

На правах рукописи



СОКУРОВ Алим Зуберович

**ПРОДАВЛИВАНИЕ ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ,
УСИЛЕННЫХ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРОЙ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Научно–исследовательском, проектно – конструкторском и технологическом институте бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева) – АО «НИЦ «Строительство».

Научный руководитель: **Болгов Андрей Николаевич**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Трёкин Николай Николаевич**,
доктор технических наук, начальник отдела
конструктивных систем
АО "ЦНИИПромзданий" (АО "Центральный
научно-исследовательский и проектно-
экспериментальный институт промышленных
зданий и сооружений)
Силантьев Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
железобетонных и каменных конструкций
НИУ МГСУ (Национальный
исследовательский московский
государственный строительный университет)

Ведущая организация: **ЗАО «Инрекон»** (Научный и проектный
институт реконструкции исторических
городов, разработки и внедрения
прогрессивных строительных систем)

Защита состоится «17» декабря 2015 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при ФГБУ «Научно–исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21, светотехнический корпус, к.205, тел. (495) 482–40–76, факс: (495) 482 –40–60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно–методическом фонде НИИСФ РААСН и на сайте: [http: //niisf.ru/](http://niisf.ru/)

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Умнякова Нина Павловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Плоские безкапитальные безбалочные перекрытия являются наиболее массовыми конструкциями в современных зданиях из монолитного железобетона. Нередко в строительной практике возникает необходимость усиления таких перекрытий по различным причинам: ошибки при проектировании, низкое качество строительства, увеличение нагрузок на перекрытие и т.п.

Одним из наиболее эффективных, с конструктивной точки зрения, и архитектурно привлекательных методов усиления плит на продавливание является установка поперечного армирования. Проведённые ранее исследования как в нашей стране, так и за рубежом показали, что поперечная арматура усиления, установленная в сквозные отверстия в опорной зоне плиты и имеющая надёжную анкеровку по концам, значительно повышает прочность и предельную деформативность плиты при продавливании.

Другим альтернативным методом усиления плит на продавливание (в ряде случаев единственно возможным), является усиление вклеенной арматурой, расположенной под углом к поверхности плиты, которая позволяет повысить прочность плиты на продавливание при одностороннем доступе, например, в случае необходимости усиления фундаментной плиты, либо в случае отсутствия доступа к верхней поверхности плит перекрытий и покрытий.

Однако отсутствие методики расчёта и целый ряд неизученных вопросов сдерживают внедрение таких методов усиления.

За последние годы произошло несколько аварий зданий, связанных с обрушением перекрытий в следствие разрушения от продавливания, которые привели к значительным экономическим потерям, а также, к сожалению, к человеческим жертвам.

Эти обстоятельства подтверждают актуальность и важность изучения вопросов усиления железобетонных плит на продавливание.

Степень разработанности темы диссертации.

Теоретические основы методов расчета прочности плоских железобетонных плит на продавливание рассматривались в работах отечественных ученых: Гвоздева А.А., Коровина Н.Н., Голосова В.Н., Фишеровой М.Ф., Сергеевского А.Д., Качановского С.Г., Залесова А.С., Карпенко Н.И. и др., а также зарубежных ученых: Dilger W.H., Amin Ghali, Aurelio Muttoni и др.

В результате выполненного обзора исследований по работе плоских железобетонных плит при продавливании установлено, что основные положения, формулы и зависимости для расчёта несущей способности плит на продавливание выведены на основе экспериментальных данных и носят полуэмпирический характер. Большая часть исследований связана с изучением работы плит на продавливание армированных поперечной арматурой, исследования плит, усиленных поперечным армированием, весьма ограничены.

Исследования усиленных плит показывают, что поперечное армирование значительно повышает прочность и пластичность плит и тем самым является эффективным методом усиления плит на продавливание. В качестве поперечной

арматуры на продавливание использовались резьбовые шпильки, углепластиковые и стеклопластиковые ленты. Вместе с тем остаются вопросы, требующие дополнительных исследований:

- Влияние величины предварительного напряжения арматуры усиления;
- Установление допустимого шага поперечной арматуры усиления;
- Эффективность применения поперечной арматуры из высокопрочной стали;
- Влияние сжатия плиты со стороны верхней колонны;
- Влияние эксцентриситета приложения продавливающей силы.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является разработка методики расчёта прочности на продавливание плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Путем проведения экспериментальных исследований на опытных образцах, выявить работу плит при продавливании, усиленных арматурой в виде сквозных поперечных и вклеенных наклонных шпилек в том числе, под нагрузкой.
- Подобрать параметры КЭ модели, позволяющие с достаточной точностью моделировать работу плит при продавливании, усиленных поперечной арматурой.
- Выполнить численный эксперимент с использованием КЭ моделей для изучения влияния наиболее значимых параметров усиления на работу плит при продавливании: коэффициента поперечного армирования, предварительного напряжения арматуры усиления, шага постановки, прочности арматуры усиления и влияния сжатия верхней колонны.
- Разработать инженерную методику для расчёта плит перекрытий, усиленных поперечной арматурой, позволяющую с достаточной для практического применения точностью определять прочность усиленных плит.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Получены экспериментальные данные о влиянии поперечной арматуры усиления, сжимающего усилия со стороны верхней колонны и совместного действия сосредоточенных сил и момента на несущую способность плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой, на продавливание промежуточных и крайних узлов;
- Установлены параметры конечно–элементной (КЭ) модели для расчёта плит на продавливание, учитывающие нелинейную работу бетона на всех стадиях нагружения, включая стадию разрушения;
- Получены теоретические данные о влиянии на работу плит в условиях продавливания коэффициента поперечного армирования, предварительного напряжения арматуры усиления, шага постановки, прочности арматуры усиления и сжатия верхней колонны;
- Предложена методика расчёта несущей способности плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой.

Теоретическую и практическую значимость диссертационной работы составляют:

- инженерная методика расчёта прочности усиленных железобетонных плит на продавливание, учитывающая: напряжено–деформированное состояние плиты до усиления; применение высокопрочной арматуры; совместное действие сосредоточенных сил и моментов; действие сжатия со стороны верхней колонны на плиту в зоне продавливания для плит перекрытий;
- рекомендации по конструированию усиления железобетонных плит на продавливание путем постановки поперечной арматуры.

Методология и методы диссертационного исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе использованы, принятые в экспериментальных исследованиях, методы нагружения конструкций и обработки результатов испытаний, базирующиеся на действующих нормативных документах (ГОСТ 8829-94). Также в исследованиях использовались методы расчета железобетонных конструкций с применением метода конечных элементов.

При разработке инженерной методики расчета прочности плоских плит, усиленных поперечной арматурой, использованы принятые положения и допущения в теории расчета строительных конструкций.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований плит на продавливание, усиленных поперечной арматурой, устанавливаемой в сквозные отверстия, а также наклонной арматурой, устанавливаемой на клеевом составе в шпур, просверленный под углом к поверхности плиты;
- результаты численных исследований работы усиленных на продавливание плит в зависимости от процента поперечного армирования, прочности арматурной стали, шага арматуры усиления, сжатия со стороны верхней колонны;
- инженерная методика для расчёта прочности плит на продавливание, усиленных поперечной арматурой.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена:

- применением нормированных методов испытания строительных конструкций;
- проведением исследований на КЭ моделях, показавших хорошее соответствие с опытными данными;
- использованием в теоретических исследованиях помимо экспериментальных данных полученных собственными силами, экспериментальных данных других авторов.

Апробация результатов. Основные положения диссертации доложены и обсуждены

- на конструкторской секции НИИЖБ им. А.А. Гвоздева в 2015 г.;
- на конференции в Санкт – Петербурге в 2011 г. Материалы XV научно – методической конференции ВИТИ посвященной памяти профессора В.Т.

Гроздова «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций»;

- в материалах I Международной (VII Всероссийской) конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкций» Чебоксары, 2012. 410 с.
- на III Всероссийской (II Международной) конференции «Бетон и железобетон – Взгляд в будущее» в г. Москва 2014 г.

