



Nonlinear Analysis of Damaged Reinforced Concrete Columns, restored with Carbon Fiber jacket Using ABAQUS

Gamal Algnde

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

October 20, 2020

УДК 624.012.4

**НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕННЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН, ВОССТАНОВЛЕННЫХ
ОБОЛОЧКОЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОМОЩЬЮ ABAQUS**

Г. Алжиде *

**«Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет», институт строительства и
архитектуры, каф. «железобетонных и каменных конструкций», г.
Москва, Россия**

*** Магистрант, университет МГСУ, gamalalgnde93@gmail.com**

Аннотация: В нормативных документах нет конкретных рекомендаций по расчету поврежденных элементов. Поэтому необходимо усовершенствовать и создавать новые методы расчета несущей способности поврежденных железобетонных элементов, то есть расчета их остаточной прочности, на основании которой принимается та или иная схема усиления. Также восстановление армированных колонн с использованием материалов из углепластика является важным процессом реабилитации. В статье представлен нелинейный анализ поврежденных железобетонных колонн, восстановленных оболочкой из углепластика. Исследование включает описание модели, принятой в анализе с использованием метода конечных элементов FEM с помощью ABAQUS, который включает выбор соответствующих элементов для моделирования и определение свойств материала, с учетом физической нелинейности, геометрической нелинейности; а затем соединение арматуры и оболочку из углепластика с бетонным. И назначение граничных условий и нагрузок; расчет полученной модели; и анализ результатов компьютерного моделирования для определения оставшуюся несущую способность колонны после повреждения и новую несущую способность после восстановления.

Ключевые слова: Поврежденные железобетонные колонны; метод конечных элементов; физическая нелинейность; геометрическая нелинейность; углепластик; несущая способность; ABAQUS.

Введение:

Существующие бетонные конструкции часто нуждаются в ремонте и / или восстановлении, в основном из-за разрушения, вызванного воздействием окружающей среды, экстремальных явлений или изменений в проектных допущениях. Бетонные колонны обычно укрепляют или восстанавливают с помощью бетонной оболочки, поскольку это приводит к повышению как пластичности, так и прочности. В настоящее время оболочка из углепластика (CFRP) представляет собой интересную альтернативу последней из-за ее высокого отношения прочности к массе, простой процедуры нанесения и незначительного увеличения геометрии. В этом исследовании представлен нелинейный анализ поврежденных железобетонных колонн, восстановленных оболочкой из углепластика (CFRP) с помощью ABAQUS.

Структурный анализ с использованием метода конечных элементов FEM:

На основе основных целей этого исследования были разработаны трехмерные модели конечных элементов железобетонных колонн, а различные вопросы, связанные с моделированием, рассматриваются следующим образом:

1. Тип конечных элементов.
2. Свойства материалов.
3. Назначение поперечных сечений.
4. Определение шага приложения нагрузки.
5. Взаимодействие между элементами.
6. Назначение граничных условий и нагрузок.
7. Создание сетки конечных элементов FEM.
8. Назначение работы.
9. Оценка результатов.

Шесть железобетонных колонн с различными отверстиями в разных положениях и контрольная колонна без отверстий были изучены для расчета их остаточной прочности.

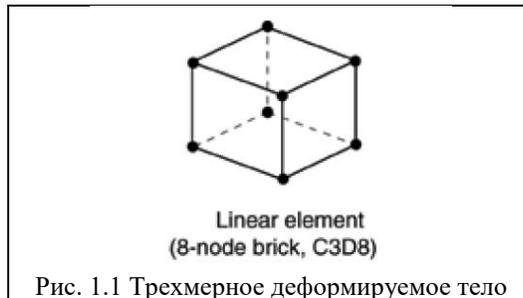
При моделировании принята следующая система измерений - SI.

Таблица 1 – Система единиц измерения.

