

На правах рукописи

ХЕГАЙ Максим Олегович

**НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
И ПРОЧНОСТЬ ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре железобетонных и каменных конструкций.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Морозов Валерий Иванович

Официальные оппоненты: **Петров Алексей Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», кафедра архитектуры, строительных конструкций и геотехники, заведующий;
Соколов Владимир Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», кафедра строительной механики и строительных конструкций», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится « 20 » декабря 2013 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний (ауд. 219 главного корпуса). Факс: (812) 316-58-72.

Телефакс: (812) 316-58-72
Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических
наук, профессор



Кондратьева Лидия Никитовна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Все более широкое применение, в частности, в многоэтажных зданиях и специальных сооружениях имеют конструкции круглого сечения, работающие с малыми эксцентриситетами. Зачастую, помимо продольных сил, на них так же действуют и поперечные силы. В существующей научной литературе и в нормативных документах отсутствуют какие-либо рекомендации о расчете элементов круглого сечения из железобетона и фиброжелезобетона, работающих в условиях поперечного изгиба и совместного действия продольных сжимающих и поперечных сил.

В современном обществе всегда есть опасность разрушения конструкций от разного рода техногенных факторов, террористических угроз, в связи с этим становится актуальным вопрос повышения вязкости разрушения элементов, предупреждения лавинообразного разрушения.

Одним из способов решения данной проблемы является дисперсное армирование железобетона стальными фибрами, способное обеспечить улучшение механических характеристик материала: повысить прочность, увеличить предельную сжимаемость, растяжимость, трещиностойкость, ударопрочность, вязкость разрушения и т.д. Очевидно, что в этом случае фибровое армирование будет полезно для предотвращения прогрессирующего обрушения, опасность которого возрастает в связи с нарастающей тенденцией создания уникальных зданий и сооружений.

В данной диссертации впервые исследуется задача оценки прочности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе и совместном действии продольных осевых, сжимающих и поперечных сил.

Степень разработанности темы исследования.

Впервые экспериментально–теоретические исследования бетона, армированного обрезками металлической проволоки, были проведены русским инженером В. П. Некрасовым в 1907 году. Им же впервые отмечено значительное увеличение вязкости и сопротивления развитию трещин в сталефибробетоне.

Во второй половине прошлого столетия вновь возрос интерес к фибровому армированию. Благодаря работам Д.С. Аболинша, Т.И. Астрова, И.Н. Ахвердова, Б.А. Ашимова, В.В. Белозира, Г.И. Бердичевского, В.И. Берестнева, И.В. Волкова, В. П. Вылегжанина, А.Е. Десова, О.А. Дейрупа, Б.А. Евсеева, В.К. Кравинскиса, Н.Ф. Кромской, Б.А. Крылова, В.М. Косарева, А.Н. Куликова, Л.Г. Курбатова, И.А. Лобанова, В.П. Некрасова, А.В. Носарева, Р.Л. Маиляна, В. В. Макарычева, В.Д. Милявского, В.И. Морозова, А.П. Павлова, Н.Я. Панарина, Г.А. Прусиса, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабиновича, В.П. Романова, И.К. Серова, Г.Г. Степановой, К.В. Талантовой, В.П. Трамбовского, В.Н. Тупицыной, В.Д. Харлаба, Г.К. Хайдукова,

В.В. Чернова, Г.Н. Шоршнева, Ф.Ц. Янkelовича, G.B. Batson, V. Bhikshma, C.C. Chamis, G.A. Cooper, L.H. Currich, S. Coldfein, J. Dixon, D.J. Hannant, E. Hognestud, D. R. Lancard, G.P. Romualdi, M.E. Patton, P.Rossi, P.S. Shah, M.I. Snyder, W.L. Whittaker и многих других ученых накоплен значительный объем опытных и теоретических данных.

В настоящее время имеется большое количество предложений для оценки несущей способности железобетонных конструкций по наклонным сечениям, основанных на различных теориях и экспериментальных данных. Среди исследователей, занимающихся развитием методов расчета железобетонных элементов при действии поперечных сил и более сложных видов воздействия следует отметить: Ф.Х. Ахмедзянова, В. Н. Байкова, Т.И. Баранову, М.С. Боришанского, П.И. Васильева, К.П. Веригина, А.А. Гвоздева, Л.Г. Двоскину, Л.А. Дорошкевича, А.С. Залесова, А.С. Зорича, Ю.Л. Изотова, О.Ф. Ильина, Ч.Б. Игнатавичуса, В.Г. Карабаша, Н.И. Карпенко, Ю.А. Климова, А.Н. Колтунова, В.И. Колчунова, Вл.И. Колчунова, С.А. Корейба, А.П. Куданса, А.П. Кудзиса, Л.Л. Кукша, В.Н. Маллиновского, Р.Л. Маиляна, Л.Р. Маиляна, В.П. Митрофанова, Ю.К. Николаева, А.Б. Пирадова, О.А.Рочняка, А.А. Светлаускаса, Э.Е. Сигалова, И.В. Соколова, Г.Н. Ставрова, И.Н. Старишкова, И. А. Титова, С.А. Тихомирова, М. С. Торьяника, И.М. Тунгушбаева, Б.У. Усенбаева, М.М. Холмянского, А.В. Шведова, Б.А. Шостака, И.М. Чупака, В.П. Чиркова, Н.Н. Яромича, А.В. Яшина, C. Bach, H.Bay, W. Dilger, O. Graf, G.Kani, K. Kupfer, F. Leonhardt, E. Morsch, F. Richard, K. Schreder, Z. Vizi, R. Walther, P. Watstein, R. Walter и др.

Работы отмеченных авторов посвящены, как правило, традиционным формам сечения: прямоугольным, тавровым и двутавровым. Исследования же элементов круглого сечения в литературе не встречаются. Анализ этих и других исследований не позволяет, однако, непосредственно применить полученные результаты при расчете элементов круглого сечения и не дает возможности создать обоснованную методику расчета фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является экспериментально–теоретическое исследование напряженно–деформированного состояния и прочности фиброжелезобетонных изгибаемых элементов круглого сечения при действии поперечных сил, совместном действии продольных осевых сжимающих и поперечных сил и разработка методики их расчета.