Результаты, полученные в диссертации, были использованы в работах, проводимых в лаборатории железобетонных конструкций и контроля качества НИИЖБ при проектировании усиления против продавливания плоских железобетонных плит перекрытий зданий и сооружений, а также при разработке нормативных документов.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно п.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».

Внедрение результатов исследований. Полученные результаты использованы при разработке стандарта организации ОАО «НИЦ «Строительство» СТО 36554501–029–2012 по проектированию усиления железобетонных плит, усиленных вклеенными анкерами «Hilti HZA-P».

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 5 научных статьях, в том числе в 2 статьях в печатных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем работы 155 страниц, 17 таблиц, 104 рисунка. Список литературы содержит 78 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Дана краткая характеристика выполненной работы.

В первой главе представлен обзор имеющихся в отечественной и зарубежной литературе теоретических и экспериментальных исследований работы плоских железобетонных плит с поперечной арматурой на продавливание, в том числе усиленных поперечной арматурой.

Изучением работы плит на продавливание с поперечной арматурой, в том числе с поперечной арматурой усиления, в нашей стране и за рубежом занимались Фишера М.Ф., Морозенский В.Л., Пыжов Ю.К., Качановский С.Г. Коровин Н.Н.,

Плотников А.И., Dilger W.H., Ghali A., Elstner R.C., Hognestad E., Megally S., Regan P.E., Lips S., Muttoni A., Nielsen M.P., Polak M.A. и др..

Рассмотрена методика расчёта прочности на продавливание плоских железобетонных плит с поперечной арматурой, принятая в СП 63.13330.2012. Показано, что основные положения, формулы и зависимости для расчёта несущей способности плит на продавливание выведены на основе экспериментальных данных и носят полуэмпирический характер.

В ходе обзора выявлено, что исследования о работе плит, усиленных поперечной арматурой, весьма ограничены. Имеются единичные исследования плит, усиленных предварительно напряженной поперечной арматурой из стальных стержней, а также композитной (на основе углеродных и стеклопластиковых материалов) арматурой. Имеющиеся данные не учитывают напряженное состояние плиты до усиления и включают испытания плит, усиленных до нагружения.

Использование наклонной вклеенной арматуры для усиления плит на продавливание, предложенной недавно в Швейцарии, показало высокую эффективность данного решения. Вместе с тем, исследования не включали испытаний плит при совместном действии сосредоточенной силы и изгибающего момента.

Существенным преимуществом использования усиления с помощью поперечной арматуры по сравнению с альтернативными методами (кроме повышения прочности) является повышение пластичности плиты в опорной зоне, что важно с точки зрения повышения статической неопределимости железобетонных плит и надежности здания в целом.

В окончании главы делаются выводы о состоянии вопроса усиления железобетонных плит перекрытий поперечной арматурой, формулируются цель и задачи исследований диссертационной работы.

Во второй главе приведены методика и результаты экспериментальных исследований прочности железобетонных плит на продавливание, усиленных поперечной арматурой. Исследования выполнялись на образцах, моделирующих средние и крайние узлы колонн и плит перекрытий.

В соответствии с задачами диссертации проводилось исследование работы двух типов усиления: усиления в виде поперечной арматуры, устанавливаемой в сквозные отверстия плиты (рис.1а), а также усиление наклонной арматурой, устанавливаемой на химический анкер с нижней поверхности плиты (см. рис.1б).

В испытаниях изучались следующие факторы: тип армирования, процент арматуры усиления и её предварительное напряжение, степень обжатия плиты со стороны верхней колонны.

В рамках экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны 19 опытных образцов, моделирующих узлы сопряжения плиты и колонн. Сводные данные о параметрах испытанных образцов и основное армирование приведены в табл. 1, а конструкции опытных образцов – на рис. 2.

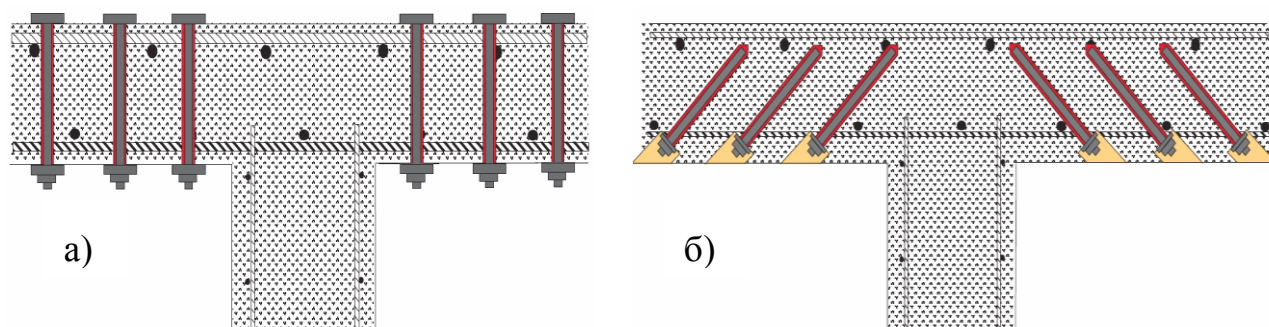


Рисунок 1. Типы поперечной арматуры усиления: а) сквозные шпильки с жесткой анкерровкой, б) наклонные шпильки на клеевом составе.

В первую группу образцов входили 4 контрольных, неусиленных образца и 6 образцов с усилением. Во вторую группу образцов входили 3 контрольных, неусиленных образца и 6 образцов с усилением.

Плиты у всех образцов имели толщину 140мм и размеры в плане 1700х1700мм для промежуточных образцов и 1700х950мм у крайних образцов. Плиты армировались нижней и верхней сеткой. Нижнее армирование выполнялось из арматуры Ø12 A500 с шагом 200 мм, верхнее – Ø12 A500 с шагом 75 и 100мм.

Верхняя и нижняя колонны имели высоту 450 мм и размеры поперечного сечения 200х200мм и 260х260мм. Продольное армирование колонн было выполнено из 4Ø20 A500, поперечное - Ø8 A240 с шагом 50 мм.

Таблица 1. Параметры опытных образцов

№ п/п	Группа	Марка образца	Расположение колонн	R_{bm} [МПа]	h_0 [мм]	ρ_s	μ_{sw} [%]	P_u [кН]	Характер разрушения
1	I	S1D0	промежуточное	21.3	110	0.010	–	234	P
2		S2D0	-//-	43.3	108	0.010	–	315	P
3		S3DW1	-//-	28.1	115	0.010	0.53	514	PO
4		S4DW1P	-//-	31.2	116	0.010	0.52	590	PO
5		S5DW2	-//-	43.3	108	0.010	0.51	500	PO
6		B1D0	крайнее	26.4	109	0.010	–	156	P
7		B2D0	-//-	35.5	108	0.010	–	147	P
8		B3DW1	-//-	29.6	113	0.010	0.65	216	HS
9		B4DW1	-//-	28.9	112	0.010	0.65	206	HS
10		B5DW2	-//-	37.3	108	0.010	0.56	250	HS
11	II	S1H0	промежуточное	27.8	100	0.015	–	300	P
12		S2HW1	-//-	33.9	100	0.015	1.22	465	PS
13		S3HW1E1	-//-	36.9	100	0.015	1.22	307	PS
14		S4HW2E2	-//-	33.4	100	0.015	1.22	261	PS
15		B1H0	крайнее	37.1	100	0.015	–	149	P
16		B2H0P	-//-	39.9	100	0.015	–	241	P
17		B3HW1	-//-	37.6	100	0.015	0.37	183	PS
18		B4HW2	-//-	37.6	100	0.015	1.14	176	PS
19		B5HW2P	-//-	39.9	100	0.015	1.14	319	PS

Примечание: P_u – разрушающая нагрузка, PS – разрушения в зоне поперечного армирования;
P – продавливание; PO – разрушение за контуром поперечного армирования.