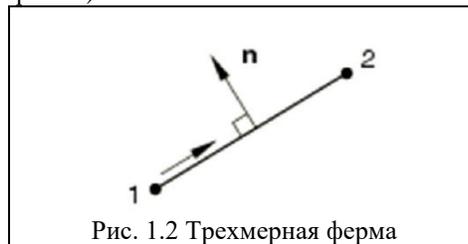
Длина	Сила	Масса	Время	Давление	Плотность
<i>mm</i>	N	t	s	MPa	t/mm^3

1. Тип конечных элементов:

Бетонный элемент колонны был смоделирован с использованием твердого шестигранного элемента, который в ABAQUS определяется как элемент C3D8 (Континуум трехмерное (3D), 8 узлов), также с использованием деформируемого тела. Твердый элемент имеет восемь узлов с шестью степенями свободы в каждом узле, как показано на рисунке 1.1.



Арматурная сталь моделируется с использованием стержней в программе ABAQUS, определяемой как элемент T3D2 (2-узловая линейная 3-D стержень).



Поскольку толщина листов CFRP (углепластика) намного меньше, чем другие размеры, CFRP действует как оболочка, поэтому для их моделирования были приняты элементы 4-узловой оболочки (S4), как показано на рисунке 1.3.



2. Свойства материала и назначение поперечных сечений:

2.1. Моделирование свойств бетона:

Два типа свойств используется для описания нелинейных свойств бетона:

- ❖ Упругие свойства.
- ❖ Пластические свойства.

Таблица 2.1– Свойства бетона.

Плотность бетона	2.5E-9 т\mm ³		
поперечное сечение бетона	300*300*2000 mm	размеры отверстия	75*400*300 mm
прочность на сжатие стандартных образцов (fck)	20 МПа		
характеристическая прочность образца бетона на сжатие в виде куба (fck,cube)	25 МПа		
средняя прочность бетона на сжатие (fcm)	$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 28 \text{ МПа}$		
средняя прочность бетона на растяжение (fctm)	$f_{ctm} = 0.3 * f_{ck}^{2/3} = 2.21 \text{ МПа}$		
Упругие свойства	Модуль упругости бетона (Ecm)	$E_{cm} = 22 * (f_{cm}/10)^{0.3} * 10^3 = 29962 \text{ МПа}$	
	Коэффициент Пуассона (ν)	0.2	

Пластические свойства : в расчетах этой работе использовалась модель бетона с пластичным разрушением. Параметры модели пластичного разрушения бетона с повреждениями представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2– Параметры модели пластичного разрушения бетона с повреждениями.

Dilation Angle (ψ)	Eccentricity (ϵ)	f_{b0}/f_{c0}	k_c	Viscosity parameter
31	0.1	1.16	0.67	0.0001

Dilation Angle (ψ) :Угол дилатации, определяющий отношение объемной и сдвиговой деформации.

Eccentricity (ϵ) :Параметр, отвечающий за скорость перехода в пластичное состояние материала.

f_{b0}/f_{c0} :Отношение прочности бетона при двухосном сжатии к прочности бетона при одноосном сжатии.

k_c :Параметр формы поверхности для бетона.

Viscosity Parameter :Параметр вязкости.

Таблица 2.3– Зависимости напряжений и коэффициентов повреждения от нелинейных деформаций при сжатии и зависимости напряжений и коэффициентов повреждения от деформаций при растяжении.

Зависимость напряжений и деформаций при сжатии		Коэффициент повреждения бетона при сжатии	
Напряжения σ_c (МПа)	Нелинейные деформации ϵ_c^{in}	Коэффициент повреждения d_c	Нелинейные деформации ϵ_c^{in}
11.2	0	0	0
18.45395	0.000156	0	0.000156
23.91742	0.000372	0	0.000372
27.01647	0.000667	0	0.000667
28	0.001032	0	0.001032
27.4519	0.001357	0.019575059	0.001357
25.8638	0.001717	0.076292715	0.001717
23.31371	0.002109	0.167367512	0.002109
19.872	0.00253	0.290285726	0.00253
15.60236	0.002979	0.442773012	0.002979
8.30701	0.005873	0.703321077	0.005873
Зависимость напряжений и деформаций при растяжении		Коэффициент повреждения бетона при растяжении	
Напряжения σ_t (МПа)	Трещинные деформации u_t^{ck} (mm)	Коэффициент повреждения d_t	Трещинные деформации u_t^{ck} (mm)
2.210419	0	0	0
1.129164	0.030924	0.17537	0.030924
0.660059	0.061849	0.35075	0.061849

