



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА НИКОЛАЯ II» (МГУПС (МИИТ))

Кафедра «Строительные конструкции, здания и
сооружения»

Сопротивление продавливанию плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой

Магистерская диссертация

Направление подготовки 08.04.01 «Строительство»

Направленность (магистерская программа) «Промышленное и гражданское строительство»

Обучающийся

Гусейнов Руслан Меликович

Научный руководитель
Академик РААСН,

Федоров Виктор Сергеевич

докт. техн. наук, профессор

Москва 2017

Актуальность исследования и степень проработанности темы

Поперечная арматура усиления, установленная в сквозные отверстия в опорной зоне плиты и имеющая надёжную анкеровку по концам, значительно повышает сопротивление плит продавливанию и пластичность их работы.

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., Залесова А.С., Карпенко Н.И., Травуша В.И. и др., а также зарубежных ученых: Dilger W.H., Amin Ghali, Aurelio Muttoni и др. Однако исследования плит, усиленных поперечным армированием, весьма немногочисленны.

остаются вопросы, требующие дополнительных исследований:

влияние степени насыщения поперечной арматурой

влияние величины предварительного напряжения арматуры усиления

установление допустимого шага поперечной арматуры усиления

эффективность применения поперечной арматуры из высокопрочной стали



Примеры обрушений плит перекрытий вследствие разрушения от продавливания



Подземный гараж. Пенза, 2011 г.



Плавательный бассейн. Краснодар, 2013 г.



Строящееся монолитное здание. Владивосток, 2013 г.

Подземный паркинг. Москва, 2009 г.



Примеры обрушений плит перекрытий вследствие разрушения от продавливания



Piper's Row Car Park, Wolverhampton, UK, 1997 (built in 1965).

Цель и задачи исследования

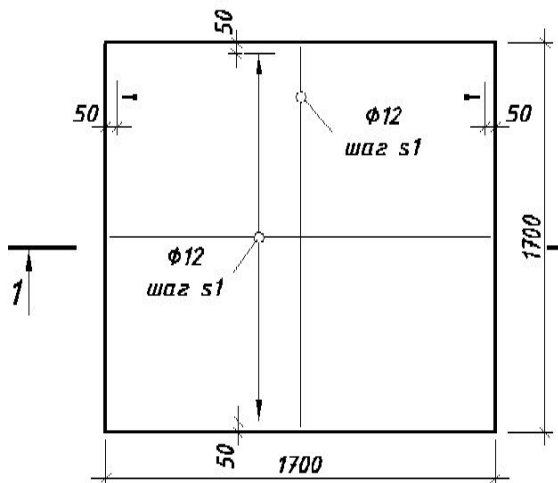
Цель работы - исследование сопротивления продавливанию железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой, и разработка рекомендаций по проектированию данного метода усиления.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

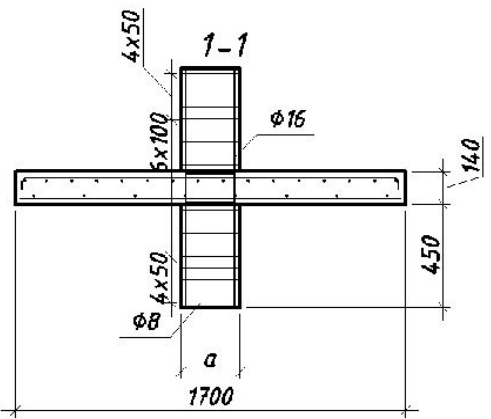
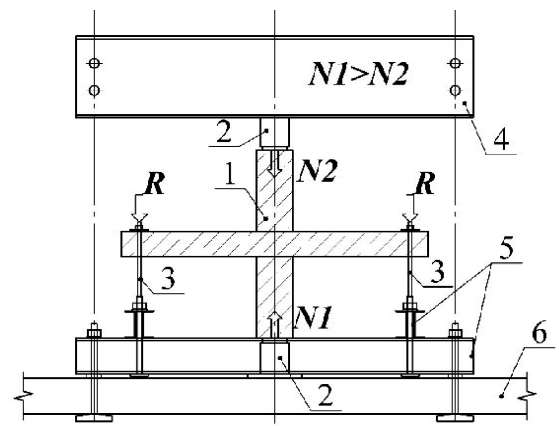
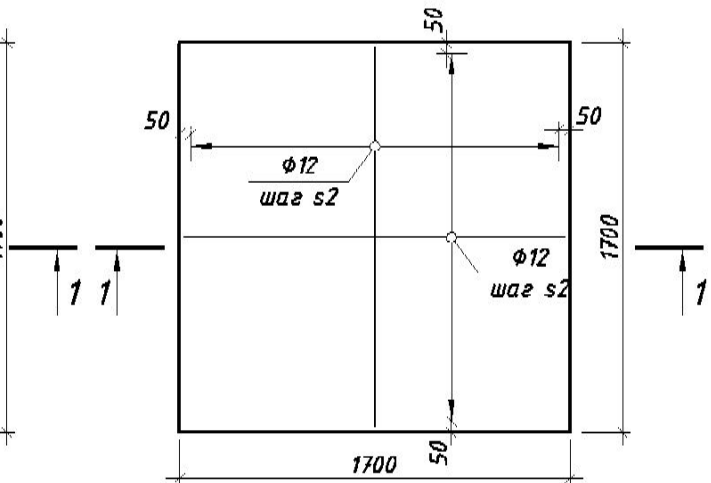
- провести обзор теоретических и экспериментальных исследований работы плит при продавливании, армированных или усиленных поперечной арматурой;
- разработать конечно-элементную модель, позволяющую с достаточной степенью точности моделировать работу плит при продавливании, усиленных поперечной арматурой;
- выполнить численный эксперимент с использованием конечно-элементной модели для изучения влияния наиболее значимых параметров усиления на работу плит в условиях продавливания: коэффициента поперечного армирования, предварительного напряжения арматуры усиления, шага постановки, прочности арматуры усиления;
- разработать практические рекомендации по проектированию усиления плит сквозными шпильками.

Конструкция опытных образцов

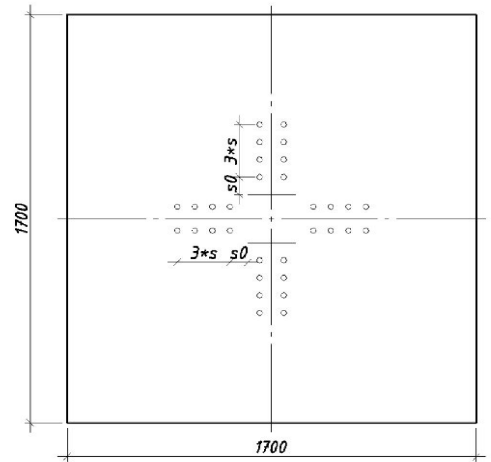
ВЕРХНЕЕ АРМИРОВАНИЕ



НИЖНЕЕ АРМИРОВАНИЕ



Разрез

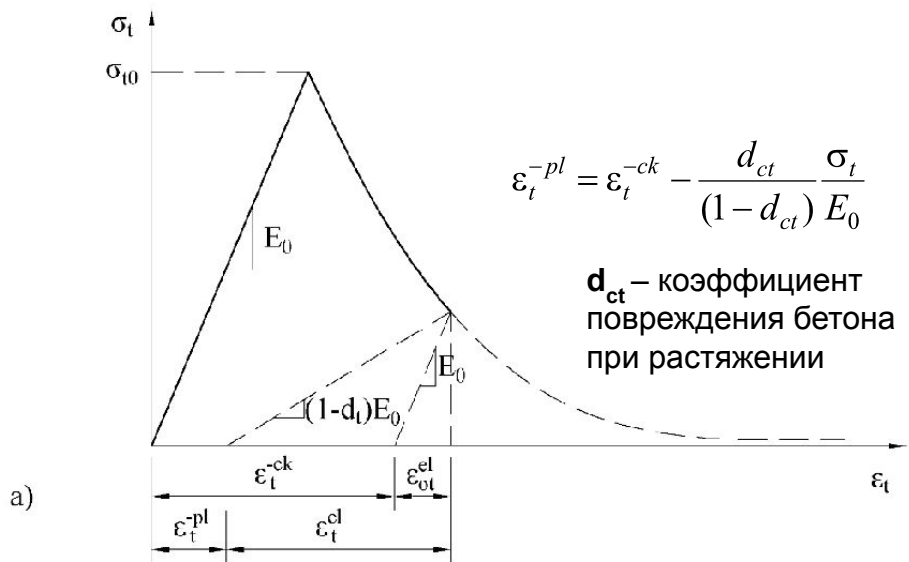


Расположение поперечной арматуры усиления

Схема испытательной установки

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

Модель поведения бетона



$$\epsilon_t^{-pl} = \epsilon_t^{-ck} - \frac{d_{ct}}{(1-d_{ct})} \frac{\sigma_t}{E_0}$$