Усиление плит I группы образцов состояло из поперечной арматуры, устанавливаемой в предварительно просверленные сквозные отверстия в плите с помощью алмазной коронки Ø12мм. Поперечная арматура выполнялась из

резьбовых шпилек М10 из стали класса 8.8. Анкеровка шпилек обеспечивалась гайками класса 8.8 и стальными пластинами размерами 40x40x12(t)мм. Для обеспечения включения поперечной арматуры в работу выполнялось предварительное натяжение шпилек динамометрическим ключом. Момент затяжки принимался равным 2–3 Н·м, что позволило достичь напряжений 50% от условного предела текучести арматуры усиления. Натяжение шпилек выполнялось на этапе нагружения, соответствующего 30% от теоретической разрушающей нагрузки неусиленного образца. Такое решение моделировало усиление под нагрузкой.

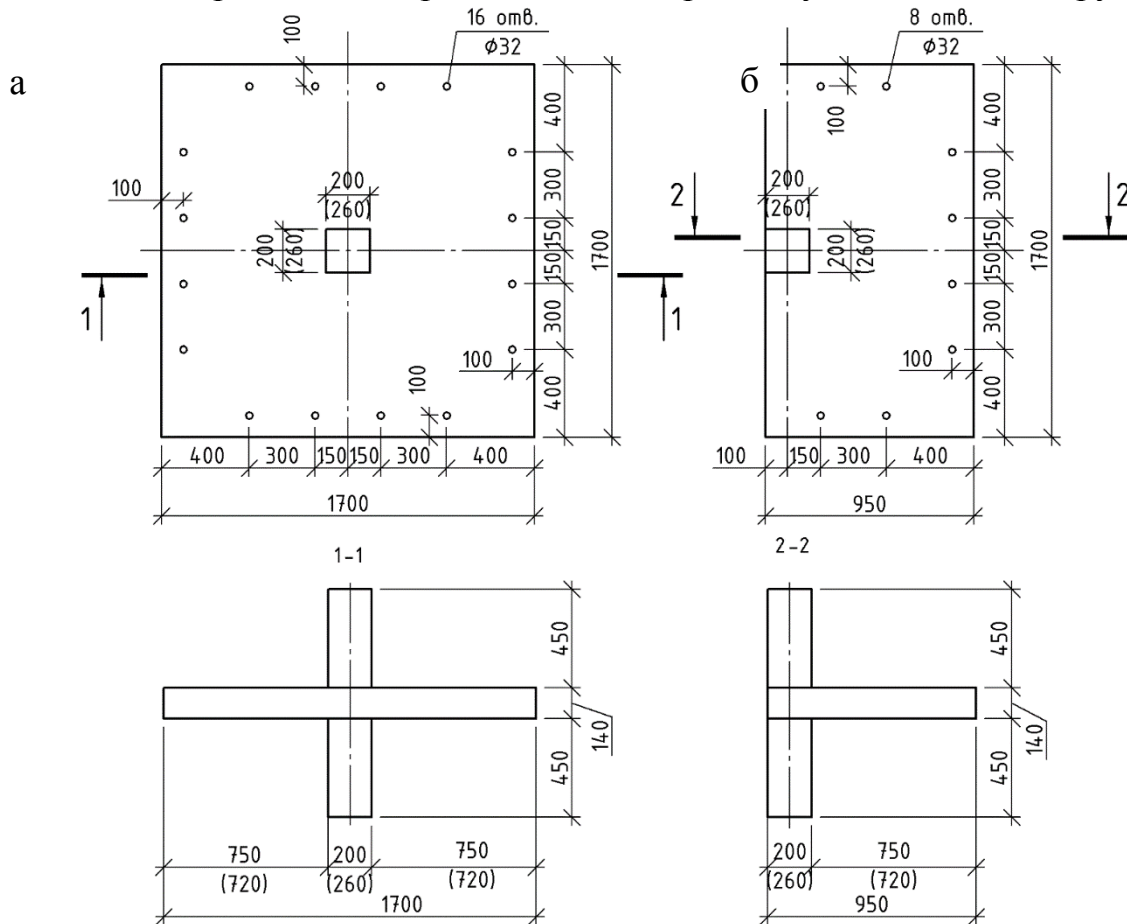


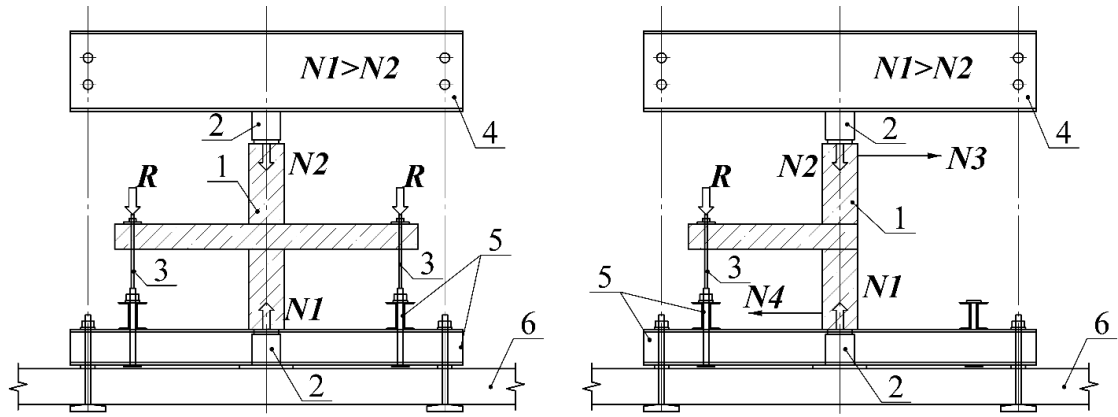
Рисунок 2. Опалубочные размеры опытных образцов: а) образцы, моделирующие промежуточные колонны, б) образцы, моделирующие крайние колонны

Усиление плит II группы опытных образцов выполнялось путем вклейки арматуры в пробуренные при помощи перфоратора шпуров под углом 45° к плите глубиной до верхней продольной арматуры. Поперечная арматура принималась из резьбовых шпилек М10, М6 из стали класса 5.8. Анкеровка шпилек обеспечивалась гайками класса 8 и шайбами диаметром 28 мм с наружной стороны плиты, а также химическим составом HILTI-RE 500 по всей длине шпильки. Предварительное натяжение шпилек выполнялась на следующий день после затвердения состава.

В опытных образцах S3HW1E1 и S4HW2E2, моделирующих промежуточные колонны, продавливающее усилие прикладывалось с эксцентриситетом равным 100 и 150 мм, соответственно.

Испытания опытных образцов проводились в силовой раме, представленной на рис. 3.

Нагрузка прикладывалась ступенями $1/20$ от теоретической разрушающей нагрузки, с выдержкой на каждой ступени около 5 мин. При испытании образцов фиксировались относительные деформации бетона нижней поверхности плиты, относительные деформации поперечных стержней, прогибы плиты, характер образования, развития и параметры трещин, величина разрушающей нагрузки и характер разрушения образцов.



1 – образец, 2 – гидравлический домкрат, 3 – тяги, 4 – траверса рамы,
5 – горизонтальная силовая рама, 6 – силовой пол

Рисунок 3. Схема испытательной установки:

а) промежуточные узлы, б) крайние узлы

В результате эксперимента разрушение большинства образцов произошло от продавливания. Исключения составили опытные образцы с арматурой усиления I типа, моделирующие крайние колонны (B3DW1, B4DW1, B5DW2). Разрушение данных образцов произошло по плите от изгибающего момента, не достигнув продавливания, и носило пластический характер.

Разрушение усиленных промежуточных опытных образцов с арматурой усиления I типа происходило за контуром поперечного армирования с образованием тела продавливания в форме усеченного конуса, с нижним основанием равным расстоянию между крайними шпильками усиления. Разрушение промежуточных образцов с арматурой усиления II типа происходило в зоне поперечного армирования с образованием тела продавливания в форме усеченной пирамиды, с нижним основанием равным форме поперечного сечения колонны.

Образование поверхности разрушения образцов происходило внезапно, при этом возникшие ранее силовые трещины в образцах не совпадали с будущей поверхностью разрушения. После разрушения образцы воспринимали остаточные усилия до 0,5–0,7 от предельной величины.