0.459779	0.092773	0.52612	0.092773
0.352886	0.123697	0.7015	0.123697
0.272163	0.154621	0.87687	0.154621
0.199853	0.185546	0.9015	0.185546
0.135008	0.21647	0.92612	0.21647

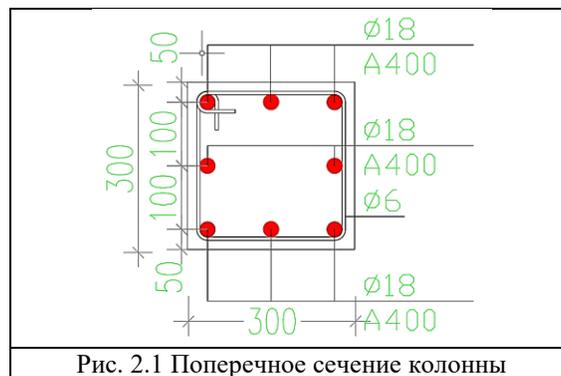
2.2. Моделирование свойств арматурной стали:

Два типа свойств используется для описания нелинейных свойств арматурной стали:

- ❖ Упругие свойства.
- ❖ Пластические свойства.

Таблица 2.4— Свойства арматурной стали.

Плотность арматурной стали	7.85E-9 т/мм ³		
поперечное сечение арматурной стали	продольная арматура (основная)	8Ø18 мм	
	поперечная арматура	Ø6 мм	
Упругие свойства	Модуль упругости арматурной стали (Ea)	Ea = 200000 МПа	
	Коэффициент Пуассона (ν)	0.3	
Пластические свойства	Напряжения (МПа) - (A400)	400	400
	Нелинейные деформации	0	0.01

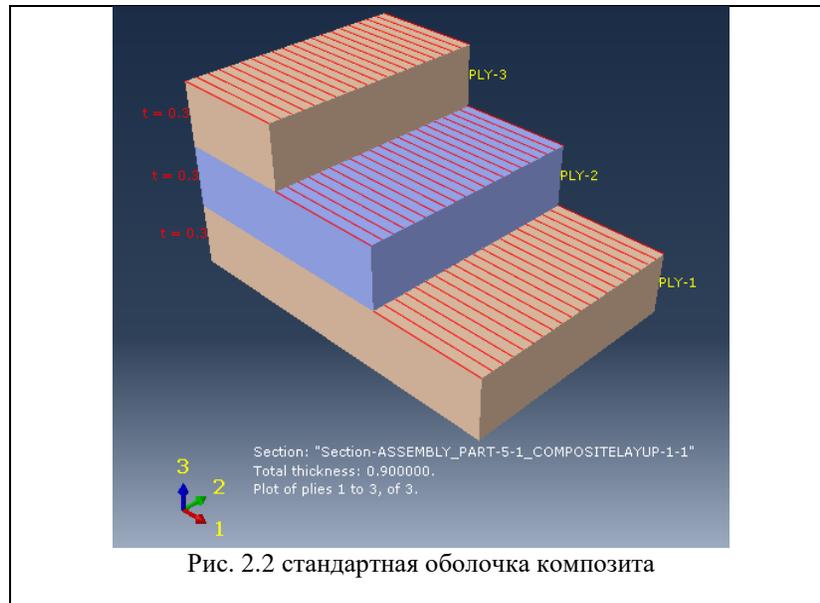


2.3. Моделирование свойств CFRP (углепластика):

Углепластик (CFRP) был смоделирован с линейным упругим поведением до разрыва. В этом исследовании CFRP рассматривается как ортотропный элемент. Следовательно, необходимо рассматривать свойства элемента в каждом направлении отдельно. Модуль упругости в основном направлении установлен на 138 ГПа, а толщина CFRP составляет 0.3*3 мм. Была принята стандартная оболочка композита, в которой каждый лист CFRP моделировался как отдельный слой (см. рис. 2.1). Для модели ортотропного материала инженерные константы в программном обеспечении ABAQUS указаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5– Ортотропные свойства материала в каждом направлении.