d_{ct} – коэффициент повреждения бетона при растяжении

Диаграмма $\sigma_b - \epsilon_{b,in}$ при сжатии

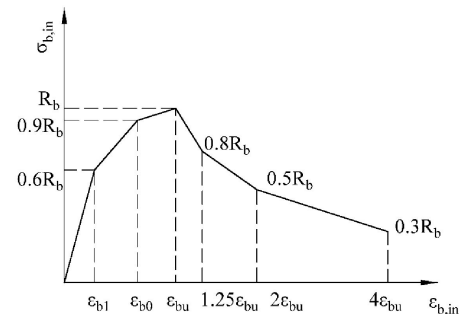
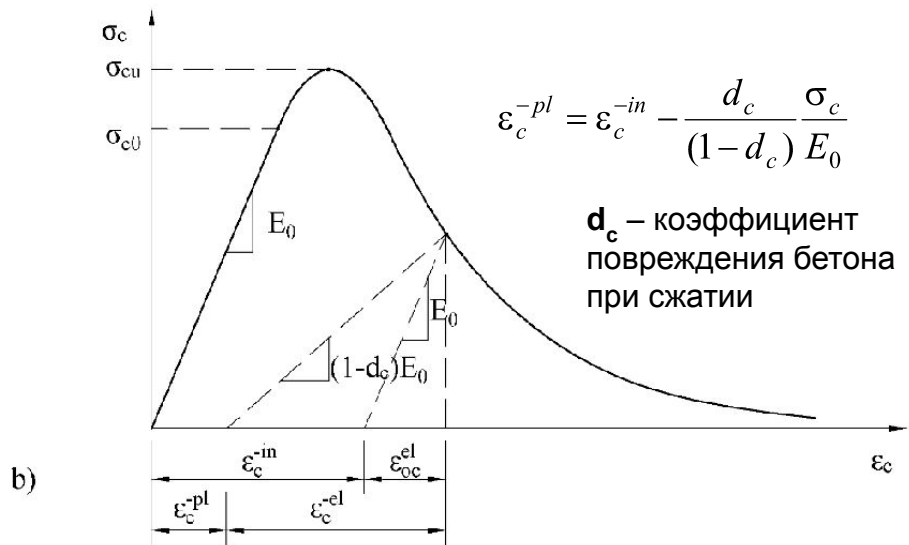
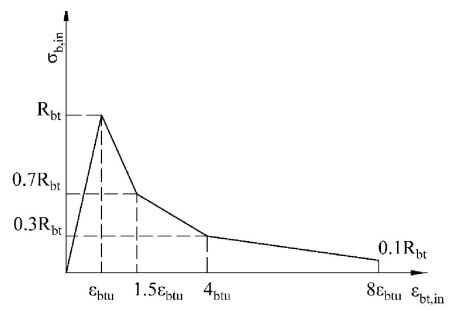


Диаграмма $\sigma_{bt} - \epsilon_{bt,in}$ при растяжении



$$\epsilon_c^{-pl} = \epsilon_c^{-in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0}$$

d_c – коэффициент повреждения бетона при сжатии

Диаграмма $\epsilon_{b,in} - d_c$ при сжатии

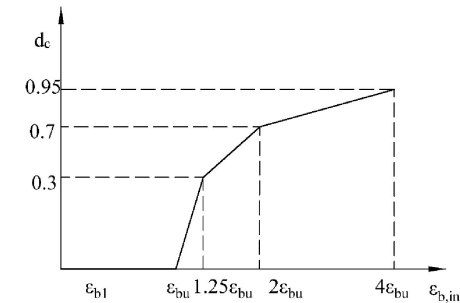
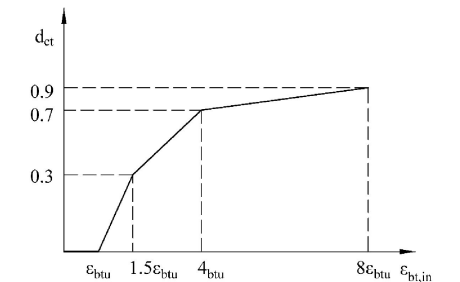
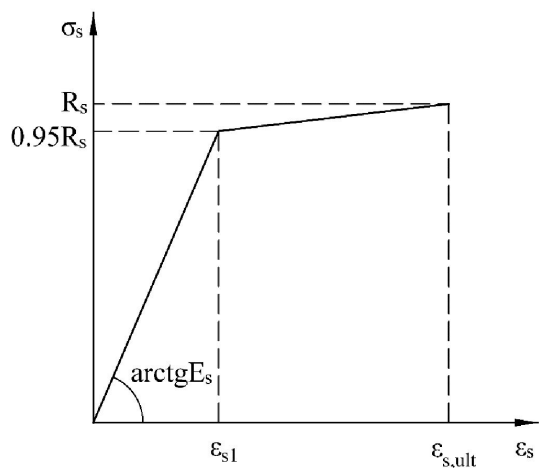


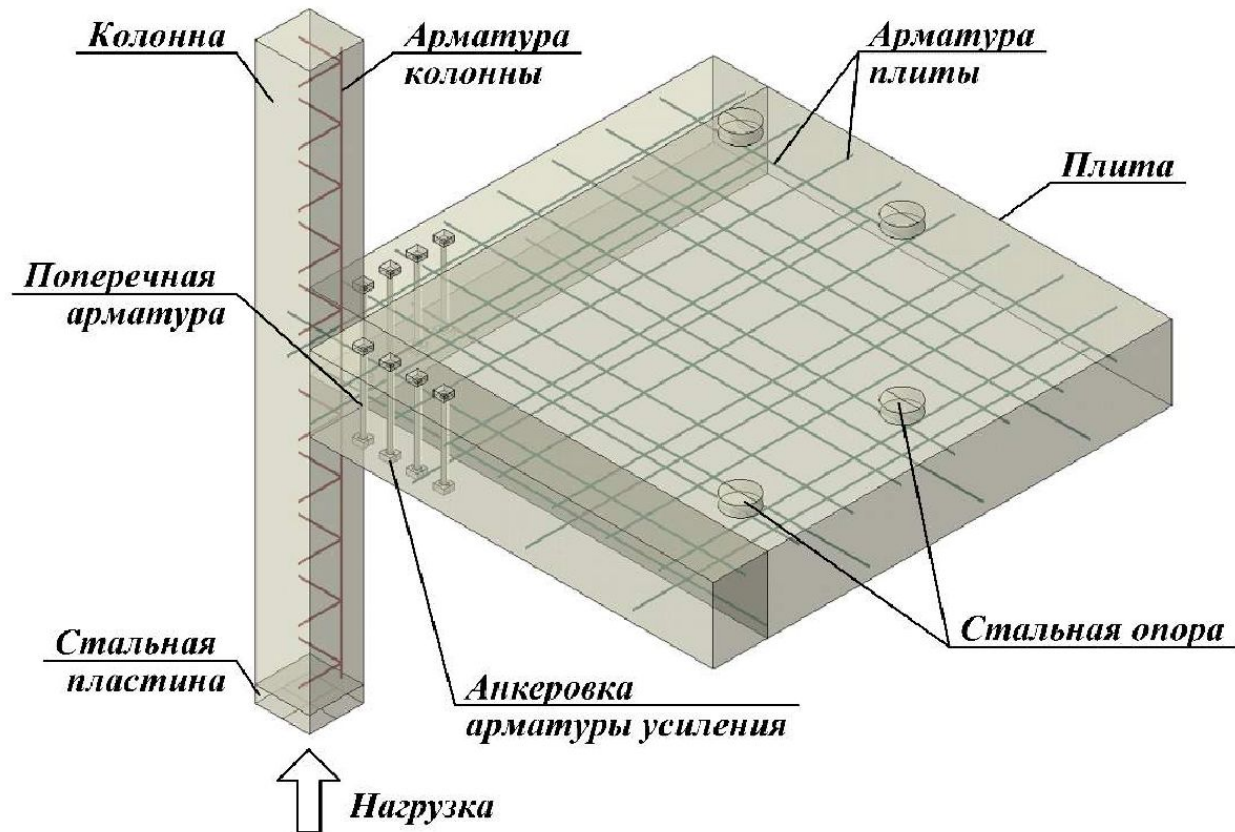
Диаграмма $\epsilon_{bt,in} - d_{ct}$ при растяжении