Характер трещинообразования опытных образцов I и II групп схожи. Первые трещины появлялись на верхней поверхности вокруг граней колонн на этапах нагружения 0,3–0,35 от разрушающего усилия для промежуточных образцов и 0,2–0,3 для крайних образцов и практически не зависели от наличия усиления. При нагрузках 0,35–0,45 от разрушающей нагрузки для промежуточных узлов и 0,3–0,4 для крайних узлов в плитах опытных образцов образовывались радиальные трещины от граней колонн и развивались к

внешним сторонам плиты. В предельных стадиях наибольшее раскрытие трещин в неусиленных образцах наблюдалось вокруг граней колонны и составляло около 1–1,2 мм. В образцах с усилением максимальное раскрытие трещин также наблюдалось по граням колонн, но ширина раскрытия трещин достигала 2–2,5 мм.

На основании проведённых экспериментальных исследований сделан вывод, что установка дополнительной поперечной арматуры усиления является эффективным методом усиления на продавливание и приводит к значительному повышению прочности плит, а также повышает пластичность разрушения.

Несущая способность и деформативность плит при продавливании образцов зависит от типа и процента поперечной арматуры, от внецентренного действия продавливающей силы, а также от сжимающей силы со стороны верхней колонны. Значительное влияние сжимающей силы на продавливание наблюдается в образцах, моделирующих крайние колонны, а в образцах, моделирующих промежуточные колонны, оно практически не заметно.

При увеличении коэффициента поперечной арматуры усиления меняется вид разрушения: при высоких коэффициентах поперечного армирования плита разрушается за зоной поперечного армирования.

Анализ величины шага между рядами поперечных стержней показывает, что поперечная арматура эффективна при шаге $s \leq h_0/2$ для шпилек с жесткой анкерровкой на концах и $s \leq 0,75 \cdot h_0$ – для поперечных стержней на химических анкерах.

Третья глава диссертации посвящена подбору параметров универсальной КЭ модели, реализованной в программном комплексе Abaqus, для более детального изучения работы на продавливание плит, усиленных поперечной арматурой, а также в главе приведены результаты сравнения численного исследования с результатами натурного эксперимента.

Выбор программы был связан с возможностью моделирования бетона как псевдопластического материала и возможность учёта дискретного трещинообразования, в отличие от распространённой на сегодня модели с размазанным интегральным трещинообразованием. С этой целью в качестве модели деформирования была выбрана модель *concrete damaged plasticity* – модель бетона с пластичным разрушением.

В качестве критерия прочности бетона в модели *concrete damaged plasticity* был выбран модифицированный критерий *Druker-Prager*.

Моделирование выполнялось с учетом возможности создания различных схем и последовательности нагружения.

Критерием приемлемости конечно-элементной сетки являлось приближение результатов расчёта к постоянным значениям при сгущении сетки КЭ. Было получено, что при шаге разбиения 7 мм и менее дальнейшее разбиение не приводит к изменению результата решения.

При моделировании бетона, опор и анкерных головок поперечных стержней применялись твердотельные КЭ C3D8(R). Продольная арматура в плитах и колоннах моделировалась с помощью стержневых КЭ B31. Моделирование совместной работы продольной арматуры и бетона

осуществлялось объединением перемещений с помощью процедуры встраивания "embedded".

Поперечная арматура усиления для решения задачи в явном решателе Abaqus/Explicit моделировалась с помощью специальных разъемов – коннекторов. Преднапряжение поперечной арматуры при усилении плиты на продавливание моделировалось с помощью «силы в разьеме».

В целях сокращения времени расчёта моделировались только $\frac{1}{4}$ часть модели. Граничные условия образца задавались при помощи осесимметричных ограничений. Между опорами и плитой опытных образцов моделировались контакты для корректного воссоздания условий эксперимента. Нагружение модели производилось монотонно возрастающей распределенной нагрузкой (давлением) на нижнюю грань колонны. Общий вид КЭ модели образца приведен на рис. 4.

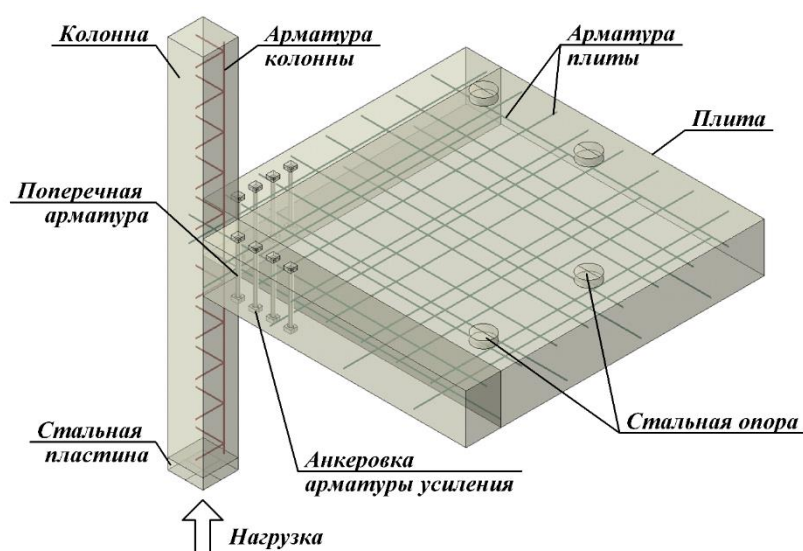


Рисунок 4. Общий вид численной модели

Для сравнения результатов исследования на КЭ моделях с экспериментальными были отобраны 11 образцов, моделирующие сопряжения промежуточной колонны с плитой перекрытия: из которых 6 образцов, испытанных в рамках настоящего исследования (S1D0, S2D0, S3DW1, S4DW1, S5DW2, S1HD0) и 5 образцов, испытанных зарубежными исследователями (Duarte, Ramos and Lúcio 2008 г.). Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что имеется хорошее совпадение теоретической разрушающей нагрузки, полученной с помощью КЭ модели, с экспериментальной. Среднее значение отношений несущей способности для экспериментальных образцов и для КЭ модели составляет $0,99 \pm 0,02$ при стандартном отклонении 0,09.

Общий вид КЭ моделей на различных этапах нагружения приведен на рис. 5. В результате анализа полученных результатов установлено, что схема образования и развития трещин в КЭ моделях и опытных образцах сравнительно близки.

Из представленных на рис. 6 графиков прогибов опытных образцов можно заметить, что КЭ модели удовлетворительно описывают реальное поведение узлов сопряжения плит с колонной под нагрузкой.

Таблица 2. Результаты расчёта

№ п/п	Марка образца	R_m [МПа]	Размеры колонны, [мм]	h_0 [мм]	Расположение арматуры усиления	F_{test} [кН]	F_{abaqus} [кН]	F_{abaqus}/F_{test}	Разрушение
1	S1D0	21.3	200x200	110	-	234	279	1.19	P
2	S2D0	43.3	260x260	108	-	315	337	1.07	P
3	S1H0	27.8	200x200	100	-	300	285	0.95	P
4	S3DW1	28.1	200x200	115	ортогонально	514	500	0.97	PO
5	S4DW1P	31.2	200x200	116	ортогонально	590	511	0.87	PO
6	S5DW2	43.3	260x260	108	ортогонально	500	478	1.04	PO
7	ID1	49.2	200x200	87	-	269	284	1.04	P
8	ID2	52.3	200x200	84	лучами	406	334	0.90	PO
9	ID3	59.6	200x200	90	лучами	331	314	0.99	PS
10	ID4	59.7	200x200	90	лучами	381	331	0.94	PS
11	ID5	59.8	200x200	94	лучами	366	316	0.93	PS
Среднее значение								0.99	
среднеквадратическое отклонение								0.09	
Ошибка среднего значения								0.02	