Модуль упругости (МПа)		Модуль сдвига (МПа)		Коэффициент Пуассона	
E_1	138000	G_{12}	5200	ν_{12}	0.28
E_2	9500	G_{13}	5200	ν_{13}	0.28
E_3	9500	G_{23}	1450	ν_{23}	0.4



3. Взаимодействие между элементами:

3.1. Назначение свойств контакта арматуры и бетона:

Предполагалось, что стальные стержни идеально прикреплены к прилегающему бетону путем встраивания элементов, представляющих стальные стержни, в элементы, представляющие бетон, с использованием встроенной опции (embedded region) в ABAQUS.

3.2. Назначение свойств контакта бетона и CFRP:

В элементах из CFRP - армированного бетона существует два возможных режима отказа листов CFRP, а именно разрыв CFRP и отслоение или расслоение CFRP. Первое в основном происходит в сжатых элементах, таких как CFRP колонны, а второе - в изгибаемых элементах, таких как CFRP балки. Таким образом, из-за преобладания режима разрыва CFRP в CFRP бетонных колоннах, связь между бетоном и CFRP не оказывает значительного влияния на поведение конструкций. Поэтому в ABAQUS используется модель совместной работы (tie constraint) бетона и CFRP по поверхности контакты.

3.3. Назначение свойств контакта бетона и жесткой пластины:

Для каждой жесткой пластины в верхней и нижней части колонн, определяется одна контрольная точка (reference point RP) в ее центре. Жесткие пластины были привязаны к соответствующим контрольным точкам. Для этого используется ограничение твердого тела (rigid body constraint). Твердое тело представляет собой набор узлов, элементов и / или поверхностей, движение которых регулируется движением одной контрольной точки. Другими словами, при использовании этой опции пластины ведут себя жестко, и граничные условия могут применяться к соответствующим контрольным точкам вместо использования твердого тела пластины. В ABAQUS используется модель совместной работы (tie constraint) бетона и жесткой пластины по поверхности контакты.

4. Восстановление отверстия:

Отверстие заполняется бетоном, также используется арматура того же диаметра, что и арматура, используемая в колонне. Старая арматура соединяется с новой арматуры с помощью соединительной втулки со срезным болтом / клином.

Соединительная втулка со срезным болтом / клином: предназначенная в первую очередь для сращивания стержней меньшего диаметра, размером от (12 mm – 20 mm), соединительная втулка имеет овальное поперечное сечение, что позволяет перекрывать два арматурных стержня одинакового диаметра во втулке, как показано на рисунке 4.1.

В ABAQUS используется модель совместной работы (tie constraint) старого и нового бетона , а также старую и новую арматуру по поверхности контакты.



Рис. 4.1 Соединительная втулка со срезным болтом / клином

5. Назначение граничных условий и нагрузок:

Сжимающая нагрузка прикладывается к RP верхней жесткой пластины в направлении U3 с помощью метода контроля смещения. Стратегия решения основана на статическом общем методе, который прост и имеет достаточно короткое время анализа. Граничные условия и приложение нагрузки показаны на рисунке 5.1.