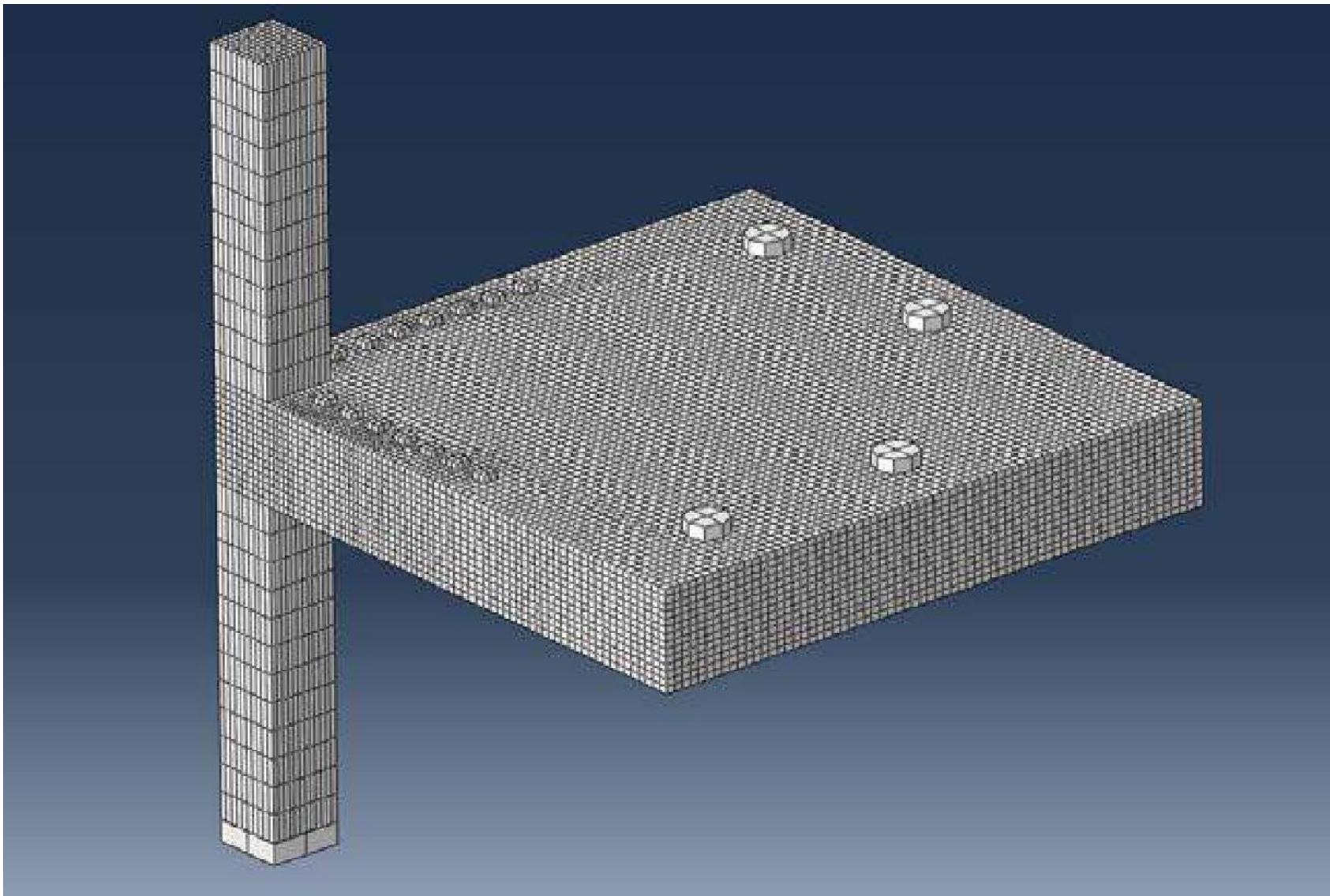
Общий вид конечно-элементной модели



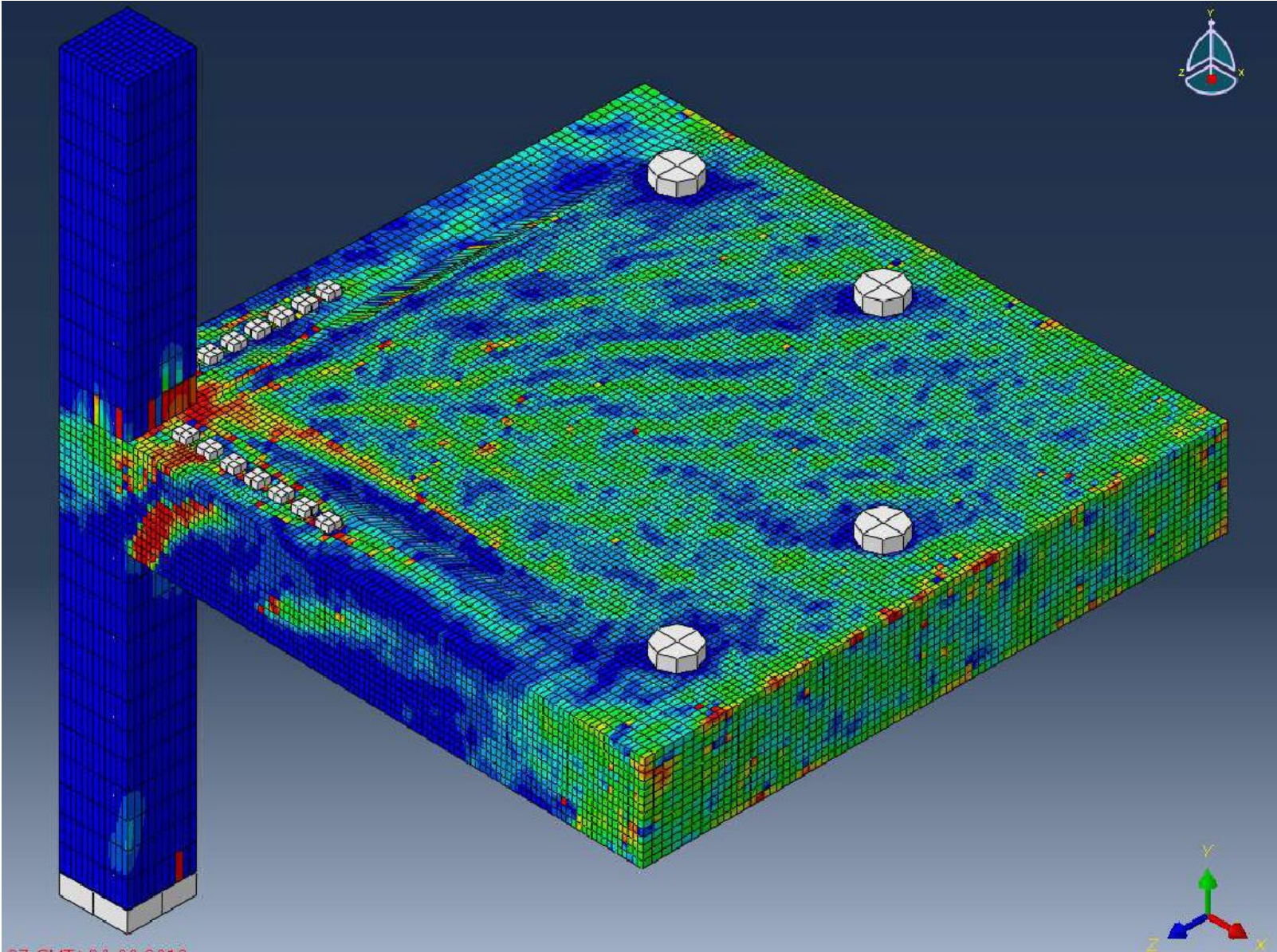
Модель поведения
арматуры



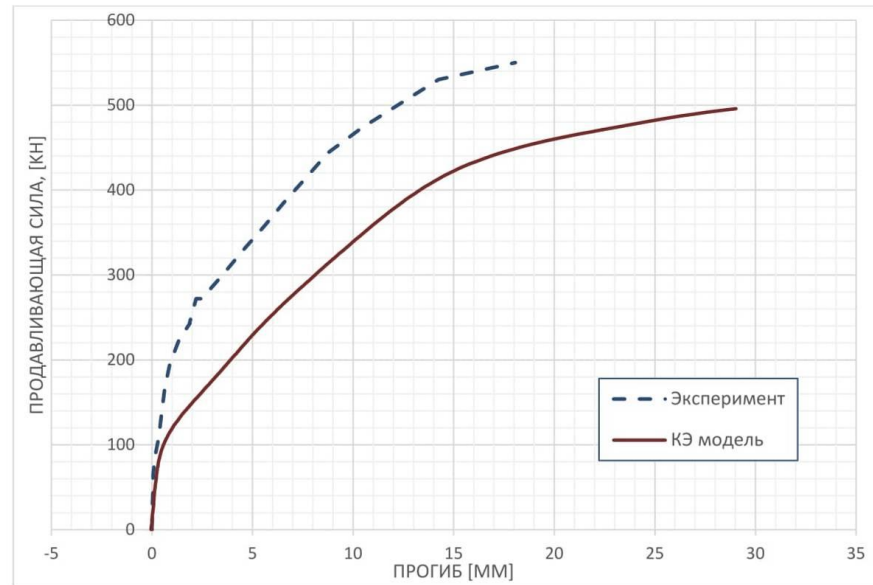
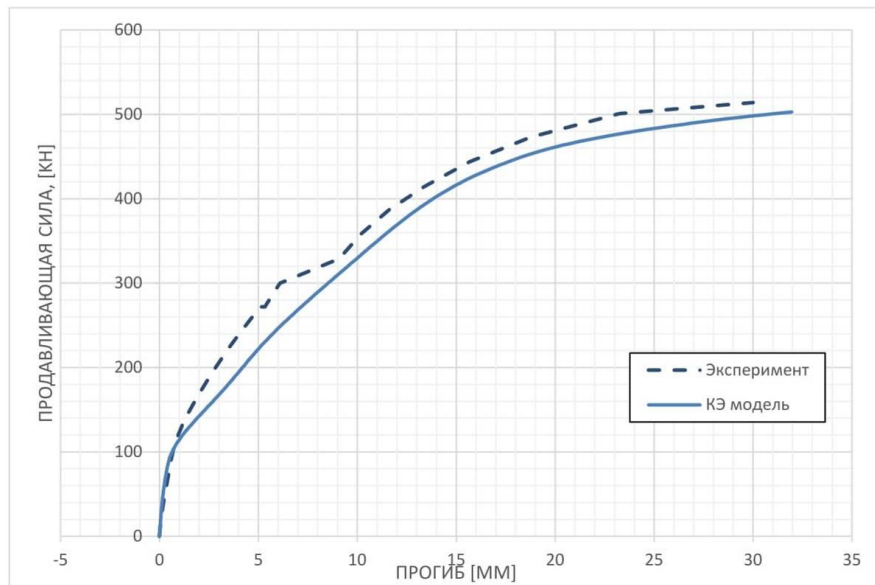
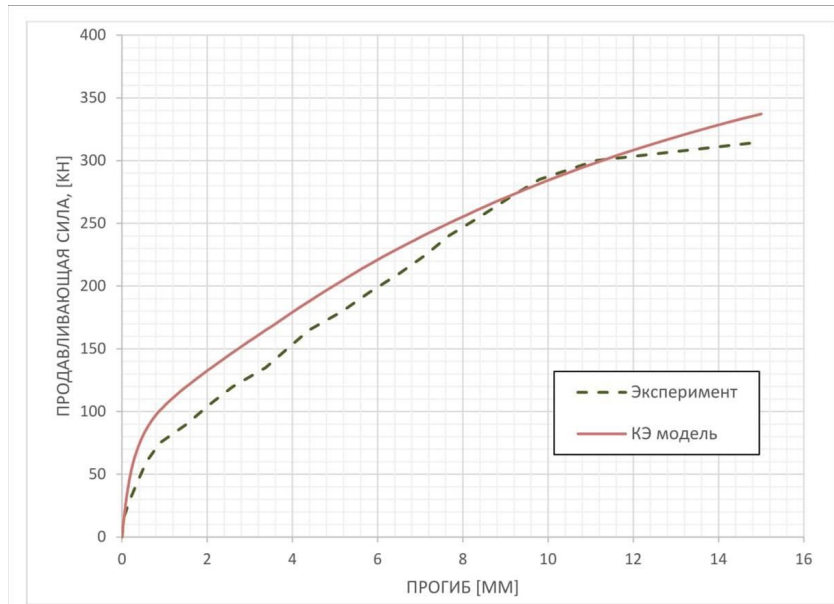
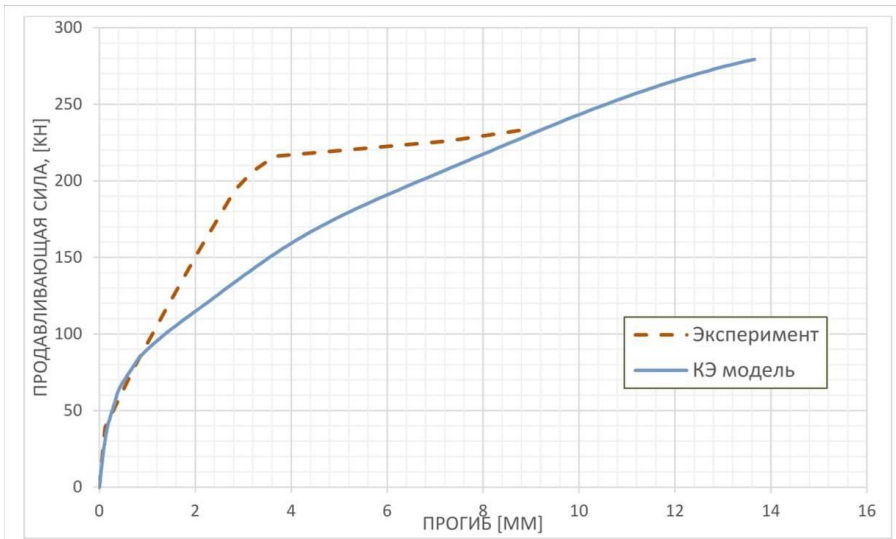
Общий вид конечно-элементной модели