Задачи исследования:

- Экспериментальные исследования прочности на срез фибробетона при разном проценте фибрового армирования;
- Экспериментальные исследования влияния процента фибрового армирования на изменение прочностных и деформативных характеристик фиброжелезобетонных элементов круглого сечения;

- Экспериментальные исследования влияния продольного осевого усилия сжатия на несущую способность фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе;

- Проведение численного экспериментального исследования с использованием программного комплекса «Ли́ра» по оценке напряженно-деформированного состояния, в том числе в нелинейной постановке, и определение возможного характера трещинообразования и разрушения;

- Разработка методики расчета прочности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе, а также при совместном действии продольных осевых, сжимающих и поперечных сил.

Объектом исследования является элемент круглого сечения из мелкозернистого бетона, армированный стержневой арматурой и стальной фиброй, при кратковременном действии поперечных сил и совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения» и относится к области исследования, предусмотренного пунктом 3. Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. В результатах теоретического исследования напряженно–деформированного состояния железобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе с использованием программного комплекса «Ли́ра», в том числе в нелинейной постановке.

2. Впервые разработаны теоретические основы и методика расчета по первой группе предельных состояний фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе.

3. Получены новые опытные данные о влиянии фибрового армирования на прочность фибробетонных элементов при действии среза.

4. Получены новые экспериментальные данные о влиянии фибрового армирования на несущую способность элементов круглого сечения при действии поперечных сил.

5. В результатах экспериментально–теоретических исследований влияния продольного усилия сжатия на несущую способность фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил, которые позволили получить соответствующие параметры, обеспечивающие получение адекватных результатов при расчете по первой группе предельных состояний.

Практическая ценность и реализация результатов исследований заключается в том, что впервые разработана методика расчета фиброжелезобетонных элементов круглого сечения в условиях поперечного изгиба

и совместного действия продольных осевых и поперечных сил, которая уже на данном этапе может быть использована в проектной практике.

Результаты диссертационных исследований приняты в ЗАО «Экспериментальный завод» при проектировании и изготовлении опытной серии колонн из фиброжелезобетонна круглого сечения. Отдельный раздел диссертации, посвященный разработке практического метода расчета, внедрен в учебный процесс СПбГАСУ при чтении специального курса студентам специальности ПГС и магистрантам по направлению «Строительство».

Достоверность результатов исследований подтверждается:

1. Использованием базовых положений сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики, математического анализа, а также общепринятыми допущениями и положениями современной теории железобетона.

2. Применением метрологически аттестованного оборудования и приборов при проведении экспериментальных исследований.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: I Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (2012 год, СПбГАСУ), Международном конгрессе, посвященный 180-летию СПбГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве – 2012» (2012 год., СПбГАСУ), II Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (2013 год, СПбГАСУ).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, общим объемом 1.9 п.л., лично автором - 1.5 п.л., в том числе 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, общих выводов, списка литературы из 151 наименований и приложений. Общий объем составляет 120 страниц машинописного текста, в том числе 67 рисунков, 15 таблиц.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи, научная и практическая значимости.

В первой главе «Состояние вопроса. Направление дальнейших исследований» выполнен анализ современного состояния исследований фибробетона, рассмотрены экспериментальные и теоретические исследования различных ученых в вопросе работы конструкций при поперечном изгибе и совместном действии продольных и поперечных сил.

Вторая глава диссертации «Расчет прочности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил» посвящена теоретическим исследованиям несущей способности фиброжелезобетонных

элементов круглого сечения при действии поперечных сил и разработке практической методики расчета.

В третьей главе «Экспериментальные исследования элементов круглого сечения при поперечном изгибе» отражены экспериментальные исследования фиброжелезобетонных балок круглого сечения при действии поперечных сил.

Четвертая глава «Экспериментально–теоретические исследования балок круглого сечения при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил» посвящена экспериментальным исследованиям влияния усилий продольного сжатия на несущую способность конструкций круглого сечения при поперечном изгибе, а так же разработка методики расчетной оценки прочности таких конструкций.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Теоретические исследования напряженно–деформированного состояния железобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе с использованием программного комплекса «Ли́ра», в том числе в нелинейной постановке.

Для моделирования работы железобетонной конструкции на действие поперечной силы был выполнен численный эксперимент в программном комплексе «*ЛИРА*». Программный комплекс «*ЛИРА*» — многофункциональный программный комплекс, предназначенный для проектирования и расчета строительных конструкций различного назначения. Основой расчетного метода, предлагаемого ПК «*ЛИРА*», является метод конечных элементов (МКЭ).

Задачи численного эксперимента сводились к определению характера напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента круглого сечения в условиях поперечного изгиба и прогнозирование возможного характера разрушения с принятием соответственного критерия прочности.

Характеристики материалов вводились с учетом их нелинейности на основе диаграммы напряжения–деформации. Моделировалась железобетонная балка сплошного круглого сечения длиной 1000 мм (рис. 1).

Результаты вычисления главных растягивающих и сжимающих напряжений представлены на (рис. 2).

Результаты расчета с линейными и нелинейными характеристиками материала имеют схожие картины напряженно–деформированного состояния элемента. Расхождения результатов не превышают 15% в области растяжения и 5% в области сжатия.

В качестве критерия местоположения формирующихся трещин в железобетонной балке использован силовой фактор – главные растягивающие напряжения.