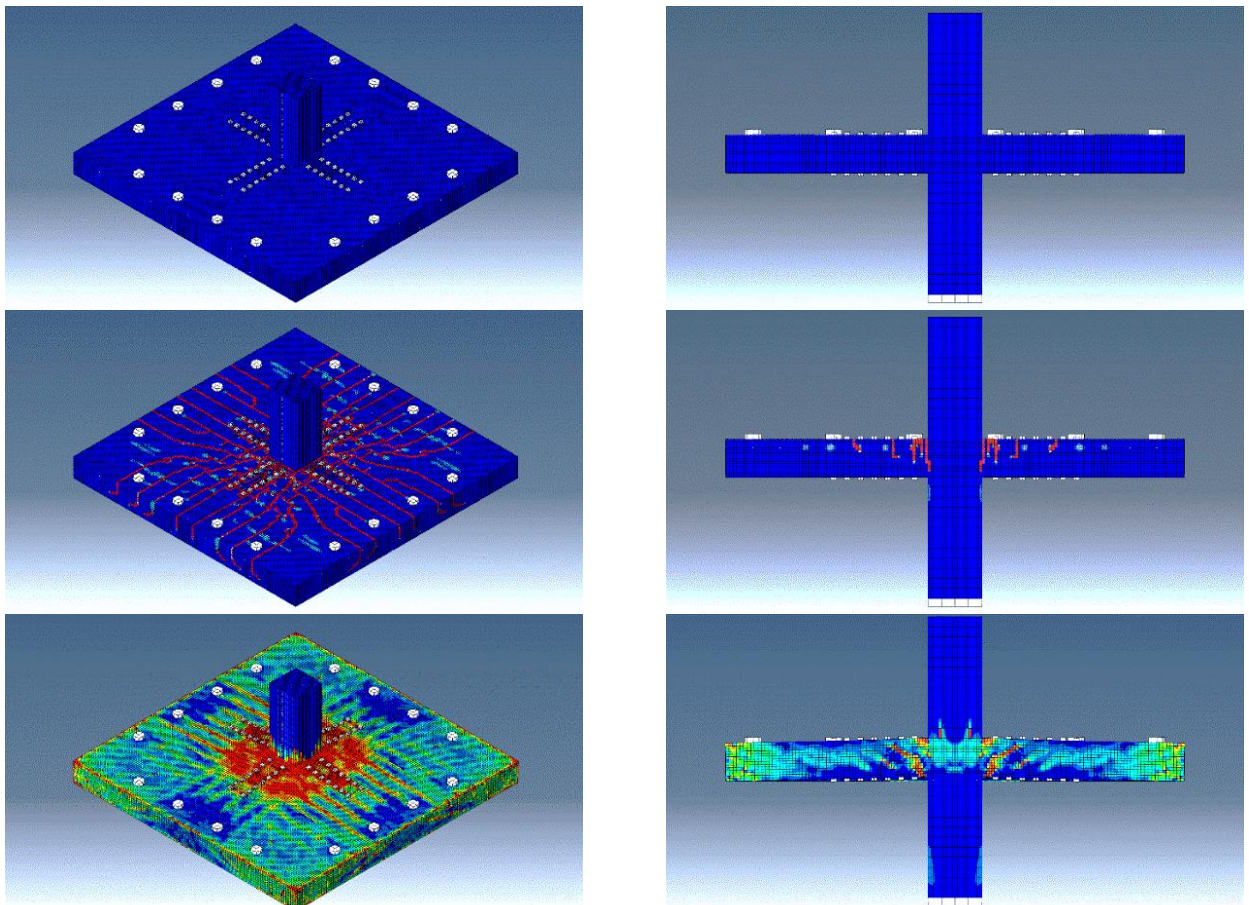


Рисунок 5. КЭ модель на различных этапах нагружения

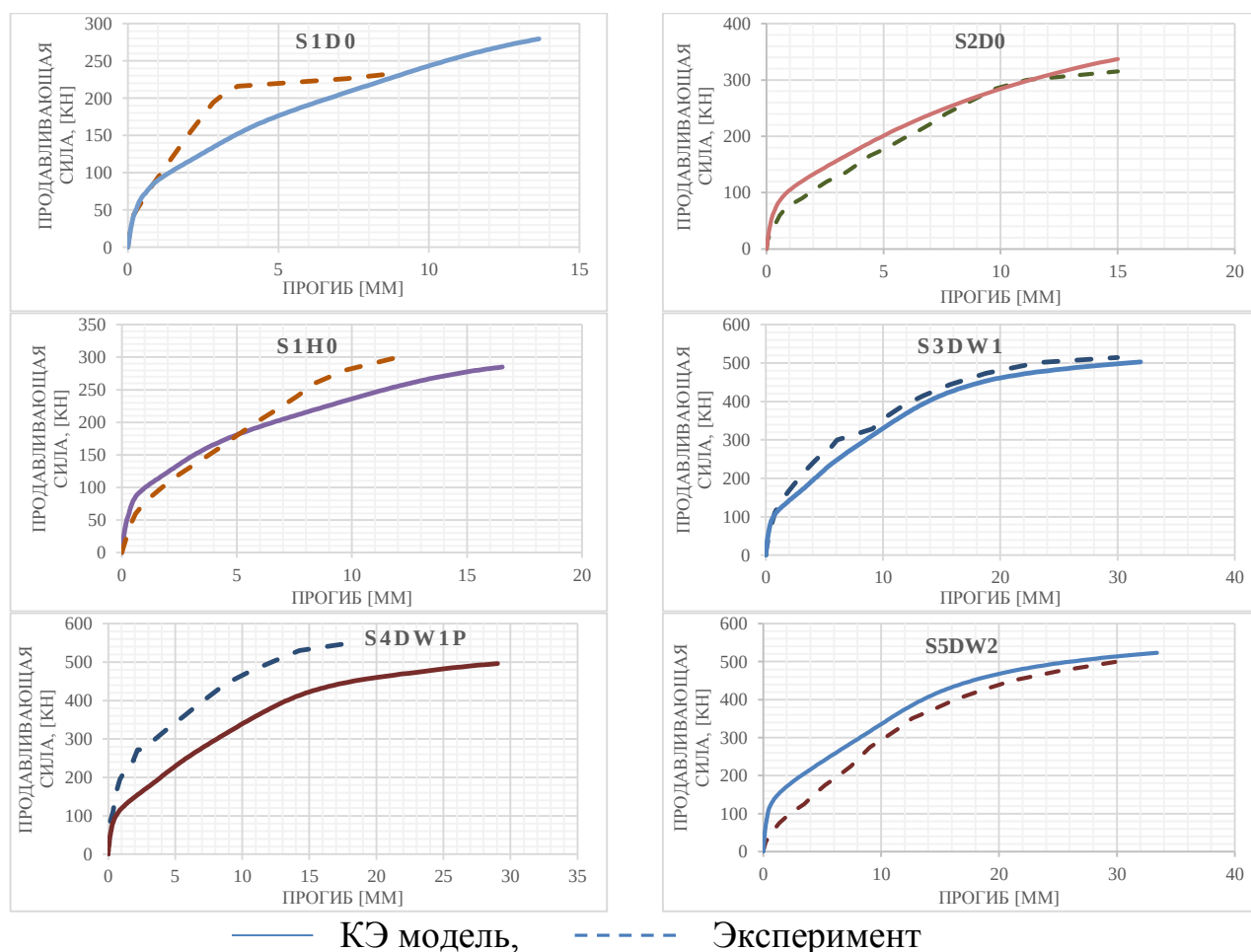


Рисунок 6. Диаграммы деформирования опытных образцов

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния различных параметров на работу плит на продавливание, усиленных поперечной арматурой в виде сквозных шпилек, на КЭ моделях, моделирующих промежуточные образцы. При исследовании в каждом из образцов изменялся только один из варьируемых параметров, приведенных в табл. 3.

Таблица 3. Варьируемые параметры

№ п/п	Варьируемые параметры			Образцы	
	Параметры	Обозначение	Диапазон	Количество	Серии
1	Процент поперечного армирования	μ_{sw}	$0.03\% \leq \mu_{sw} \leq 0.87\%$	9	М
2	Преднапряжение арматуры усиления	R_{press}	$0.25 \cdot R_{sw} \leq R_{press} \leq 0.75 \cdot R_{sw}$	3	PR
3	Шаг арматуры усиления	s	$0.3 \cdot h_0 \leq s \leq 2 \cdot h_0$	10	S
4	Прочность арматуры усиления	R_{sw}	$100 \leq R_{sw} \leq 745$	3	R
5	Дополнительная нагрузка от верхней колонны	P^{col}	$0 \leq P^{col} \leq 15 \text{ МПа } (0.4R_{bm})$	5	PC

Влияние процента поперечной арматуры усиления.