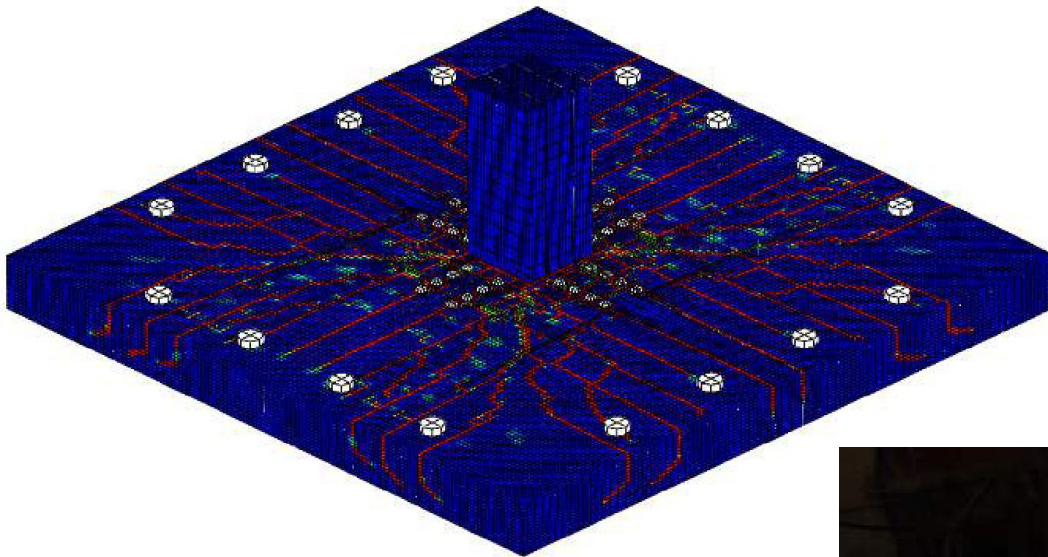
Поле напряжений перед разрушением



Сравнение прогибов с данными эксперимента



Характерный вид образцов в момент трещинообразования

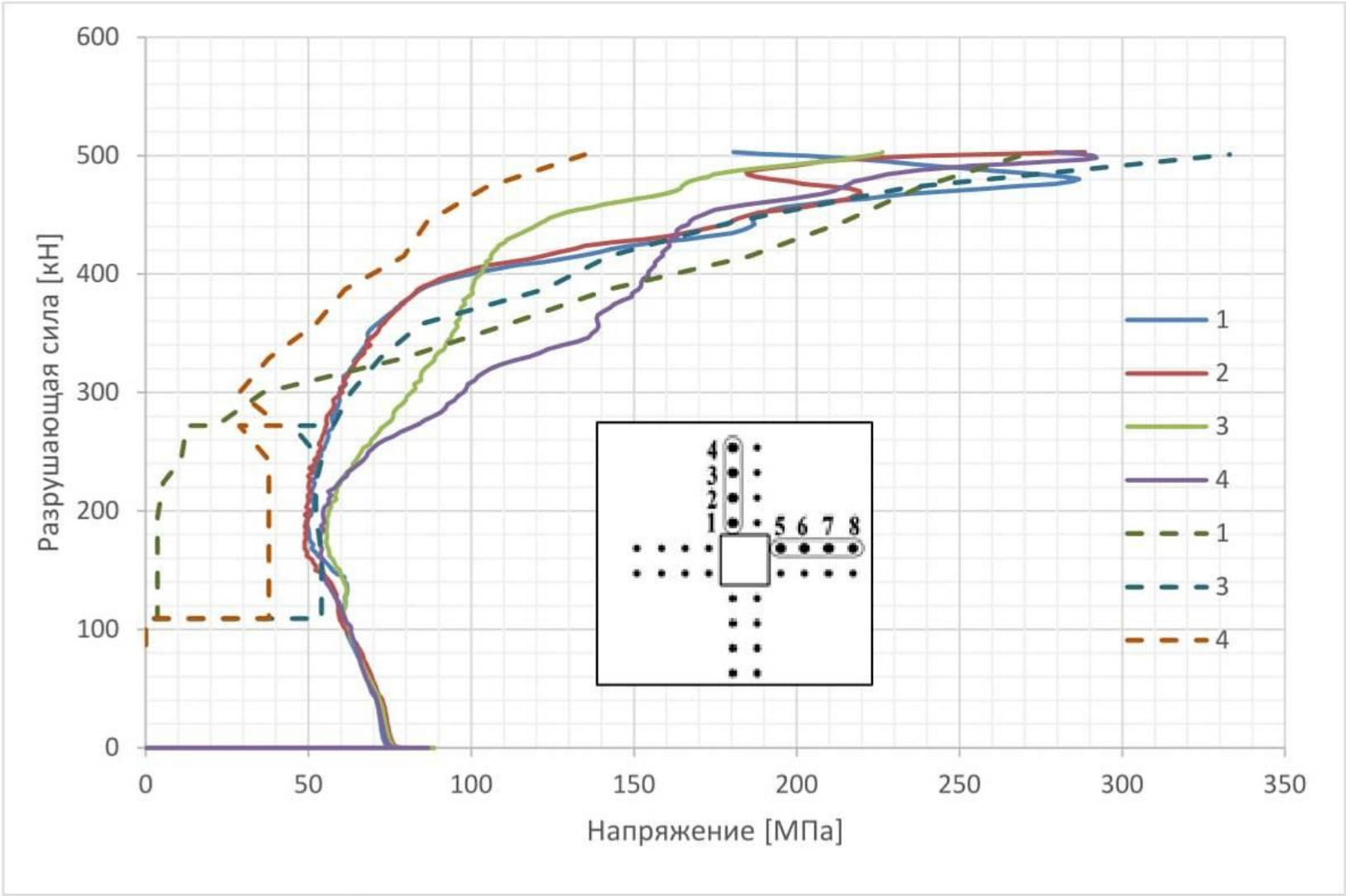


Схемы образования и развития трещин в КЭ моделях и опытных образцах сравнительно близки

Конечно-элементная модель узла сопряжения плит перекрытий с промежуточной колонной, разработанная в программном комплексе Abaqus, основанная на использовании модели с накоплением повреждений для бетона, позволяет определить продавливающую силу, напряжённо-деформированное состояние на всех этапах нагружения плит в условиях продавливания, в том числе и усиленных поперечной арматурой.



Напряжения в поперечной арматуре



— КЭ модель, - - - Опытный образец

Сравнение результатов расчёта и экспериментов

№ п/п	Марка образца	R_{bm} , МПа	Размеры колонны, мм	h_0 , мм	Расположение поперечной арматуры	$F_{\text{эксп}}$, кН	$F_{\text{расч}}$, кН	$\frac{F_{\text{расч}}}{F_{\text{эксп}}}$	Схема разрушения
1	S1D0	21,3	200x200	110	-	234	279	1,19	Продавливание
2	S2D0	43,3	260x260	108	-	315	337	1,07	Продавливание
3	S3DW1	28,1	200x200	115	ортогонально	514	500	0,97	За контуром
4	S4DW1P	31,2	200x200	116	ортогонально	590	511	0,87	За контуром
5	S5DW2	43,3	260x260	108	ортогонально	500	522	1,04	За контуром
6	IDI	49,2	200x200	87	-	269	280	1,04	Продавливание
7	ID2	52,3	200x200	84	лучами	406	367	0,90	За контуром
8	ID3	59,6	200x200	90	лучами	331	328	0,99	В зоне поперечного армирования
9	ID4	59,7	200x200	90	лучами	381	359	0,94	В зоне поперечного армирования
10	ID5	59,8	200x200	94	лучами	366	341	0,93	В зоне поперечного армирования

Среднее значение отношений несущей способности для экспериментальных образцов и для КЭ модели составляет $0,99 \pm 0,02$

Среднее значение	0,99
Стандартное отклонение	0,09
Ошибка среднего значения	0,02
Коэффициент вариации	9,1%