Первые трещины появляются в зоне чистого изгиба (рис. 3), далее с увеличением нагрузки происходит появление наклонных трещин, распростра-

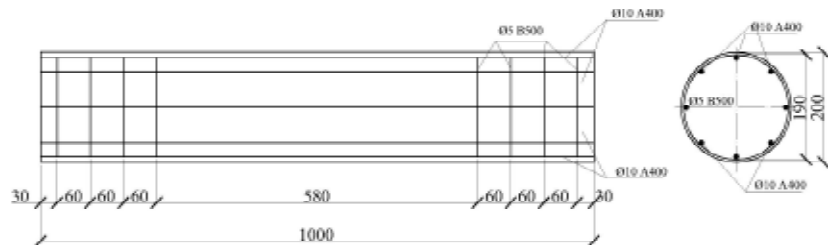


Рис. 1. Схема армирования балки

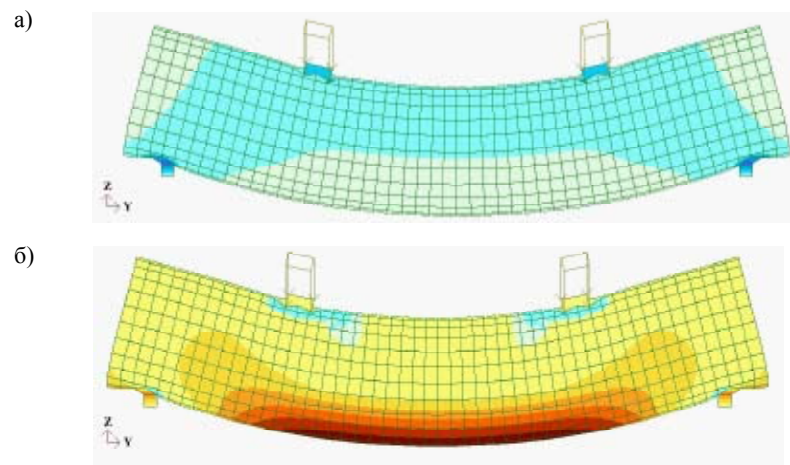


Рис. 2. Изополю главных сжимающих (а), растягивающих (б) напряжений

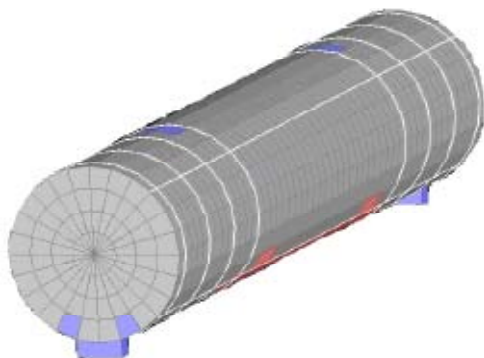


Рис. 3. Появление первых трещин в зоне чистого изгиба

няющихся от опоры к точке приложения нагрузки (рис. 4). Разрушение балки происходит по направлению главных сжимающих напряжений (рис. 2 а).

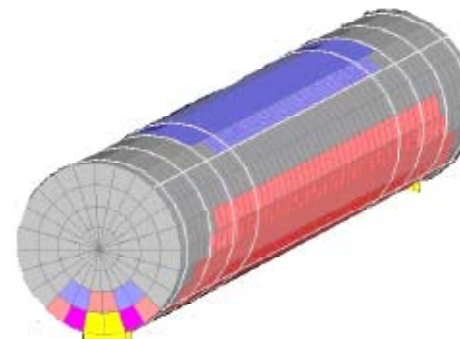


Рис.4. Предразрушенное состояние

По результатам моделирования железобетонного элемента круглого сечения при действии поперечных сил в комплексной программе «ЛИРА», можно предположить, что элементы круглого сечения будут иметь схожую картину трещинообразования и характер разрушения с элементами прямоугольного сечения.

2. Впервые разработаны теоретические основы и методика расчета по первой группе предельных состояний фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при поперечном изгибе.

В основе расчетной модели по определению прочности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения от действия поперечных сил принята следующая модель разрушения: критическое наклонное сечение проходит по наклонной трещине, пересекая поперечную кольцевую и продольную арматуру, а также сжатую зону над наклонной трещиной. Разрушение элемента по наклонному сечению происходит при достижении кольцевой арматурой предела текучести, сжатая зона не выдерживает одновременно действующего в ней сжатия и среза, вследствие чего части, разделенные кривой трещиной, взаимно сдвигаются. В данной работе рассматривается картина разрушения, когда анкеровка продольной арматуры обеспечена, т. е. разрушение происходит от преобладающего действия поперечной силы.

Для построения расчетной модели приняты следующие допущения:

- 1) Нормальные напряжения в сжатой зоне фибробетона принимаются равными расчетному сопротивлению фибробетона сжатию R_{fb} .
- 2) Максимальные касательные напряжения в фибробетоне достигают предела прочности фибробетона на срез R_{fsh} .
- 3) Напряжения в продольной арматуре, пересекающей опасное наклонное сечение, достигает предела текучести.

4) Доля участия фибробетона в работе на растяжение фиброжелезобетонна принята с учетом выхода бетона из работы в стадии, близкой к предельной. Такой прием следует признать более осторожным, чем это принято в действующих нормативных документах по фибробетону, где за расчетное сопротивление принимается полный предел прочности на растяжение. Таким образом, расчетное сопротивление фибробетонна в растянутой зоне может быть выражено зависимостью: $\sigma_{fbt} = R_{fbt} - R_{bt}$, где R_{fbt} – расчетное сопротивление фибробетона растяжению, R_{bt} – расчетное сопротивление железобетона растяжению.

Расчетная схема представлена на рисунке 5.

Условие прочности фиброжелезобетонного элемента на действие поперечной силы записывается в виде:

$$Q \leq Q_{fb} + Q_{fbt} + \sum Q_{si} + \sum Q_{swi} + Q_{crc}$$

где Q_{fb} , Q_{fbt} – поперечные усилия, воспринимаемые сжатой и растянутой зонами фибробетонна; Q_{si} , Q_{sw} – поперечные усилия, воспринимаемые продольной и поперечной арматурой; Q_{crc} – поперечное усилие, воспринимаемое зацеплением берегов наклонных трещин.

