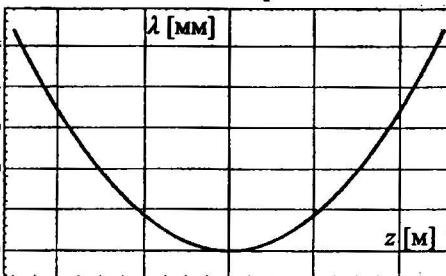


Рис. 10. График зависимости прогиба от координаты z

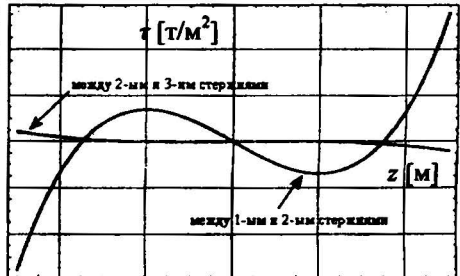


Рис. 11. График зависимости касательных напряжения вдоль контактного шва между 1-ым и 2-ым элементами от координаты z

Сравнение данных по несущей способности (таблица 1) показало, что предложенная более точная методика оценки прочности приводит к результатам, которые отличаются от экспериментальных в пределах 11 %, практическая методика приводит к результатам, которые отличаются от экспериментальных в пределах 23 %.

Сравнение данных по несущей способности образцов

Таблица 1

№	Серия образцов	Разрушающая нагрузка				
		Экспер.	Точный метод		Приближённый метод	
			N_m , т	N_l , т	Δ , %	N_2 , т
1	Образцы без усиления	35,2				
2	Базовое усиление	62,1	62,5	+1	71,5	+15
3	Образцы с толщиной обоймы 40 мм	70,9	70,1	-1	75,7	+7
4	Образцы с толщиной обоймы 50 мм	75,8	71,0	-6	80,0	+5
5	Образцы со шпонками	86,8	77,7	-10	71,5	-18
6	Образцы с одним рядом нагеля	76,1	69,9	-8	71,5	-6
7	Образцы с двумя рядами нагеля	92,8	77,7	-11	71,5	-23
8	Образцы с шагом поперечной арматуры 50 мм	105,2	98,7	-6	81,7	-22

На основании выполненных исследований существующие рекомендации по проектированию усиления увеличением площади поперечного сечения можно дополнить следующими конструктивными решениями (рис. 12).

1. Суммарные продольные усилия в усиляемом элементе при наличии опоры снизу максимальны – в верхней части длины. Поэтому длина обоймы должна быть больше чем длина требуемого участка разгрузки по длине усиляемого участка.

2. Устройство шпонок в усиляемом элементе при наличии опоры снизу желательно выполнять с отступом от верхнего края обоймы на $1/6 \div 1/4$ длины обоймы, чтобы сечение со сниженной площадью располагалась в менее нагруженной продольной силой части.

3. Для минимального снижения площади поперечного сечения шпонки на взаимно-перпендикулярных гранях должны располагаться вразбежку.

4. Касательные усилия в контактном шве максимальны также в верхней части обоймы. Для обеспечения прочности контактного шва в верхней части необходимо устройство шпонок или нагельной арматуры. Однако устройство шпонок у краёв может снизить общую несущую способность, поэтому рекомендуется в крайних частях обоймы для обеспечения прочности контактного шва использовать нагельную арматуру.

5. Для обеспечения анкеровки нагельной арматуры, стержни нагеля необходимо изготавливать с загибом, через который можно пропустить арматуру обоймы.

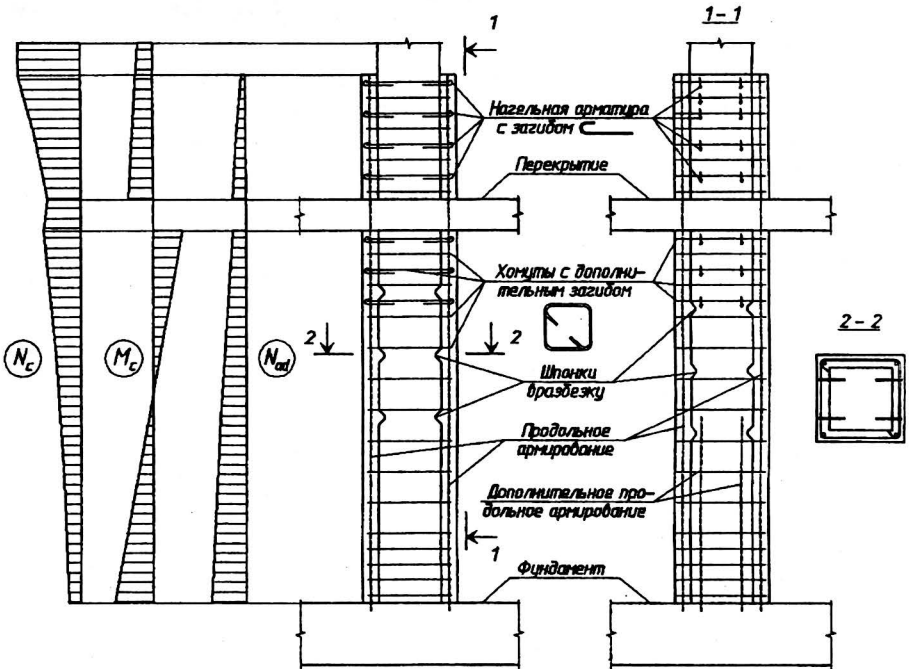


Рис. 12. Схема усиления колонны

6. Суммарные продольные усилия в элементе усиления максимальны в нижней части. Поэтому при обосновании расчётом возможно часть расчётной продольной арматуры, установленной в нижней части обоймы, обрывать на некоторой высоте.