Сравнение результатов нормативного расчёта и экспериментов

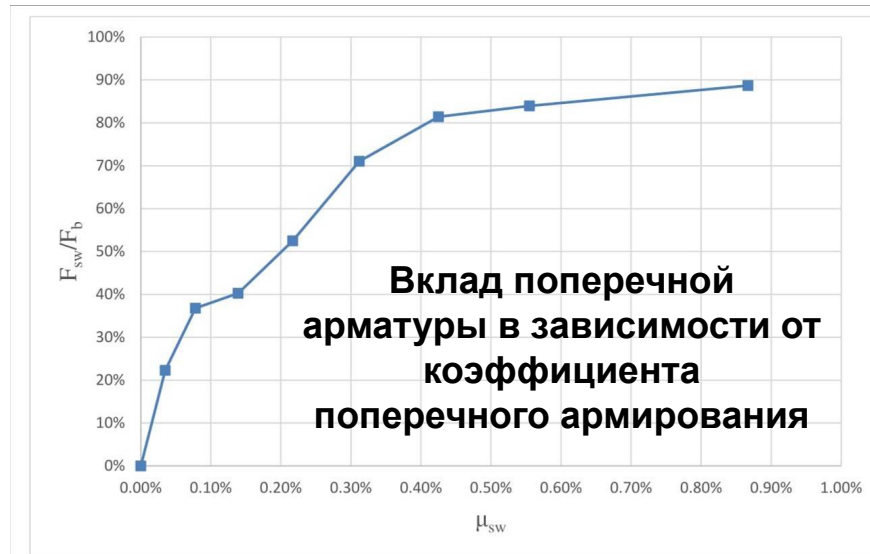
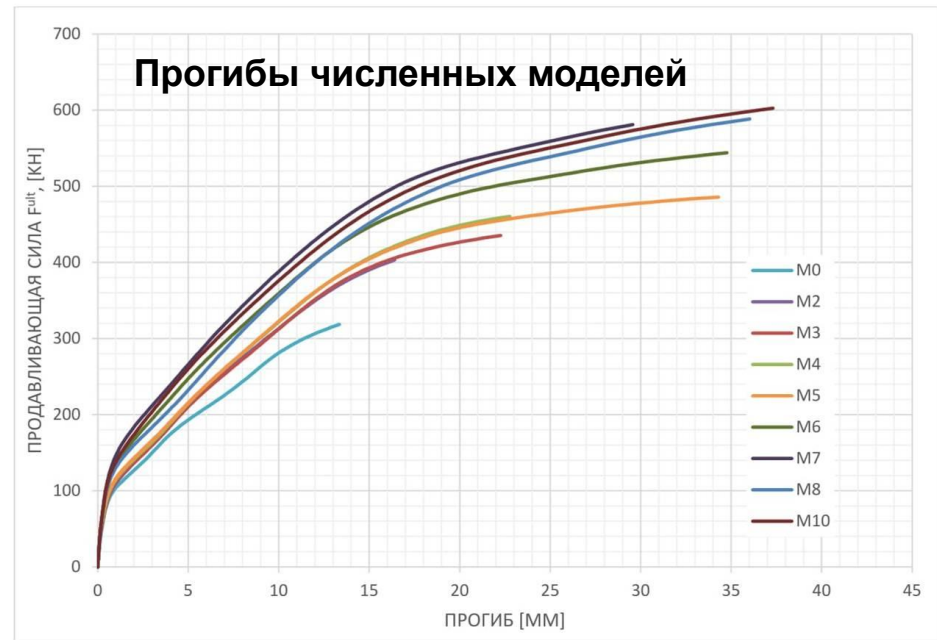
Марка образца	Класс бетона	R_{bt} , МПа	$F_{ult,b}$, кН	$F_{ult,sw}$, кН	$F_{ult,b} + F_{ult,sw}$, кН	$F_{ult,out}$, кН	F_{ult} , кН	$F^{эксп}$, кН	$F_{ult}/F^{эксп}$	Теоретическое усиление	Фактическое усиление
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S1D0	B17,0	1,53	209	-	209	-	209	234	0,89	-	-
S2D0	B24,0	1,93	278	-	278	-	278	315	0,88	-	-
S3DW1	B22,5	1,85	268	211	479	458	458	514	0,89	2,19	2,27
S4DW1P	B25,0	1,98	291	211	502	495	495	590	0,84	2,37	2,52
S5DW2	B24,0	1,93	278	249	527	427	427	500	0,85	1,53	1,59

Методика расчёта плоских железобетонных плит, усиленных поперечными шпильками при действии сосредоточенной силы на продавливание по СП 63.13330.2012 даёт небольшое (в среднем 13%) отклонение в сторону запаса

Среднее значение	0,87
Стандартное отклонение	0,022
Ошибка среднего значения	0,01
Коэффициент вариации	2,5%

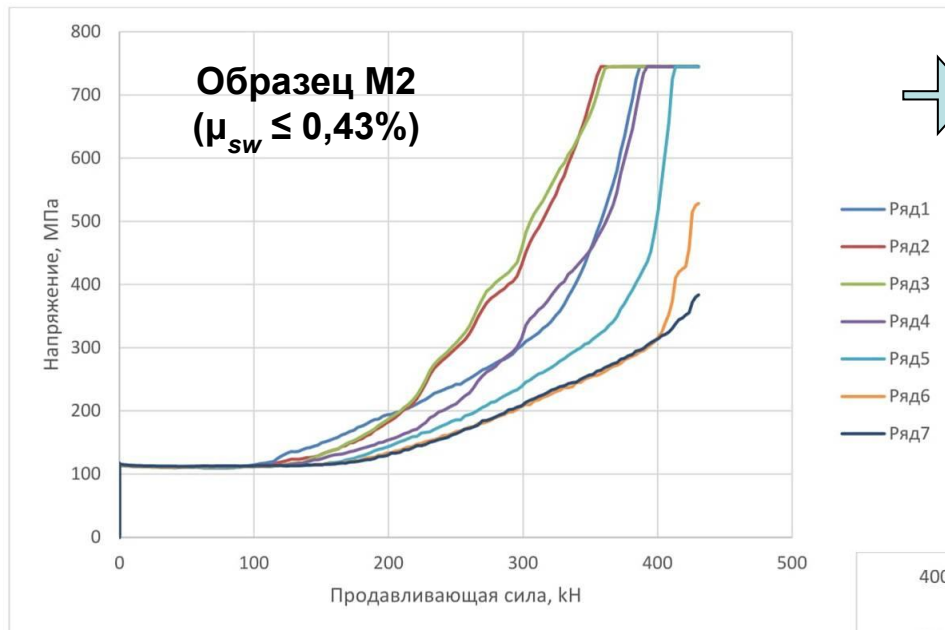
Влияние коэффициента поперечного армирования

Образцы	μ_{sw} , %	F_b , кН	F_{sw} , кН	F_{ult} , кН	F_{ult}/F_b
M0	0	318	-	318	1,00
M2	0,04	318	71	389	1,22
M3	0,08	318	117	435	1,37
M4	0,14	318	128	446	1,40
M5	0,22	318	167	485	1,53
M6	0,31	318	226	544	1,71
M7	0,43	318	259	577	1,81
M8	0,56	318	267	585	1,84
M10	0,87	318	282	600	1,89



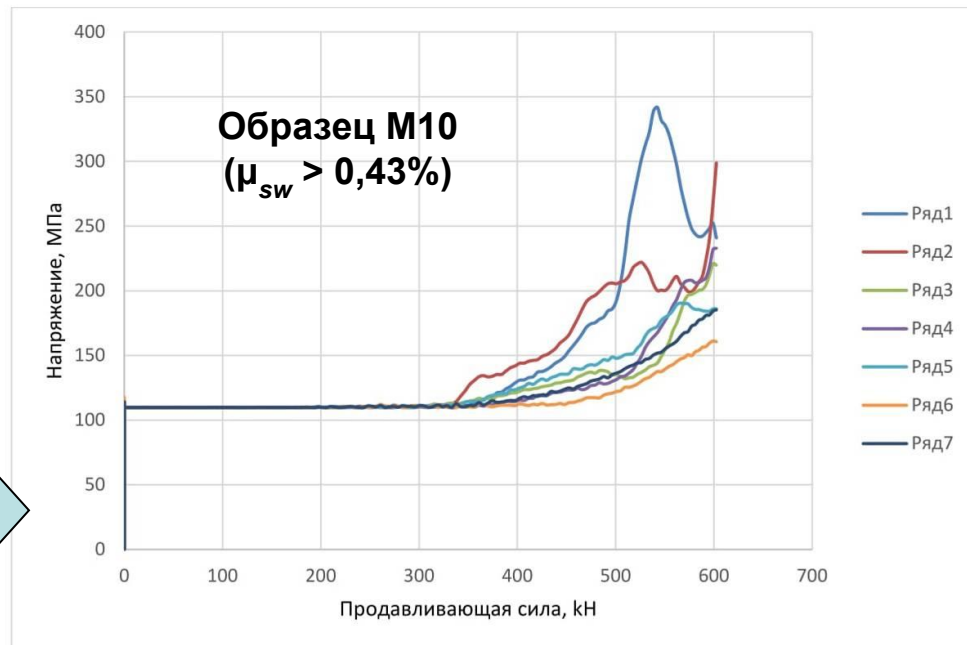
Влияние зависимости носит нелинейный характер и с ростом коэффициента поперечной арматуры рост вклада поперечной арматуры в общую несущую способность образцов замедляется и при содержании поперечной арматуры свыше 0,43% несущая способность образцов практически не повышается.