В основе формулы для определения величины поперечного усилия, воспринимаемого фибробетоном сжатой зоны, лежит предложение А.С.Залесова об учете реальной картины касательных напряжений в сжатой зоне элемента, в нашем случае эта формула может быть представлена в данном виде:

$$Q_{fb} = \frac{3\pi r^4 \tau_{max} h}{4(r^2 - y^2)c}$$

где $y = 0.5d - x$, d – диаметр поперечного сечения элемента, r – радиус поперечного сечения элемента. Величина предела прочности на срез фибробетона была определена с помощью специальных экспериментов (см. рис. 11).

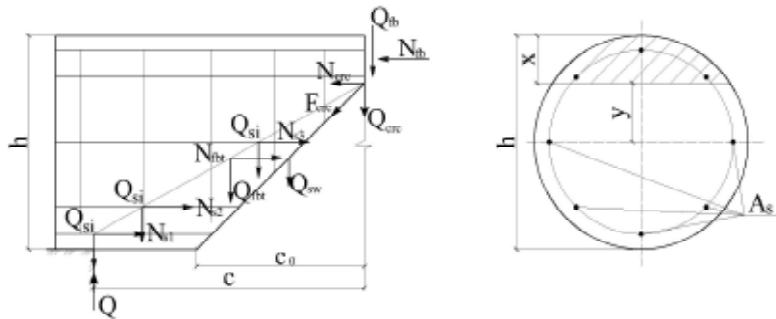


Рис. 5. Расчетная схема усилий в наклонном сечении

В результате обработки экспериментальных данных (см. след. раздел) была получена эмпирическая формула:

$$\tau_{max} = R_{fsh} = 0,35\sqrt{R_{fb}R_{fbt}}$$

Поперечное усилие, воспринимаемое фибробетоном растянутой зоны, определяется выражением:

$$Q_{fbt} = 0,5\sigma_{fbt}A_{crcnp}$$

где A_{crcnp} – приведенная площадь, эквивалентная эллипсу, полученному отсечением сжатой зоной фибробетонна (рис. 6), представлена в виде:

$$A_{crc} = \pi r^2 z^2 - \pi(r^2(2z - \sqrt{z^2 - (2r - x)^2})^2) \approx A_{crcnp} = \frac{2r^2 - 2rx + 1.5r^2 \sin^2 \theta}{\sin \theta}$$

где θ – угол наклона трещины, r – радиус поперечного сечения элемента, x – высота сжатой зоны бетона. Принятая площадь обеспечивает погрешность менее 5%.

В месте пересечения с наклонной трещиной продольная арматура испытывает как растяжение, так и изгиб вследствие взаимного смещения частей элемента, разделенных наклонной трещиной (рис. 7). В продольной арматуре в месте пересечения ее наклонным сечением возникает осевое продольное растягивающее и поперечное усилие, называемое, нагельным, которое, в свою очередь, может вызывать откол бетона защитного слоя.

Нагельное усилие может определяться, исходя из предельного состояния при отрыве или раскалывании бетонного слоя, а также, исходя из предельного состояния в продольном арматурном стержне. Предельное состояние при отрыве защитного слоя наступит раньше, чем касательные на-

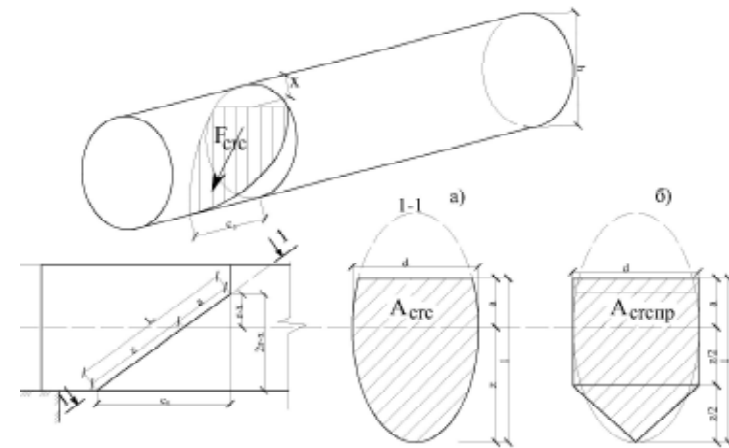


Рис. 6. К определению площади растянутой зоны фибробетонна



Рис. 7. Усилия в продольной арматуре

пряжения в арматуре достигнут своих максимальных значений. Определение площади откола защитного слоя (рис. 8) позволяет получить нагельное усилие в виде:

$$Q_{si} = nR_{fb}(3r^2 + 3ra + a^2 - \frac{\pi r^2}{2}),$$

где n – количество стержней рабочей арматуры.

Усилия в поперечной арматуре определяются для каждого поперечного стержня отдельно. Зная высоту сжатой зоны бетона над наклонной трещиной и длину горизонтальной проекции наклонной трещины, можно определить место приложения поперечного усилия в каждом стержне отдельно (рис. 9).

Допускаем, что достижение максимальных напряжений будет в том случае, когда наклонная трещина пересечет хомут точно в его середине. Т.е. направления напряжений, равных пределу текучести поперечной арматуры, будут проходить по касательной, а фактический вектор будет направлен по вертикали (рис. 9).

Согласно рис. 10, Q_{swi} достигает своих максимальных значений, когда наклонная трещина пересекает поперечную арматуру посередине, т.е. когда $b_i = 0$, а минимальных значений при $b_i = r$.