Для оценки влияния исследования процента поперечной арматуры усиления μ_{sw} на несущую способность плит при продавливании были проведены численные

исследования 9 КЭ моделей сопряжения промежуточных колонн с плитами перекрытий.

В данных моделях варьировался только процент поперечного армирования, а все остальные параметры оставались постоянными. Изменение процента поперечной арматуры усиления достигалось изменением диаметра поперечной арматуры и варьировалось в пределах от 0 до 0,87%. Результаты расчёта КЭ моделей с различным процентом поперечной арматуры усиления и эталонного образца без арматуры усиления приведены в табл. 4.

Вклад сопротивления бетона F_b в общую несущую способность на продавливание F_{ult} принимался равным прочности образца без поперечной арматуры усиления. Вклад сопротивления поперечной арматуры усиления F_{sw} в несущую способность принимался равным разнице продавливающей силы модели с поперечной арматурой усиления и образца без усиления. Зависимость вклада сопротивления поперечной арматуры усиления в несущую способность плит на продавливание от процента поперечного армирования показана на рис. 7.

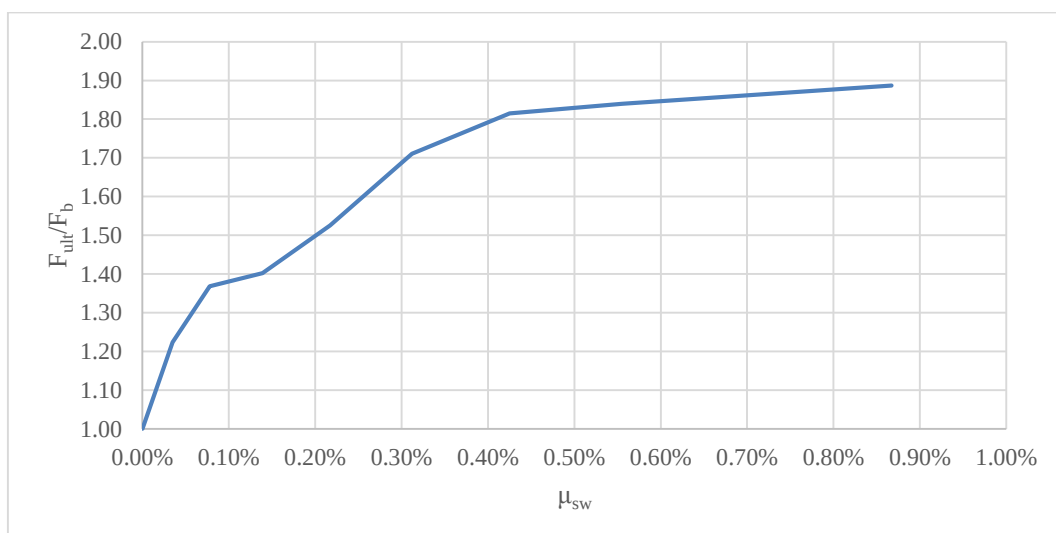


Рисунок 7. Зависимость вклада сопротивления поперечной арматуры усиления в несущую способность плит на продавливание от процента поперечного армирования

Таблица 4. Результаты расчёта

Образцы	μ_{sw} [%]	F_b [кН]	F_{sw} [кН]	F_{ult} [кН]	F_{sw}/F_b
М0	0	318	—	318	0
М2	0.04	318	71	389	0.22
М3	0.08	318	117	435	0.37
М4	0.14	318	128	446	0.40
М5	0.22	318	167	485	0.53
М6	0.31	318	226	544	0.71
М7	0.43	318	259	577	0.81
М8	0.56	318	267	585	0.84
М10	0.87	318	282	600	0.89

Из анализа влияния процента поперечной арматуры усиления на работу плиты при продавливании, моделирующих узлы сопряжения промежуточных колонн с плитой перекрытия, сделаны следующие выводы:

- С увеличением μ_{sw} повышается вклад сопротивления поперечной арматуры усиления в несущую способность образцов на продавливание. Зависимость носит нелинейный характер и с увеличением μ_{sw} вклад поперечной арматуры в общую несущую способность образцов снижается.
- При $0 \leq \mu_{sw} \leq 0,43\%$ разрушение моделей происходит в зоне поперечного армирования с достижением в поперечных стержнях предела текучести.
- При коэффициенте поперечного армирования $\mu_{sw} > 0.43\%$ меняется механизм разрушения плиты при продавливании – разрушение происходит по грани колонны, т.е. в зоне от грани колонны до 1-го ряда поперечной арматуры усиления. Причём в поперечных стержнях усиления напряжения не доходят до предела текучести.
- По результатам численного моделирования не обнаружено минимальное количество поперечной арматуры, т.е. даже при относительно небольшом количестве арматура усиления является эффективной.

Влияние величины предварительного натяжения поперечной шпильки на несущую способность при продавливании. Для оценки влияния предварительного натяжения поперечной арматуры усиления на несущую способность плиты при продавливании выполнены исследования на трех КЭ моделях сопряжения промежуточных колонн с плитами перекрытий численных эксперимента. Варьировалась величина предварительного напряжения: 25%, 50% и 75% от предела текучести поперечной арматуры. Остальные параметры оставались неизменными. Результаты исследования приведены на рис. 8.

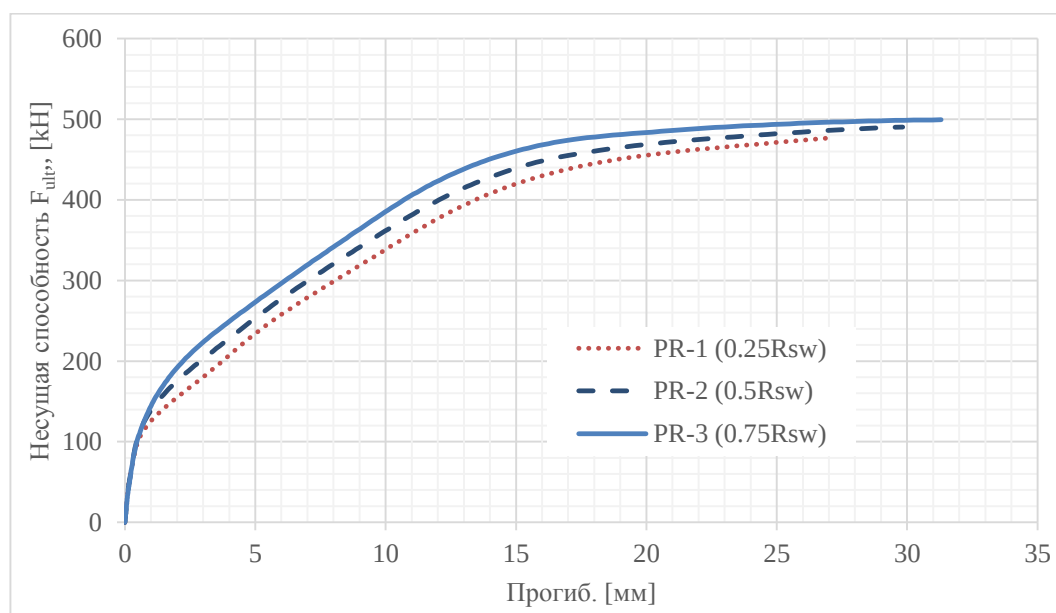


Рисунок 8. Диаграммы деформирования образцов с различными величинами предварительного напряжения поперечной арматуры усиления

По результатам эксперимента был сделан вывод, что увеличение предварительного напряжения не оказывает существенного влияния на несущую способность и жесткость плит, усиленных поперечной арматурой, при продавливании. Разница величин несущей способности образцов составила не более 3%).