Напряжения в поперечных стержнях



При $0 \leq \mu_{sw} \leq 0,43\%$ разрушение моделей происходит в зоне поперечного армирования с достижением в поперечных стержнях предела текучести

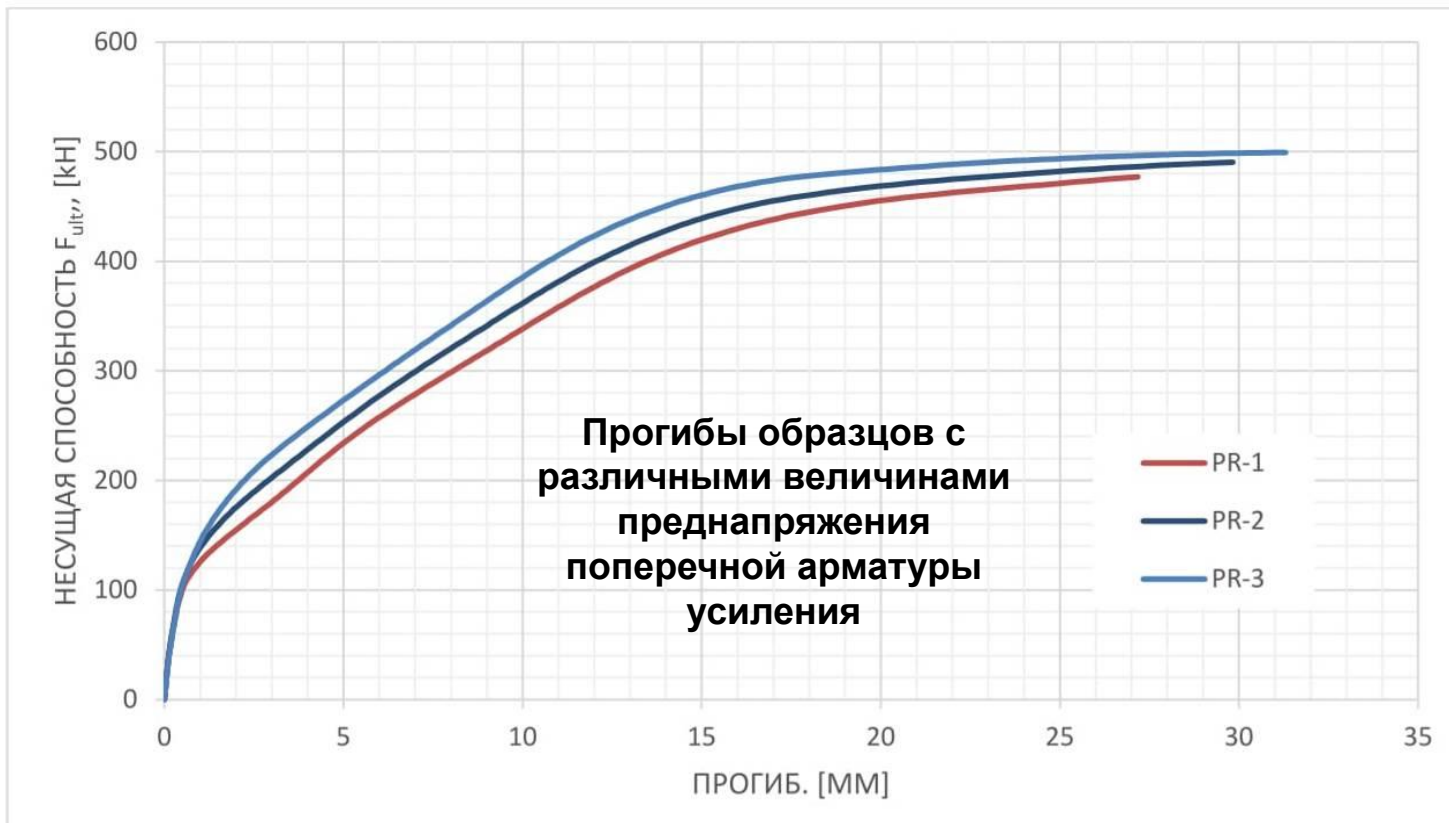
При $\mu_{sw} > 0,43\%$ в поперечной арматуре не достигается предел текучести и разрушение в образцах происходит в зоне от грани колонны до 1-го ряда поперечной арматуры усиления



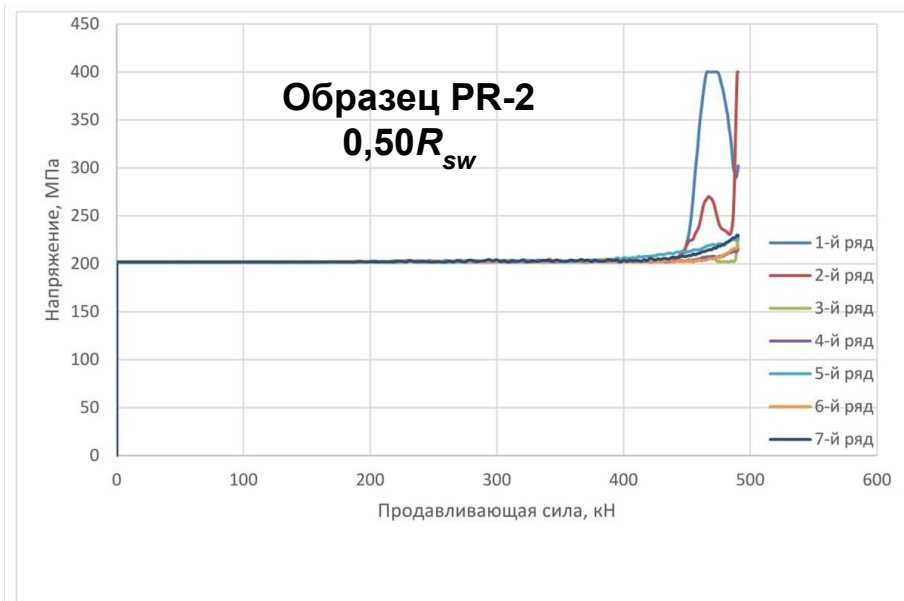
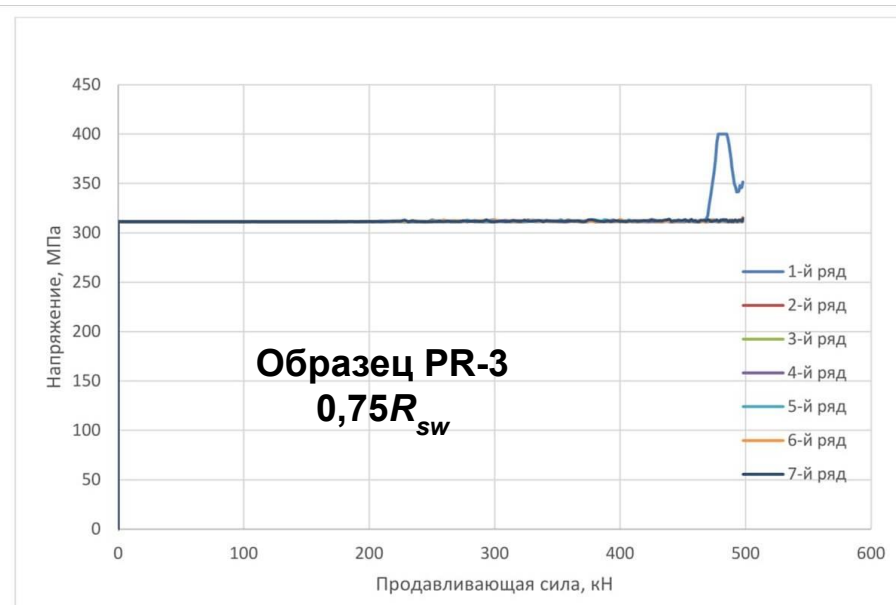
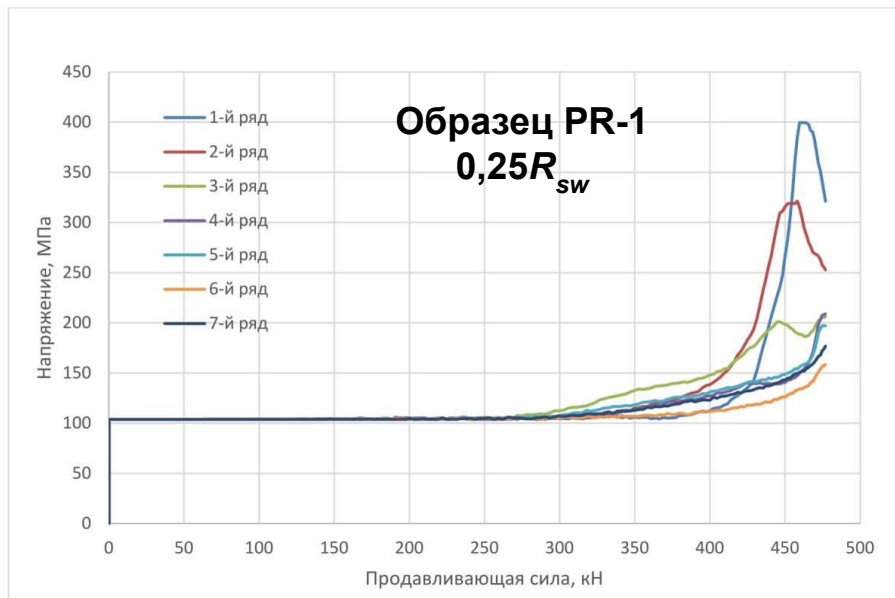
Влияние предварительного напряжения поперечной арматуры усиления

№ п/п	Образцы	σ_p , МПа	u_{ult} , мм	F_{ult} , кН
1	PR-1	$0,25R_{sw}$	27	477
2	PR-2	$0,5R_{sw}$	30	490
3	PR-3	$0,75R_{sw}$	31	499

Увеличение момента затяжки поперечных шпилек практически не отражается на несущей способности и деформативности плиты модели.