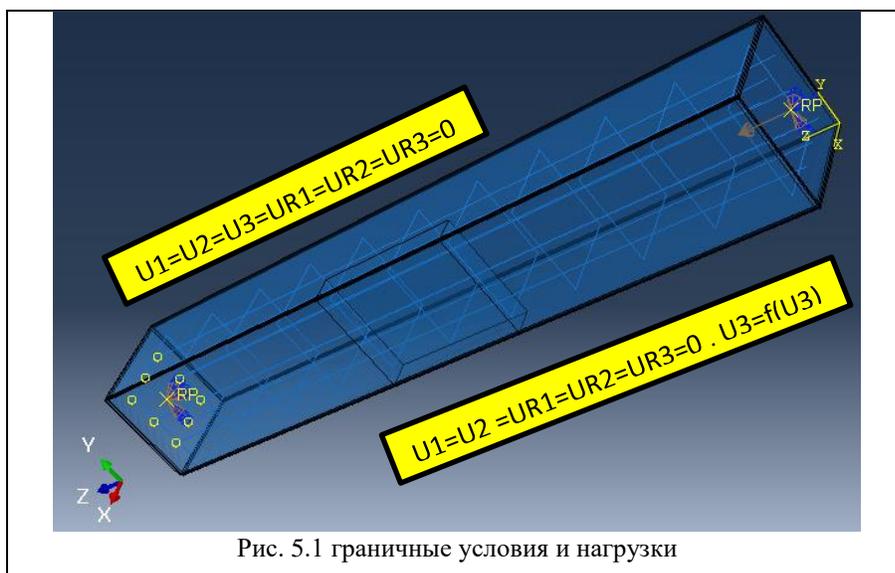
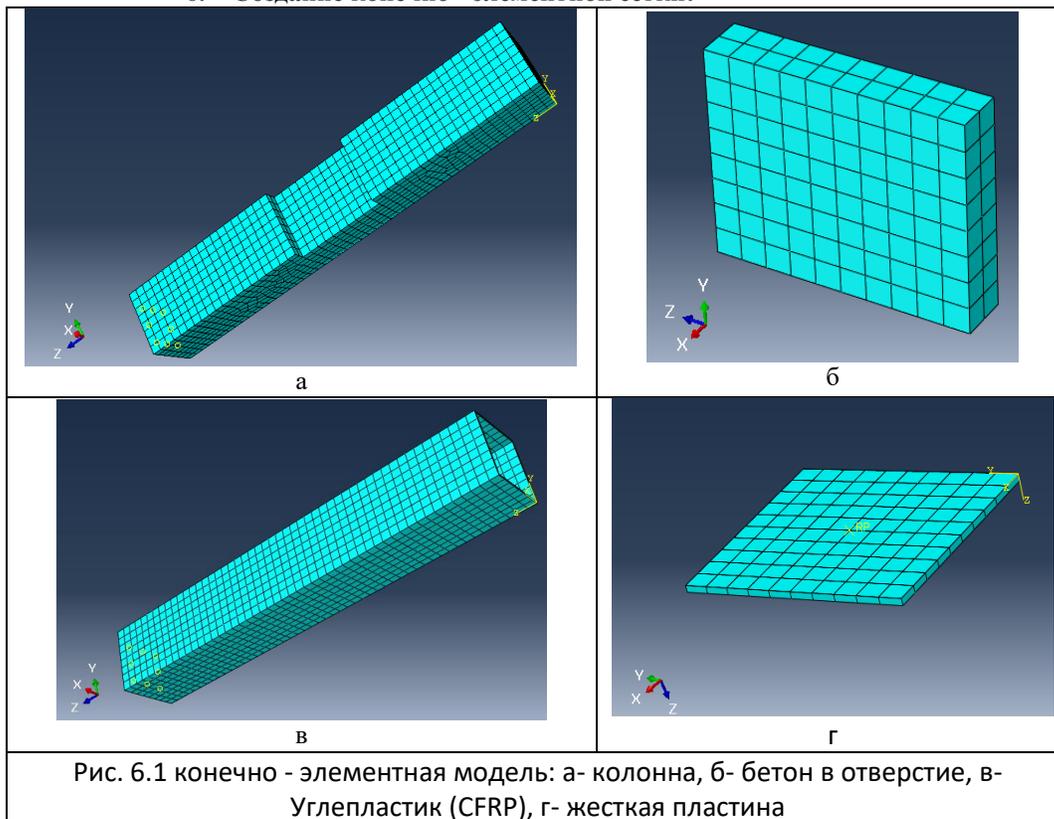