Влияние прочности арматуры по прочности на несущую способность при продавливании. Для оценки влияния применения арматуры разных классов в качестве арматуры усиления образцов на продавливание были проведены численные исследования на 3 КЭ моделях сопряжения промежуточных колонн с плитой перекрытия. Прочность арматуры усиления R_{sw} принималась равной 200 МПа, 400 МПа и 745 МПа.

В результате исследований было получено, что во всех случаях арматура усиления может достичь предела текучести. Влияния увеличения прочности арматуры на несущую способность и жесткость плит при продавливании не отмечено. Оснований для конструктивного ограничения максимальной прочности арматуры усиления, как это сделано в общем случае при расчёте на поперечную силу в действующих нормах РФ, не выявлено.

Влияние шага поперечной арматуры на несущую способность при продавливании было исследовано на 7 численных образцах. Исследовался вклад сопротивления поперечной арматуры усиления в несущую способность на продавливание при расположении её с шагом в радиальном направлении: $s=0.3 \cdot h_0$, $s=0.5 \cdot h_0$, $s=0.75 \cdot h_0$, $s=h_0$, $s=1.5 \cdot h_0$, $s=1.75 \cdot h_0$.

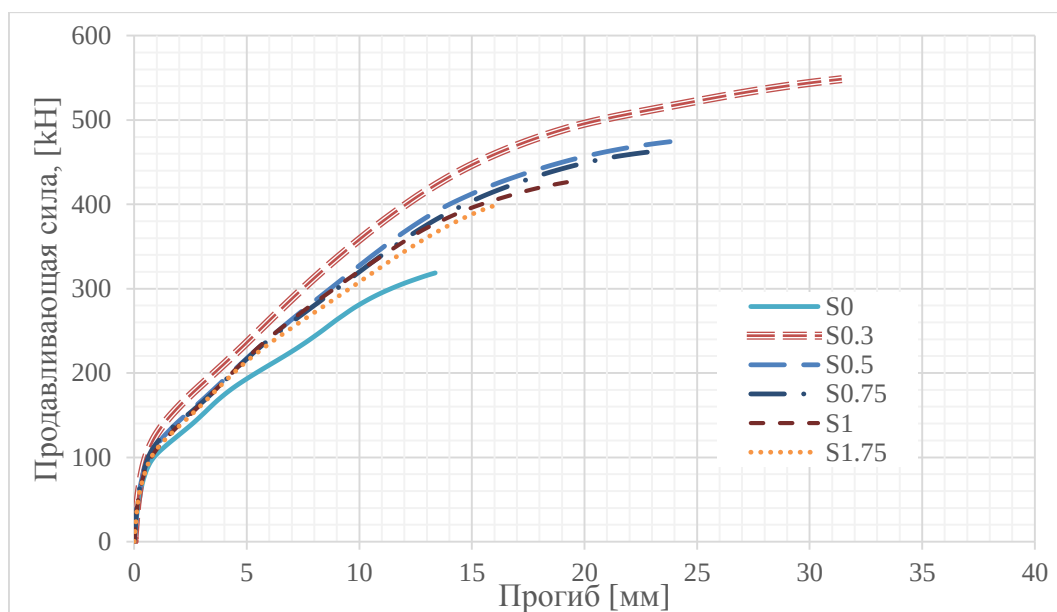


Рисунок 9. Влияние шага постановки поперечных стержней на несущую способность плит при продавливании

В результате было установлено, что постановка поперечной арматуры усиления повышает несущую способность на продавливание даже при больших значениях шага постановки (до $1.75 \cdot h_0$). Наибольшую несущую способность на продавливание показал образец S0.3 с наименьшим шагом. Увеличение несущей способности на продавливание образца S0.3 относительно контрольного

неусиленного образца S0 составило 66.7%. Наименьшую несущую способность на продавливание показал образец S1.75, для которого увеличение несущей способности относительно контрольного образца составило 20.1%. Диаграммы прогибов образцов с различным шагом поперечных стержней приведены на рис. 9.

Из диаграммы видно, что несущая способность образцов на продавливание с увеличением шага поперечных стержней снижается. В ходе анализа результатов установлено, что в образцах с шагом поперечной арматуры $s > 0.75h_0$ разрушение образцов происходит в приопорной зоне плиты между колонной и первым рядом поперечной арматуры усиления. При разрушении этих образцов установлено, что арматура усиления не достигает предела текучести. В остальных образцах разрушение происходит в зоне поперечного армирования с достижением в поперечной арматуре усиления напряжений, равных пределу текучести.

Влияние сжимающего усилия плиты со стороны верхней колонны на несущую способность при продавливании исследовалось на 5-и численных моделях сопряжения промежуточной колонны с плитой перекрытия, усиленных поперечной арматурой. Продавливание в данных моделях достигалось разностью нагрузок приложения к нижней и в верхней колоннах, что соответствует реальному нагружению узлов сопряжения колонн с плитами перекрытий в зданиях. В данных образцах варьировалось только значение сжимающего усилия в верхней колонне (моделирование междуэтажной плиты перекрытия в многоэтажном здании). Сжимающее усилие плиты со стороны верхней колонны варьировалось в пределах $0 \leq P^{col} \leq 15 \text{ МПа}$ ($0.4 \cdot R_{bm}$).

В результате исследований все образцы разрушились от продавливания в зоне поперечного армирования. Анализ результатов проведенных расчётов на численных моделях показал, что с увеличением сжимающего усилия в верхней колонне образцы имеют тенденцию к увеличению несущей способности на продавливании (рис. 10), но не значительной (до 3%).

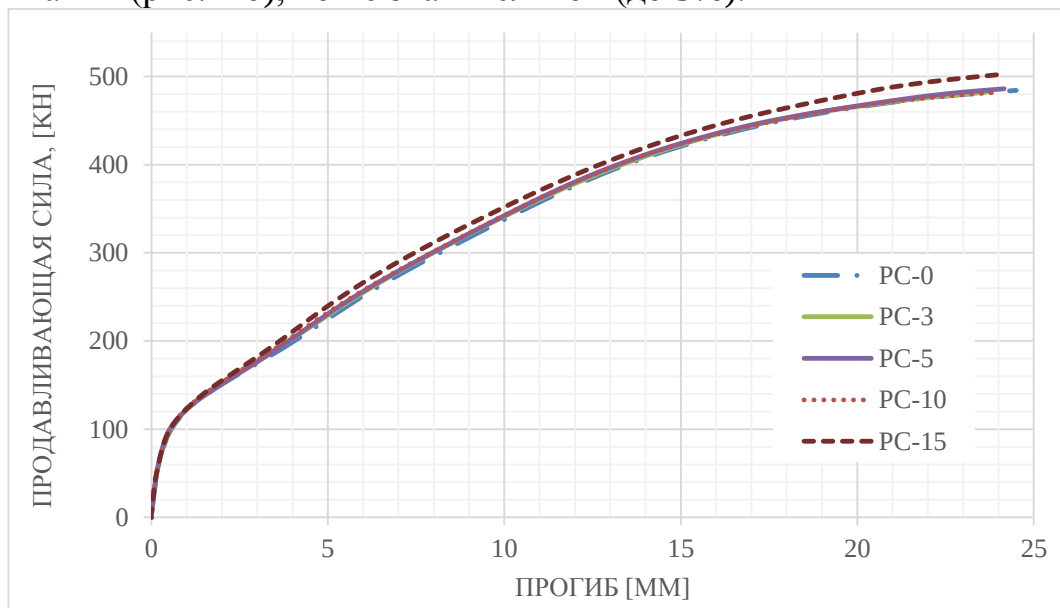


Рисунок 10. Диаграмма деформирования образцов в зависимости от сжатия плиты со стороны верхней колонны

В пятой главе предложена инженерная методика расчёта железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой, определены конструктивные требования к арматуре усиления и выполнен сравнительный анализ результатов испытаний и теоретических значений по предлагаемой методике.

За основу предложенной методики принята расчетная модель СП 63.13330. Испытания плит под нагрузкой показали, что при уровне нагрузки до 0,8 от расчетного значения прочности, поперечная арматура может учитываться с полным расчетным сопротивлением.