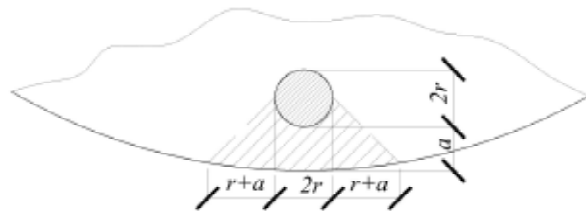


Рис. 8. К определению нагельного эффекта, a – защитный слой продольной арматуры

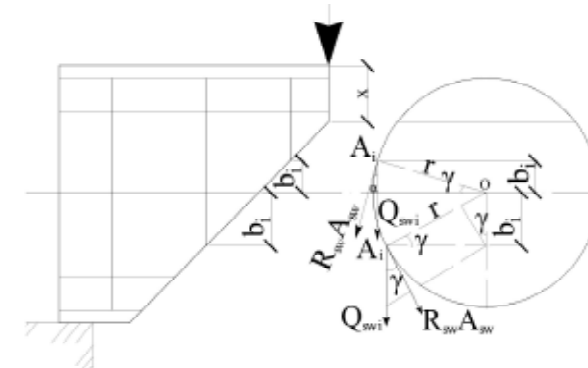


Рис. 9. Усилия в поперечной арматуре: A_i – точки пересечения наклонной трещины поперечных хомутов; γ – угол между касательным направлением напряжений и вертикалью; b_i – расстояние от центра до точки пересечения трещины; r – радиус кольцевой арматуры

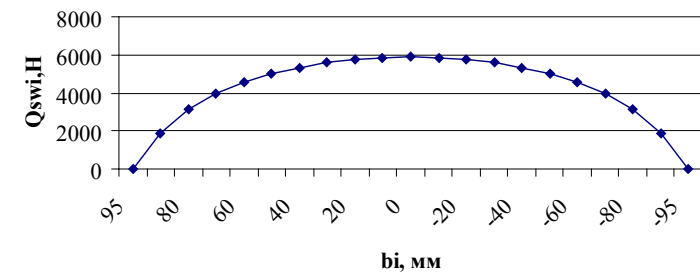


Рис. 10. График зависимости поперечного усилия Q_{sw} , воспринимаемого поперечной арматурой, от расстояния b_i

Таким образом, поперечное усилие, действующее в хомутах, определяется выражением:

$$Q_{swi} = R_{sw} A_{sw} \cos \gamma; \cos \gamma = \sqrt{1 - (b_i / r)^2}.$$

Количество хомутов, попавших в наклонную трещину, находится с помощью проекции опасной наклонной трещины c_0 , которая определяется из минимума выражения $Q_{fb} + Q_{sw}$

$$Q = \frac{M_{fb}}{c} + q_{sw} c_0; \frac{dQ}{dc_0} = -\frac{M_{fb}}{c^2} + q_{sw} = 0.$$

Таким образом, проекция опасной наклонной трещины определяется выражением:

$$c_0 = \sqrt{\frac{M_{fb}}{q_{sw}}}, \text{ где } M_{fb} = \frac{3\pi r^4 \tau h}{4(r^2 - y^2)}.$$

Силы зацепления, возникающие в результате взаимного смещения берегов наклонной трещины, действуют по берегам наклонной трещины и определяются через расчетное сопротивление фибробетона растяжению. Максимального своего значения силы зацепления достигают только в вершине наклонной трещины. В этом случае допустимо, по нашему мнению, выражение для определения доли поперечного усилия записать с учетом поправки А.С. Залесова в таком виде:

$Q_{crc} = 0,1R_{bt}A_{cрсп} \cos \theta$, где θ - угол наклона опасной наклонной трещины.

Таким образом, получены все необходимые зависимости для определения несущей способности фиброжелезобетонного элемента круглого сечения при поперечном изгибе.

3. Получены новые опытные данные о влиянии фибрового армирования на прочность фибробетонных элементов при действии среза.

В связи с отсутствием опытных и теоретических данных о прочности фибробетона при действии среза возникла необходимость в экспериментальном исследовании данного вопроса.

Целью эксперимента является исследование влияния процента фибрового армирования на прочность фибробетона при действии среза.

А. Н. Петров с целью исследования бетона при нагружении срезом использует в своих опытах три схемы опытных образцов, описывает достоинства и недостатки каждой из схем.

В данной работе принята, по нашему мнению, наиболее подходящая схема для определения прочности бетона и фибробетона при действии среза (рис. 11).

Были запроектированы опытные образцы в количестве 12 штук, из них 9 фиброжелезобетонных и 3 контрольных образца из железобетона. Образцы отличались только процентом фибрового армирования.

Образцы представляли собой S - образные бетонные и фибробетонные элементы. Армирование и геометрические размеры железобетонных и фиброжелезобетонных образцов представлены на рисунке 11.

Фибровое армирование увеличивает усилие разрушения, препятствуя образованию трещины. Образец с добавлением фибры имеет более вязкий характер разрушения.

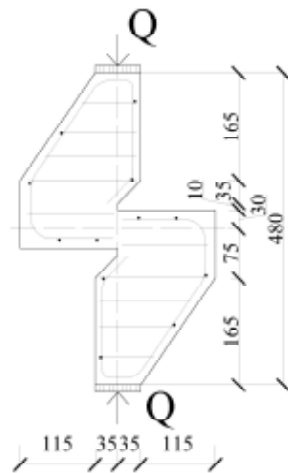


Рис. 11. Схема армирования

При появлении магистральной трещины разрушение сопровождалось характерным потрескиванием, обусловленным выдергиванием фибр из тела бетона (рис. 12). Процесс разрушения длился некоторое время с падением нагрузки до 0,3-0,4 от разрушающей.

Результаты испытаний S - образных образцов при действии среза представлены в таблице 1.

При добавлении фибрового армирования в количестве $\mu_f=1\%, 2\%, 3\%$, прочность при действии среза увеличилась в 1.93, в 2.4 и в 3.27 раза, соответственно.

Таблица 1

Шифр (см. рис. 16)	Призменная прочность, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Прочность при срезе (R_{shon}), МПа	$R_{shтеор}$, МПа
1ФЖБ	32,2	1,56	2,32	2,48
2ФЖБ	35,5	1,98	2,88	2,93
3ФЖБ	41,8	2,68	3,92	3,71
ЖБ	30	0,8	1,2	1,7

По результатам опытных данных прочность фибробетона на действие среза может быть определена по формуле:

$$R_{sh} = 0,35\sqrt{R_{fb}R_{bt}}$$

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- фибровое армирование меняет характер разрушения и трещинообразования образцов, разрушение становится более вязким, чем в образцах из железобетона;



Рис. 12. Разрушение S-образных образцов

- прочность фиброжелезобетонных образцов при действии среза по сравнению с контрольными образцами из железобетона оказалась больше, в среднем по сериям при проценте фибрового армирования $\mu_f=1\%$ в 1,93 раза, при $\mu_f=2\%$ в 2,4 раза, при $\mu_f=3\%$ в 3,27 раза;

- в результате проведенных исследований получена эмпирическая зависимость прочности при действии среза для фибробетона при разном проценте фибрового армирования.