Рис. 5.1 граничные условия и нагрузки

6. Создание конечно - элементной сетки:



7. Результаты расчета методом конечных элементов:

7.1. Влияние толщины оболочки из углепластика (CFRP) на несущую способность восстановленной железобетонной колонны:

По результатам анализа мы обнаружили, что подходящую толщину оболочки из углепластика (CFRP) можно выбрать в зависимости от поставленной цели: либо восстановить только прежнюю несущую способность колонны с небольшим увеличением несущей способности, либо значительно увеличить ее несущую способность в случае дополнительных нагрузок. На следующем рисунке показаны кривые «несущая способность - перемещение»

железобетонной колонны, восстановленной оболочкой из углепластика (CFRP) с переменной толщиной оболочки.

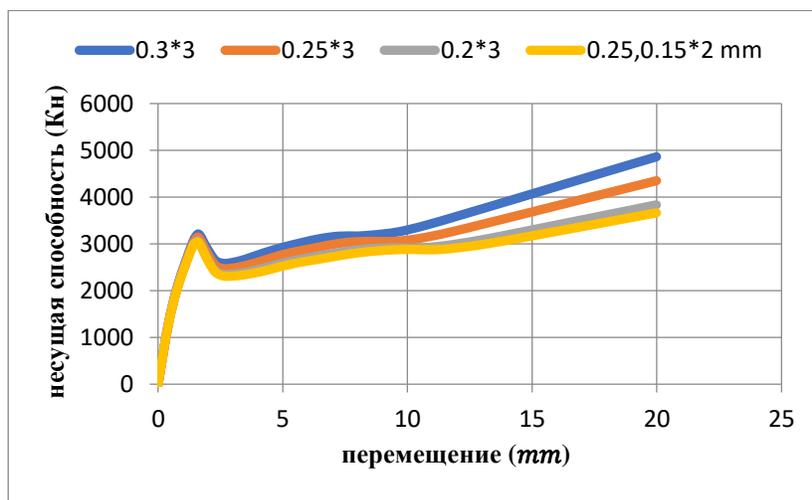


Рис. 7.1 Кривые «несущая способность - перемещение» железобетонной колонны, восстановленной оболочкой из углепластика (CFRP) с переменной толщиной оболочки

7.2. Сравнение несущей способности поврежденной колонны и восстановленной колонны с оболочкой из углепластика (CFRP):

Если мы хотим восстановить только прежнюю несущую способность колонны с небольшим увеличением несущей способности, мы используем оболочку из углепластика (CFRP) толщиной (0,2;15*2 мм), в этом случае несущая способность составляет 82 %. А если мы хотим значительно увеличить несущую способность колонны в случае дополнительных нагрузок, мы используем оболочку из углепластика (CFRP) толщиной (0,3*3 мм), в этом случае несущая способность составляет 142 %. На следующем рисунке показаны кривые «нагрузка - перемещение» железобетонной колонны, восстановленной оболочкой из углепластика (CFRP), и железобетонной колонны с отверстием.