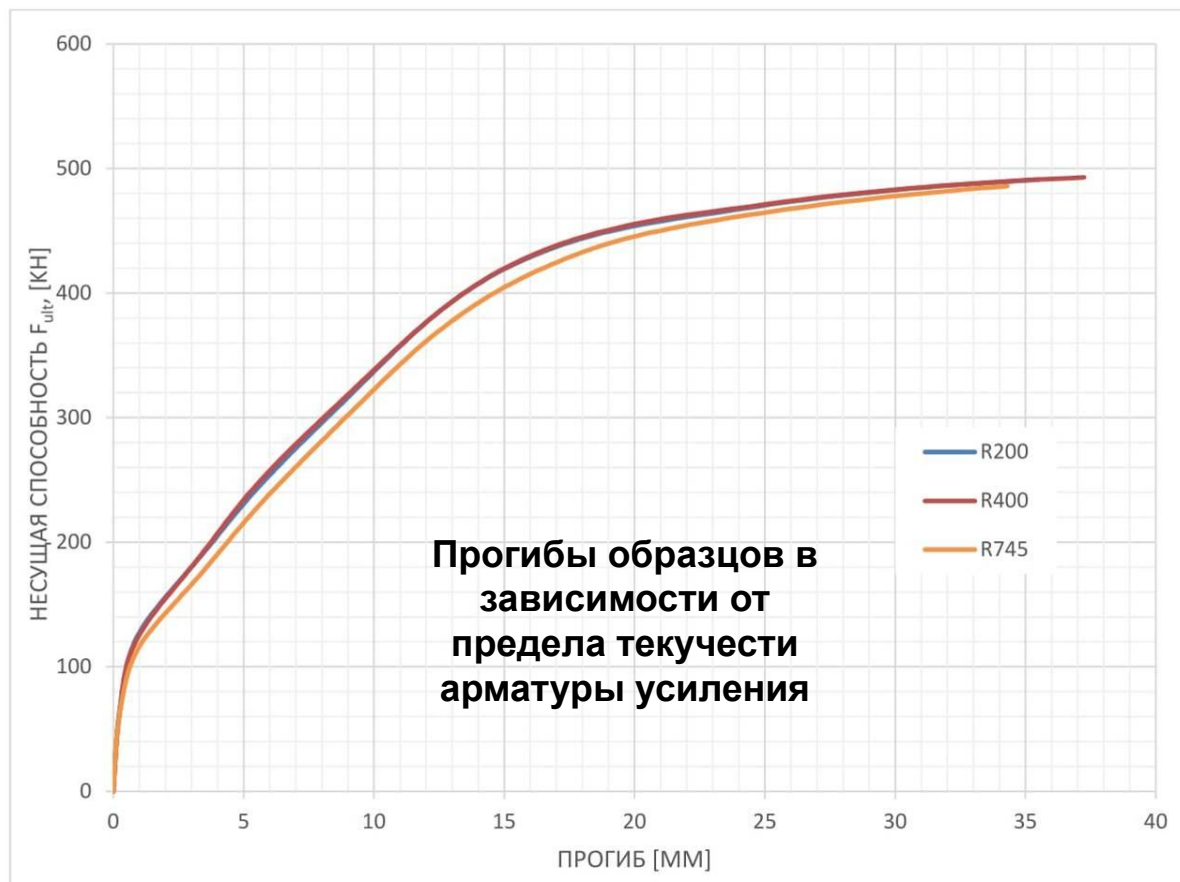
Напряжения в поперечных стержнях



Предварительное напряжение арматуры усиления способствует более быстрому и надёжному включению её в работу.

Влияние прочности поперечной арматуры

№ п/п	Образцы	R_{sw} , МПа	u_{ult} , мм	F_{ult} , кН
1	R200	200	34	486
2	R400	400	34	489
3	R745	745	34	486

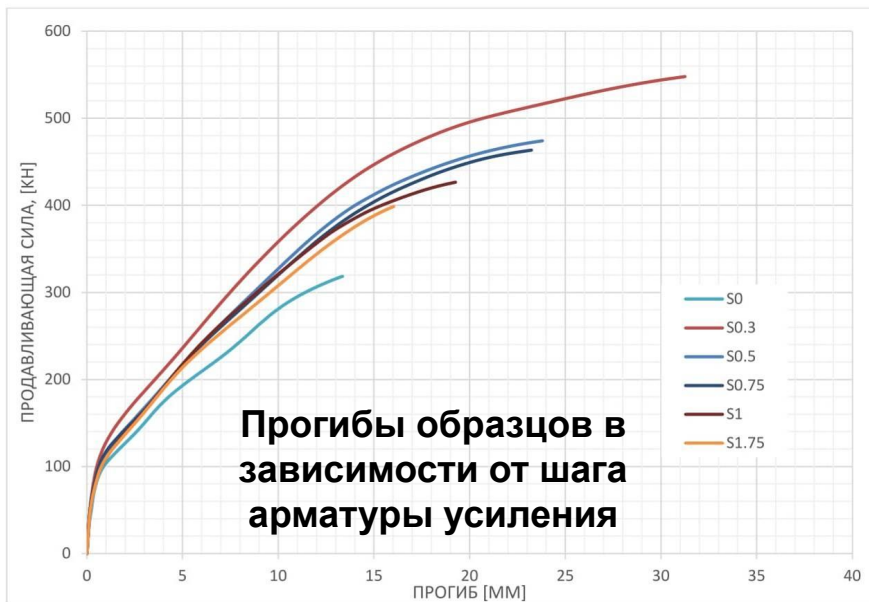


Повышение прочности арматуры усиления при сохранении постоянного вклада поперечной арматуры в несущую способность (за счёт уменьшения площади поперечного армирования) не влияет на прочность и деформативность плит модели при продавливании.

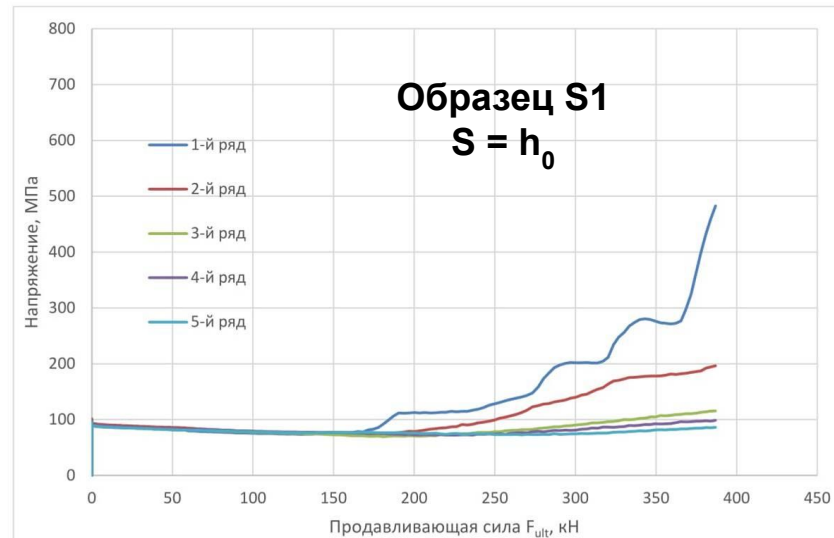
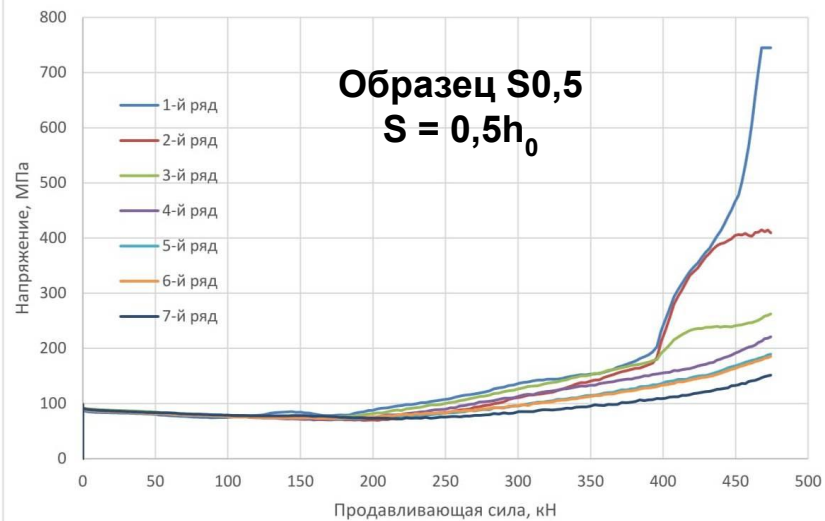
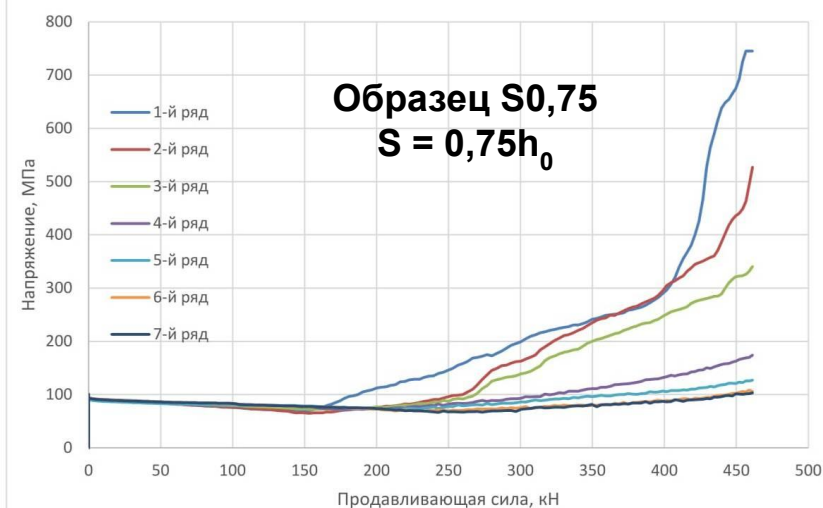
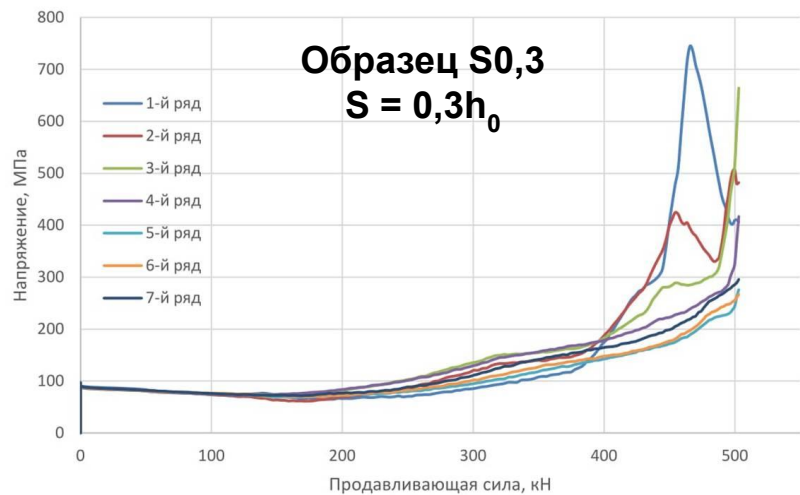
Влияние шага поперечной арматуры