4. Впервые проведены экспериментальные исследования и получены новые данные о влиянии фибрового армирования на несущую способность элементов круглого сечения при действии поперечных сил

Было запланировано 3 серии опытных балок в количестве 12 штук. Геометрические размеры и армирование представлены на рисунке 13.

Опытные балки отличались процентом фибрового армирования. Для сравнения результатов одновременно с изготовлением опытных образцов были запроектированы контрольные образцы - железобетонные балки.

Первые трещины появлялись на растянутой грани образца в зоне чистого изгиба или под сосредоточенными силами. С увеличением нагрузки трещины распространялись ближе к опорам. Заметим, что полученные данные коррелируются с результатами численных экспериментов, описанных выше, как по характеру трещинообразования, так и по характеру разрушения.

Разрушение фиброжелезобетонных образцов происходило от действия поперечных сил. Эксперимент позволил получить дополнительную информацию о работе фиброжелезобетонных элементов круглого сечения в условиях поперечного изгиба. Так с увеличением процента фибрового армирования наблюдалось уменьшение проекции опасной наклонной трещины. Разрушение образцов с добавлением фибрового армирования происходило значительно медленнее, чем железобетонных образцов. Нагрузка, при которой появлялись трещины, с ростом объема фибрового армирования возрастала,

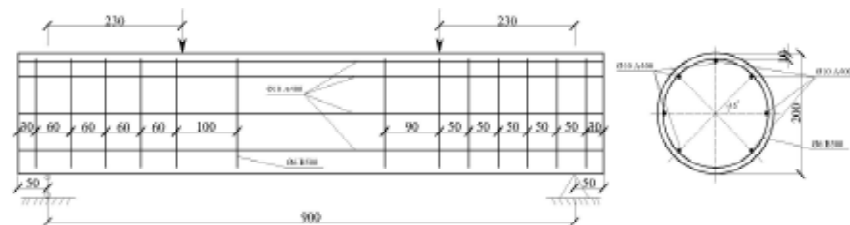


Рис. 13. Схема армирования и геометрические размеры образцов серии: 1ФЖБ, 2ФЖБ, 3ФЖБ

Примечание: 1-ая цифра обозначает порядковый номер и показывает процент фибрового армирования, ФЖБ – обозначение фиброжелезобетонных образцов

так при $\mu_f = 3\%$ усилие трещинообразования повысилось по сравнению с железобетонными образцами в два раза. Одновременно возрастало количество трещин, причем процесс трещинообразования в фиброжелезобетонных образцах протекал практически до разрушения. Замечено, что и рост раскрытия трещин в железобетонных элементах протекал более интенсивно, при этом ширина раскрытия трещин в фиброжелезобетонных образцах была меньше чем в железобетонных до двух раз при одинаковой нагрузке.

Сопоставление опытных данных и теоретических расчетов приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, несущая способность, вычисленная по формулам СП 52-104-2006 для сечения прямоугольной формы, эквивалентной круглому, дает значительное отклонение несущей способности, тогда как предложенная методика расчета удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Таблица 2

Несущая способность на действие поперечных сил, кН	Процент фибрового армирования, %			
	0	1	2	3
СП 52-104-2006	138,04	189,55	211,42	218,22
Предложенная модель расчета	93,8	147,83	186,15	196,54
Опытные данные	84,3	120,3	145,3	173,4

Из проведенных исследований можно заключить:

1. Предложенная теоретическая модель позволила построить методику расчета прочности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил, удовлетворительно согласующуюся с опытными данными и пригодными для ее использования в проектной практике.

2. Прочность фиброжелезобетонных образцов при действии поперечных сил по сравнению с контрольными образцами из железобетона оказалась больше от 1,42 до 2,05 раз в среднем по сериям: при проценте фибрового армирования $\mu_f=1\%$ в 1,42 раза, при $\mu_f=2\%$ в 1,72 раза, при $\mu_f=3\%$ в 2,05 раза.

3. Трещиностойкость фиброжелезобетонных образцов существенно превысила эти параметры для железобетонных конструкций. Так при проценте фибрового армирования $\mu_f=3\%$ усилие трещинообразования повысилось по сравнению с железобетонными образцами в два раза.

4. Увеличилась вязкость разрушения фиброжелезобетонных образцов по сравнению с образцами из железобетона: существенно меняется картина последней стадии разрушения, которая происходит не так хрупко как в конструкциях из железобетона, а с постепенным раскрытием трещин более плавно и более продолжительно.

5. С увеличением процента фибрового армирования наблюдается уменьшение проекции опасной наклонной трещины, что свидетельствует о положительном влиянии фибр на работу наклонного сечения.

5. Проведены экспериментально-теоретические исследования влияния продольного усилия сжатия на несущую способность фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил, которые позволили получить экспериментально-теоретические параметры, обеспечивающие получение адекватных результатов при расчете по первой группе предельных состояний подобных конструкций.

Было запланировано 3 серии опытных элементов в количестве 12 штук (табл. 3), в которых варьировалось продольное осевое усилие сжатия. Армирование и геометрические размеры представлены на (рис. 13).

Порядок испытаний был принят следующий: к опытным образцам прикладывалось продольное усилие сжатия до нужного значения, затем постепенно увеличивалась поперечная нагрузка до разрушения элемента.

Характер трещинообразования качественно аналогичен таковому у образцов без продольного сжатия, однако значение усилий трещинообразования возрастает с ростом усилия обжатия (рис. 16).