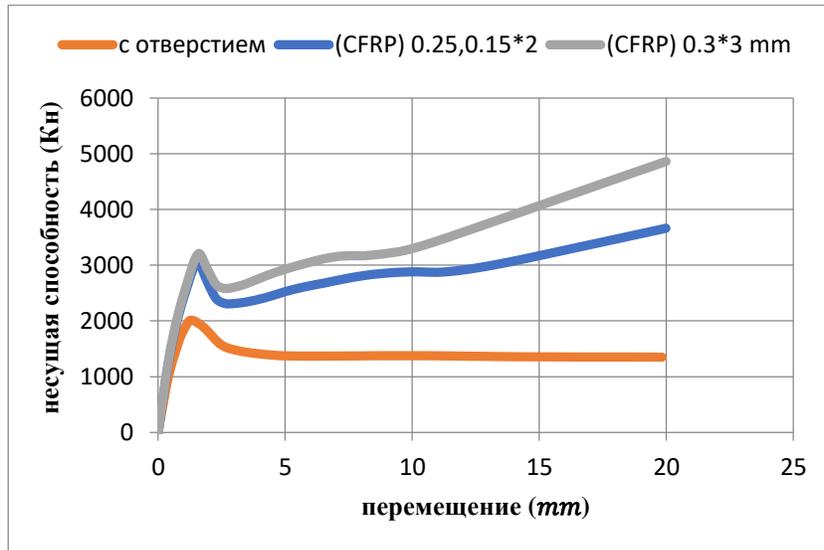


Рис. 7.2 Кривые «несущая способность - перемещение» железобетонной колонны, восстановленной оболочкой из углепластика (CFRP), и железобетонной колонны с отверстием

7.3. Эффективность углепластика (CFRP), когда колонна подвергается вне центры приложения нагрузки:

На рисунке 7.3 показана эффективность углепластика (CFRP) при восстановлении колонны при изменении эксцентриситета приложения нагрузки.

1. Чистое осевое сжатие (точка А). Это самая большая осевая сжатая нагрузка, которую может выдержать колонна.
2. Сжатие с незначительным изгибом (точка Б). Это случай большой осевой нагрузки, действующей при небольшом эксцентриситете. Распределение напряжения становится наклонным, но сечение все еще находится в состоянии сжатия. Разрушение происходит из-за раздавливания бетона.
3. Контроль сжатия (точка В). Здесь существуют как зона сжатия, так и зона растяжения бетона. Сталь подвергается растяжению. Разрушение происходит из-за раздавливания

- бетона на стороне сжатия, тогда как напряжение в стали f_s меньше, чем предел текучести f_y .
4. Уравновешенное состояние (точка Г). Состояние равновесия достигается, когда деформация сжатия в бетоне достигает предела, а растягивающая арматура одновременно достигает текучести. Разрушение бетона происходит одновременно с текучестью стали.
 5. Контроль растяжения (точка Д). Это случай небольшой осевой нагрузки с большим эксцентриситетом, то есть с большим моментом. В случае разрушения деформация в растягивающей стальной больше, чем деформация текучести.
 6. Чистый изгиб (точка Е). В этом случае на сечение действует изгибающий момент M , тогда как осевая нагрузка $P = 0$. Разрушение происходит так же, как в балке, подверженной только изгибающему моменту.

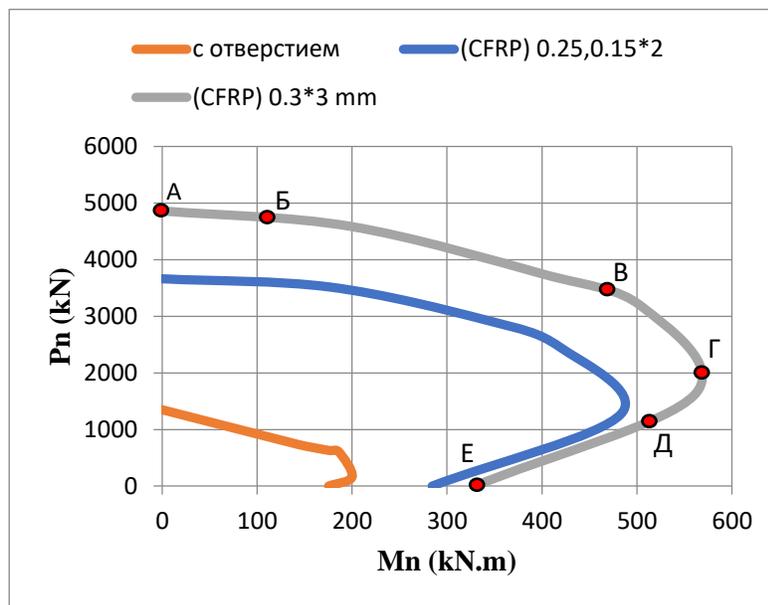


Рис. 7.3 Схема взаимодействия углепластика - железобетонная колонна

7.4. Основные пластические деформации:

Основные пластические деформации железобетонной колонны, восстановленной оболочкой из углепластика (CFRP), и железобетонной колонны с отверстием при максимальной нагрузке показаны на следующем рисунке. Здесь мы замечаем огромную роль углепластика (CFRP) в уменьшении этих пластических деформаций.