№ п/п	Маркировка образца	s , мм	F_{ult} , кН	Увеличение несущей способности, %	Характер разрушения
1	S0	-	318	-	продавливание
2	S0,3	$0,3 \cdot h_0$	548	72,3	"
3	S0,5	$0,5 \cdot h_0$	474	49,1	"
4	S0,75	$0,75 \cdot h_0$	457	43,7	"
5	S1	h_0	426	34,0	"
6	S1,5	$1,5 \cdot h_0$	401	26,1	"
7	S1,75	$1,75 \cdot h_0$	401	26,1	"

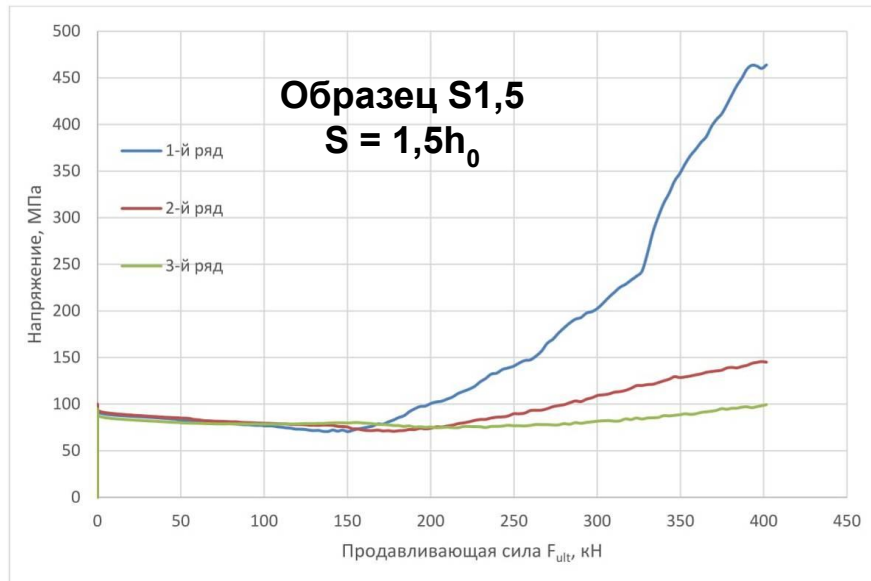
Постановка поперечной арматуры усиления эффективна даже при больших значениях шага постановки (до $1,75h_0$)



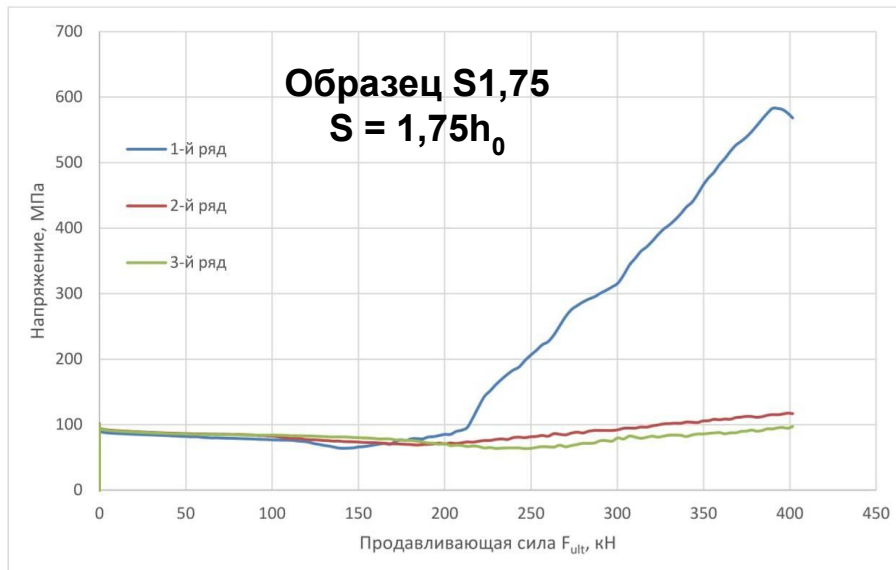
Напряжения в поперечных стержнях



Напряжения в поперечных стержнях



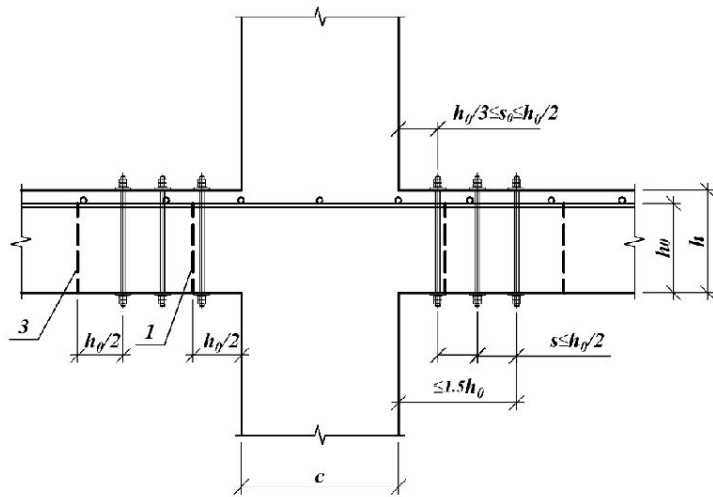
Усиление в виде поперечного армирования становится неэффективным при постановке его с шагом больше $1,75 \cdot h_0$, так как при превышении этого шага разрушение происходит между гранью колонны и первым шагом поперечного армирования.



Стержни, ближайšie к колонне, следует располагать не ближе $h_0/3$ и не далее $h_0/2$ от колонны.

Ширина зоны постановки поперечной арматуры усиления должна быть не менее $1,5 \cdot h_0$.

Рекомендации по проектированию усиления плит сквозными шпильками



Арматуру усиления, установленную под действием нагрузки, в расчёте можно рассматривать как поперечное армирование, устанавливаемое до бетонирования.

Расчёт прочности плиты с усилением следует выполнять по общим правилам в соответствии с требованиями СП 63.13330.2012, учитывая в расчёте только те стержни усиления, которые пересекают пирамиду продавливания.

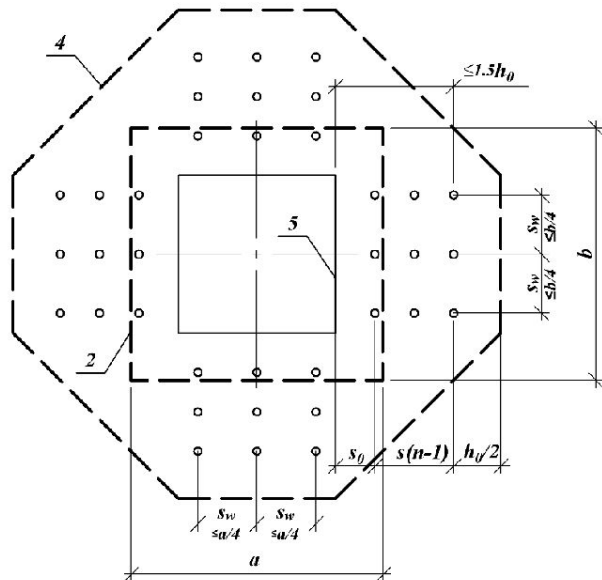


Схема для расчёта на продавливание плит с поперечной арматурой усиления в виде сквозных шпилек

- 1 – первое расчётное поперечное сечение в зоне поперечного армирования;
- 2 – контур первого расчётного поперечного сечения;
- 3 – второе расчётное поперечное сечение, расположенное за контуром поперечного армирования;
- 4 – контур второго расчётного сечения;
- 5 – контур площадки приложения нагрузки

Рекомендации по проектированию усиления плит сквозными шпильками

Конструктивные требования

Поперечную арматуру усиления в плитах в зоне продавливания в направлении ортогональным сторонам расчётного контура рекомендуется устанавливать с шагом не более $1/2 \cdot h_0$ и не более 300 мм.

Стержни, ближайšie к колонне, следует располагать не ближе $h_0/3$ и не далее $h_0/2$ от колонны. Ширина зоны постановки поперечной арматуры усиления должна быть не менее $1,5 \cdot h_0$.

Расстояния между стержнями вдоль расчётного контура рекомендуется принимать не более $1/4$ длины соответствующей стороны расчётного контура.

Следует выполнять предварительное напряжение поперечной арматуры усиления. При этом величину предварительного напряжения необходимо принимать не менее 30% и не более 70% от предела текучести арматуры усиления.

Толщина анкерных пластин принимается не менее 0,5 диаметра арматуры усиления, а размеры в плане – не менее 3-х диаметров.

Заключение

Научную новизну работы составляют:

- параметры конечно-элементной модели для расчёта плит на продавливание, учитывающие нелинейную работу бетона на всех стадиях нагружения, включая стадию разрушения;
- результаты численного моделирования изменения напряжений в стержнях поперечной арматуры на всех стадиях работы плит, вплоть до разрушения;
- теоретические данные о влиянии на работу плит в условиях продавливания коэффициента поперечного армирования, предварительного напряжения арматуры усиления, шага постановки, прочности арматуры усиления.

Теоретическая значимость проведенного исследования

состоит в анализе механизма сопротивления продавливанию плоских железобетонных плит, усиленных поперечной арматурой, при варьировании количества, шага, прочности поперечной арматуры и величины усилий предварительно напряжения поперечных стержней.

Практическая значимость полученных результатов

состоит в определении рациональных параметров поперечного армирования плит при усилении, что будет способствовать более обоснованному и качественному проектированию усиления железобетонных плит на продавливание путем постановки поперечной арматуры.

**Спасибо за
внимание!**