Первые трещины возникали под точками приложения нагрузки в растянутой зоне и в зоне чистого изгиба. С увеличением нагрузки появлялись от опоры наклонные трещины, стремящиеся к точке приложения нагрузки.

В образцах с продольным сжатием разрушение было еще более вязким и сопровождающимся плавным выходом конструкции из работы.

В таблицах 5, 6 приведено сравнение несущей способности по предложенной методике и по существующим нормативным документам для фи-



Рис. 16. Разрушение ФЖБ образцов. Серии 1ФЖБ-10, 1ФЖБ-14, 1ФЖБ-20, где первая цифра означает процент фибрового армирования, ФЖБ - фиброжелезобетон, последняя цифра - напряжение продольного сжатия

брожелезобетонных и железобетонных образцов. Как видно из таблиц 5 и 6, несущая способность при действии поперечных сил увеличилась в 1,5, 1,95 и 2,32 раза при продольном осевом сжатии 10 т, 12 т, 24 т., соответственно для фибробетонных образцов и в 1,45, 1,83 и 2,39 раза при продольном осевом сжатии 10 т, 12 т, 24 т., соответственно, для железобетонных образцов.

Таблица 5

N, T	β	φ_n			$\varphi_{\text{ноп}}$	Q_n, T			$Q_{\text{ноп}}, T$
		СНиП 2.03.01.84	СП 52.101.2003	СП 63.13330.2012		СНиП 2.03.01.84	СП 52.101.2003	СП 63.13330.2012	
0	0	1	1	1	1	14,7	14,7	14,7	12,0
10	0,1	1,23	1,02	1,12	1,51	19,06	15,82	17,04	18,1
14	0,14	1,32	1,26	1,17	1,95	20,48	19,48	18,14	23,5
20	0,2	1,46	1,34	1,25	2,34	22,6	20,68	19,28	28,2

Примечание: $\beta = N / N_b$; $\varphi_n = Q_n / Q$; $\varphi_{\text{ноп}} = Q_{\text{ноп}} / Q_n$; $Q_n = \varphi_n Q$, где N – усилие сжатия, $N_b = R_{fb} + \sum R_{sc} A_s$, $Q_{\text{ноп}}$ – экспериментальное значение предельной поперечной силы, воспринимаемой образцом при совместном действии продольных и поперечных сил, Q – теоретическая несущая способность, вычисленная по предложенной расчетной модели (см. п. 2)

Таблица 6

N, T	β	φ_n			$\varphi_{\text{ноп}}$	Q_n, T			$Q_{\text{ноп}}, T$
		СНиП 2.03.01.84	СП 52.101.2003	СП 63.13330.2012		СНиП 2.03.01.84	СП 52.101.2003	СП 63.13330.2012	
0	0	1	1	1	1	9,3	9,3	9,3	8,4
8,5	0,09	1,317	1,183	1,11	1,45	12,12	10,88	10,212	12,2
14	0,15	1,52	1,27	1,183	1,83	14	11,68	10,88	15,4
20	0,21	1,739	1,343	1,25	2,393	16	12,36	11,5	20,1

Таблица 7

N, T	$\Delta (\%)$ ФЖБ			$Q_{\text{ноп}}, T$	$\Delta (\%)$ ЖБ			$Q_{\text{ноп}}, T$
	СНиП 2.03.01.84	СП 52.101.2003	СП 63.13330.2012		ФЖБ	СНиП 2.03.01.84	СП 52.101.2003	
0	22,5	22,5	22,5	12	10,7	10,7	10,7	8,4
10	5,3	12,6	5,9	18,1	0,6	10,8	16,3	12,2
14	12,95	17,1	22,8	23,5	9,9	24,2	29,4	15,4
20	19,9	26,7	31,6	28,2	20,3	57,2	61,49	20,1

Из таблицы 7 следует, что теоретические расчеты с применением разных зависимостей, принятых в нормативных документах, имеют значительный разброс по сравнению с экспериментальными данными.

На рисунке 17, 18 представлен график зависимости несущей способности на поперечную силу от действия усилий обжатия. Как видно из графиков, опытные значения значительно превышают теоретические расчеты.

Как видно из рисунков 17 и 18, наиболее близка зависимость, которая была принята в СНиП 2.01.01-84*, но и она существенно отличается от экспериментальных данных.

На графике 19 представлена зависимость $\varphi_{\text{ноп}}$ от β , полученная для железобетонных и фибробетонных элементов круглого сечения при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил. В результате обработки экспериментальных данных была получена линейная зависимость прироста прочности $\varphi_{\text{ноп}}$ от коэффициента β , выражающаяся формулой:

$$\varphi_{\text{ноп}} = 6,9\beta + 1.$$

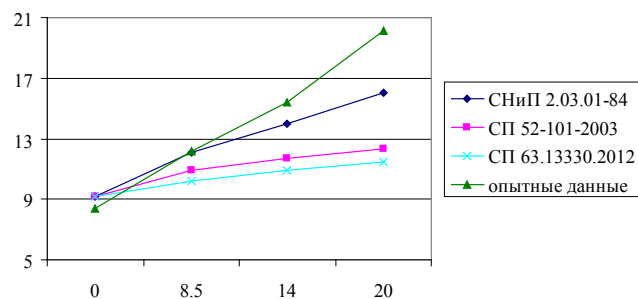


Рис. 17. Зависимость Q от N в железобетонном элементе, где Q - предельная поперечная сила, N - усилие обжатия

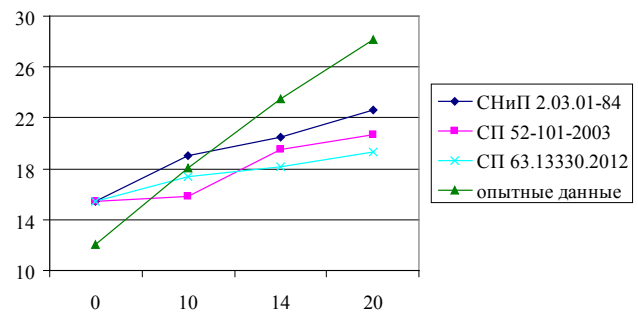


Рис. 18. Зависимость Q от N в фиброжелезобетонном элементе, где Q - предельная поперечная сила, N - усилие обжатия