7. В верхней части усиления в обойме также возникают значительные растягивающие усилия, которые воспринимает поперечная арматура обоймы. Поэтому рекомендуется использовать вместо обычных хомутов вязанных каркасов, хомуты с дополнительным отгибом, обеспечивающим его анкерровку по каждой из сторон поперечного сечения.

8. Выполненные исследования показали, что на прочность контактного шва значительное влияние оказывает поперечное армирование, поэтому в верхней части усиления, где касательные усилия по контактному шву максимальны, рекомендуется шаг хомутов снижать. Величину шага поперечных стержней обоймы рекомендуется принимать не более половины шага поперечных стержней усиливаемого элемента.

9. В качестве нагельной арматуры рекомендуется использовать рифлёную арматуру диаметра 5-16 мм. Для надёжной анкерровки установку анкеров необходимо производить с использованием полимерных составов, либо использовать готовые анкерные системы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате выполненных исследований получены следующие результаты.

1. Выполнены многофакторные численные исследования усиленных элементов в расчётных комплексах, основанных на методе конечных элементов. Данные исследования позволили численно оценить напряжённо-деформированное состояние элементов, определить особенности работы усиленных элементов. В частности, определены оптимальные соотношения эксцентриситета к высоте поперечного сечения и соотношение площади поперечного сечения обоймы к площади усиливаемого элемента; выявлено влияние поперечного армирования на несущую способность усиленного элемента. На основании выполненных численных исследований и анализа существующих теоретических исследований выявлены факторы для дальнейших исследований, сделаны предпосылки для построения расчётной модели.

2. Выполнены экспериментальные исследования внецентренно сжатых элементов, усиленных железобетонной обоймой. В качестве основных варьируемых факторов приняты: толщина обоймы, поперечное армирование обоймы, наличие шпонок в контактном шве, наличие и количество нагельной арматуры в контактном шве. В результате исследований определены: характер трещинообразования и разрушения образцов, неравномерность деформаций бетона и арматуры в поперечном сечении усиленного элемента, взаимные деформации при нарушении прочности контактного шва. Анализ результатов исследований показал, что при прочих равных условиях наиболее эффективным конструктивным мероприятием, обеспечивающим максимальную несущую способность, является увеличенное поперечное армирование, далее в порядке снижения эффективности усиления следуют: устройство нагельной арматуры, устройство шпонок, увеличение толщины обоймы.

3. Разработаны две методики оценки напряжённо-деформированного состояния, которые в комплексе позволяют учесть такие факторы как: нелинейная зависимость между деформациями и напряжениями для бетона, нарушение гипотезы плоских сечений, напряжённое состояние до усиления, податливость контактного шва с нагельной арматурой, различие прочностных и деформативных характеристик бетона в поперечном сечении элемента, поперечное армирование, дискретное продольное армирование.

4. Усовершенствована методика оценки прочности и деформативности контактного шва с нагельной арматурой введением нелинейных законов деформирования бетона.

5. На основе методик по расчёту напряжённо-деформированного состояния, а также выполненных численных и экспериментальных исследований разработана методика оценки прочности усиленного элемента.

6. Усовершенствована инженерная методика оценки прочности усиленных элементов путём введения дополнительных коэффициентов, учитывающих степень включения в работу обоймы.

7. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по конструированию обоймы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ВЫВОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Мустафин И.И., Фардиев Р.Ф. Основные направления исследований усиления внецентренно сжатых железобетонных элементов увеличением площади поперечного сечения. Материалы республиканской научной конференции. Казань. 2007. С. 81-87.

2. Мустафин И.И., Фардиев Р.Ф. Исследование усиления внецентренно сжатых железобетонных элементов увеличением площади поперечного сечения // Эффективные строительные конструкции теории и практика : Сборник статей. Пенза. 2008. С. 98-102.

3. Фардиев Р.Ф. К разработке программы экспериментальных исследований внецентренно сжатых элементов усиленных железобетонной обоймой. Эффективные строительные конструкции : Сборник статей. Пенза. 2008. С. 102-106.

4. Фардиев Р.Ф., Мустафин И.И. Обеспечение совместной работы железобетонной обоймы с усиляемым внецентренно нагруженным элементом // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. № 1(9). 2008. С. 96-99.

5. Фардиев Р.Ф. Оценка напряжённо-деформированного состояния сжатого элемента, усиленного железобетонной обоймой // Проблемы современного строительства : Сборник научных трудов. Пенза. 2009. С. 163-168.

6. Фардиев Р.Ф., Мустафин И.И. Результаты экспериментальных исследований внецентренно сжатых элементов, усиленных железобетонной обоймой : Сборник статей. МК-36-10 // Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра. Пенза. 2010. С. 105-109.

7. Фардиев Р.Ф., Каюмов Р.А., Мустафин И.И. Аналитический метод оценки напряжённо-деформированного состояния внецентренно сжатого элемента усиленного железобетонной обоймой : Сборник статей // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Москва. 2010. С. 487-495.

8. Фардиев Р.Ф., Каюмов Р.А., Мустафин И.И. Расчёт внецентренно сжатого элемента усиленного железобетонной обоймой с учётом предыстории загрузки и нелинейных свойств бетона. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. № 1(15). 2011. С. 109-114.

9. Фардиев Р.Ф. Нагельный эффект арматуры, пересекающей контактный шов сборного и монолитного бетонов при усилении сжатого элемента обоймой // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 5. С. 50-53.

102

Подписано к печати «26» 09. 2011 г.
Объём 1 п.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 423.

Печать RISO
Тираж 100 экз.

ИМО КТАСУ
420043, Казань, ул.Зеленая, 1