Расчетное сопротивление арматуры усиления при усилении вертикальными стержнями, за счет наличия хорошей анкеровки, может быть повышено до 640 МПа. С учетом понижающего коэффициента, учитывающего неравномерность напряжения в арматуре усиления условие использования арматуры будет иметь следующий вид: $F_{sw} = 0.8 \cdot R_{sw} \cdot A_{sw}$, где $R_{sw} = 0.8 \cdot R_s$ (но не более 640 МПа).

Шаг поперечных стержней усиления, можно увеличить относительно требований СП 63.13330 и рекомендуется принимать не более $0,5 \cdot h_0$. Вклад наклонной арматуры усиления, следует вычислять по формуле: $F_{sw} = \sum_{i=1}^n F_{sw,i} \cdot \sin(\beta_i)$, учитывая 3 возможных механизма разрушения поперечной арматуры (см. рис. 11):

- разрушение по сцеплению верхнего конца стержня ($F_{swi}^{bond} = \tau_b \cdot \pi \cdot d_b \cdot l_{b,si}$);
- выкалывание бетона над нижним концом стержня ($F_{swi}^{pul} = \delta \cdot A_b \cdot R_{bt}$);
- достижение предела текучести арматуры ($F_{swi}^R = 0.8 \cdot A_{sw} \cdot R_{sw}$).

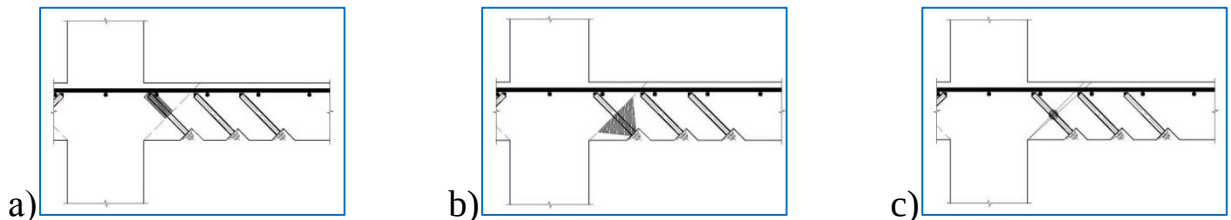


Рисунок 11. Механизмы разрушения поперечной арматуры: а) по клеевому составу, б) выкалывание бетона, с) достижение предела текучести в стержне.

Предельное усилие для каждого ряда стержней, учитывая механизм разрушения, следует определять по следующей формуле: $F_{sw,i} = \min(F_{sw,i}^R, F_{sw,i}^{bond}, F_{sw,i}^{pul})$.

Шаг постановки наклонных стержней усиления рекомендуется принимать не более $0,75h_0$.

В главе приведен сравнительный анализ результатов испытаний и теоретических значений по предлагаемой методике. Проведенное сравнение показало, что предлагаемая методика, имеет удовлетворительную точность для образцов, моделирующих промежуточные колонны, (среднее значение отношений опытных и теоретических значений (k) составляет 1,17, при коэффициенте вариации 3,1%).

Для образцов, моделирующих крайние колонны $k = 0.95\text{--}1.91$. Таким образом, предлагаемая методика имеет значительный запас.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертационной работы позволяют подвести следующие **итоги**:

1. Проведенный в диссертации обзор методов усиления железобетонных плит на продавливание показал, что наиболее эффективным в конструктивном отношении и рациональным, с точки зрения затрат времени и материальных ресурсов, является метод усиления путём постановки поперечной арматуры.
2. Выполненные в диссертации экспериментальные исследования прочности усиленных плит показали, что методы усиления поперечной арматурой, как сквозными стержнями, так и клееными под углом к плите, высокоэффективны. При этом, кроме повышения прочности значительно повышается пластичность работы плиты при продавливании.
3. Экспериментальными исследованиями установлено, что конструктивные требования по расположению поперечной арматуры, а также ограничения по прочности арматурной стали для усиленных плит являются консервативными и могут быть скорректированы.
4. Проведенные сопоставления результатов численного моделирования с натурными испытаниями показали, что конечно–элементная модель с использованием модели поведения бетона с псевдо пластическими деформациями в сочетании с критерием прочности бетона для многоосного напряженного состояния, имеет хорошее совпадение и может быть использована для проведения численных испытаний.
5. Исследования на продавливание плит, усиленных сквозными поперечными стержнями, проведенные на конечно–элементной модели, показали:
 - шаг постановки стержней усиления допускается принимать равным $0,75h_0$;
 - влияние предварительного напряжения стержней усиления на прочность незначительное и его не стоит учитывать в расчёте;
 - в качестве арматуры усиления возможно применение высокопрочных сталей с пределом текучести до 640 МПа;
 - влияния сжатия (отрицательного, либо положительного) плиты со стороны верхней колонны на прочность усиленных плит на продавливание не выявлено, поэтому его не следует учитывать.
6. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования позволили усовершенствовать инженерную методику расчёта прочности плит на продавливание, усиленных поперечной арматурой, устанавливаемой в сквозные отверстия плиты, либо клеенной под углом к поверхности плиты, а также определить конструктивные требования к расположению стержней,

моменту затяжки гаек, размерам анкерных шайб. Определены технологические требования к выполнению данного типа усиления.

По результатам выполненного исследования сформулированы следующие **рекомендации** по использованию результатов диссертационной работы:

1. Предложенная методика расчета прочности усиленных плит перекрытий на продавливание охватывает конструкции из тяжелого бетона класса по прочности на сжатие от В25 до В40 - для усиления клеенной арматурой, а также от В15 до В45 - для усиления сквозными стержнями.
2. В диссертации исследования ограничены поперечным армированием с пределом текучести стали: для сквозных шпилек – до 640МПа; для клеенных - до 400МПа.
3. Метод усиления наклонным клееным поперечным армированием рекомендуется для плит с ограниченным доступом к растянутой поверхности плиты (плит покрытий, фундаментов), в остальных случаях рекомендуется отдавать предпочтение методу усиления сквозной поперечной арматурой.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Уточнение разработанной КЭ модели с целью расширения области применения в части реализации возможности учета при расчете прочности плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой, на продавливание действия неуравновешенного момента.
2. Исследования в области методов усиления плоских железобетонных плит на продавливание.
3. Совершенствование методики расчета плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Сокуров, А.З.** Продавливание крайних узлов сопряжения плита – колонна, усиленных вклеенной поперечной арматурой / А.Н. Болгов, А.З. Сокуров, Д.В. Алексеенко // Бетон и железобетон. – 2013. – N 3. – С. 11-13.
2. **Сокуров, А.З.** Продавливание промежуточных узлов сопряжения плита – колонна, усиленных вклеенной поперечной арматурой. / А.Н. Болгов, А.З. Сокуров, Д.В. Алексеенко // Бетон и железобетон. – 2014. – N 3. – С. 10-13.

Публикации в отраслевых изданиях и материалы конференция:

3. **Сокуров, А.З.** Численное моделирование плоских плит перекрытий при продавливании, усиленных поперечной арматурой. [Текст] / А.Н. Болгов, А.З. Сокуров // Бетон и железобетон – взгляд в будущее. III Всероссийская (II международная) конференция по бетону и железобетону. Том IV. – М.: 2014. – С. 139–149.
4. **Сокуров, А.З.** Усиление промежуточных и крайних узлов сопряжения плита – колонна на продавливание поперечной арматурой [Текст] / А.З. Сокуров, С.И. Иванов // Материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции НАСКР, Чебоксары.: 2012. – С.193-201.
5. **Сокуров, А.З.** Усиление плит на продавливание поперечной арматурой. / А.З. Сокуров, А.Н. Болгов., Д.В. Кузеванов // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций. // Материалы XV научно-методической конференции ВИТИ. – СПб.: 2011. – С. 163–167.
6. **Сокуров, А.З.** Изучение работы плоских плит на продавливание по результатам численного эксперимента [Текст] / А.З. Сокуров, А.Н. Болгов // Материалы II Международной (VIII Всероссийской) конференции НАСКР, Чебоксары.: 2014. – С. 212–227.