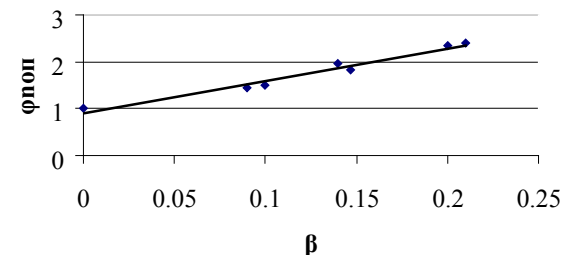


Рис. 19. Зависимость $\varphi_{\text{ноп}}$ от β , где $\varphi_{\text{ноп}} = Q_{\text{ноп}}/Q_{\text{оп}}$, $\beta = N/N_b$

Предельная несущая способность от совместного действия продольной сжимающей и поперечной силы будет иметь вид:

$$Q_n = \varphi_n Q.$$

Влияние продольных сжимающих сил по нормативной методике с помощью коэффициента φ_n недооценивается при определении прочности фиброжелезобетонных конструкций круглого сечения. По результатам проведенных исследований была предложена методика расчета прочности конструкций круглого сечения при совместном действии продольных осевых сжимающих и поперечных сил, дающая удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Из проведенных исследований можно заключить:

- добавление продольных сжимающих сил увеличивает несущую способность железобетонных и фиброжелезобетонных элементов по наклонному сечению при действии поперечных сил;
- количественное влияние продольной силы для железобетонных и фиброжелезобетонных образцов было практически одинаковым. Для железобетонных образцов увеличение составило 50%, 87%, 139%, для фиброжелезобетонных 50%, 95%, 134% в зависимости от продольного усилия сжатия;
- расчеты по существующим нормативным документам элементов круглого сечения из сталефибробетона при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил дают значительное отклонение от опытных данных ($\Delta_{\text{max}} = 31,63\%$);
- в результате проведенных исследований получены экспериментально-теоретические параметры, обеспечивающие получение адекватных результатов при расчете прочности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил.

Общие выводы

1. По результатам моделирования железобетонного элемента круглого сечения при действии поперечных сил в комплексной программе «ЛИРА», элементы круглого сечения будут иметь схожую картину трещинообразования и характер разрушения с элементами прямоугольного сечения.

2. В результате проведенных исследований получены численные значения роста прочности фибробетона на действие среза по сравнению с бетоном (до 3.27 раз) и выведена эмпирическая формула прочности на срез при различном проценте фибрового армирования.

3. Обнаружено значительное возрастание прочности фиброжелезобетонных образцов круглого сечения по сравнению с железобетонными образцами до 2 раз, работающих в условиях поперечного изгиба. Трещиностойкость фиброжелезобетонных образцов существенно превысила эти параметры для железобетонных конструкций. Так при проценте фибрового армирования $\mu=3\%$ усилие трещинообразования повысилось по сравнению с железобетонными образцами в два раза. Увеличилась вязкость разрушения фиброжелезобетонных образцов по сравнению с образцами из железобетона: существенно меняется картина последней стадии разрушения, которая происходит не так хрупко как в конструкциях из железобетона, а с постепенным раскрытием трещин более плавно и более продолжительно. С увеличением процента фибрового армирования наблюдается уменьшение проекции опасной наклонной трещины, что свидетельствует о положительном влиянии фибр на работу наклонного сечения.

4. Экспериментально доказано положительное влияние продольного осевого усилия сжатия в пределах, не превышающих 20% от предела прочности на осевое сжатие, на несущую способность фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при совместном действии продольных и поперечных сил. Количественное влияние продольной силы для железобетонных и фиброжелезобетонных образцов было практически одинаковым. Для железобетонных образцов увеличение составило 50%, 87%, 139%, для фиброжелезобетонных 50%, 95%, 134% в зависимости от продольного усилия сжатия;

5. Предложен метод расчета для определения несущей способности фиброжелезобетонных элементов круглого сечения на действие поперечных сил и совместное действие продольных осевых сжимающих и поперечных сил. Результаты расчета по предложенной методике дают удовлетворительное согласие с опытными данными и могут быть рекомендованы для внедрения в проектную практику.

III. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. *Хегай, М.О.*, Напряженно–деформированное состояние фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил [Текст] / М.О. Хегай // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №4 (39). – С.60-65. (0,4 п.л.)

2. *Хегай М.О.* Экспериментальные исследования элементов круглого сечения при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил / В. И. Морозов, М. О. Хегай [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/113-10586>

3. *Хегай М.О.* К расчету элементов круглого сечения из фибробетона при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил / М. О. Хегай [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/111-10598>

Статьи, опубликованные в прочих изданиях:

4. *Хегай, М. О.*, Экспериментально теоретические исследования фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил [Текст] / М.О. Хегай // Актуальные проблемы архитектуры и строительства: материалы V-ой международной конференции. СПбГАСУ – Ч. I – 2013. – С.466-470. (0,4 п.л.)

5. *Хегай, М. О.*, К расчету изгибаемых фиброжелезобетонных элементов круглого сечения на действие поперечной силы [Текст] / М.О. Хегай // Актуальные проблемы современного строительства и архитектуры: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПбГАСУ – Ч. I – 2012. – С.61-63. (0,3 п.л.)

6. *Хегай, М. О.*, Напряженно деформированное состояние фиброжелезобетонных элементов круглого сечения при действии поперечных сил [Текст] / М.О. Хегай // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПбГАСУ – Ч. I – 2013. – С.65-67. (0,2 п.л.)

Компьютерная верстка Н. И. Печуконис

Подписано к печати 07.11.13. Формат 60×84. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 157.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская ул., д. 5.