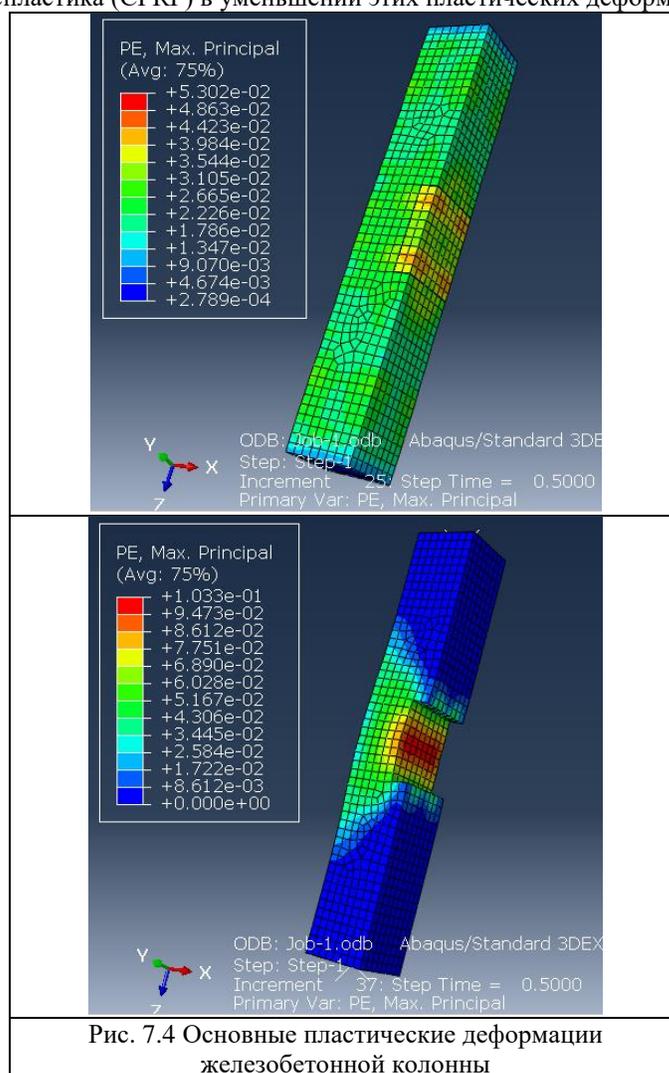


Рис. 7.4 Основные пластические деформации железобетонной колонны

Заключение:

В данной работе были проведены расчеты и исследования нелинейного анализа поврежденных железобетонных колонн, восстановленных оболочкой из углепластика (CFRP). Программная система ABAQUS была выбрана в качестве флагманской благодаря своим объективным преимуществам перед аналогами.

Реалистичное моделирование нелинейных свойств железобетона в численных расчетах представляет собой сложную многокомпонентную задачу.

В процессе исследования была изучена модель деформирования и прочности железобетона, арматуры и оболочки из углепластика (CFRP). При проведении сравнения несущей способности поврежденной колонны и восстановленной колонны с оболочкой из углепластика (CFRP) рассмотрены два случая: в первом использовалась оболочка из углепластика (CFRP) толщиной (0,2;15*2 мм), в данном случае несущая способность составила 82 %; во втором использовалась оболочка из углепластика (CFRP) толщиной (0,3*3 мм), в данном случае несущая способность составила 142 %. Также была показана существенная эффективность углепластика (CFRP) при восстановлении колонны при изменении эксцентриситета приложения нагрузки, и огромная роль углепластика (CFRP) в уменьшении пластических деформаций.

Список литературы:

1. B. Alfarah, F. López-Almansa, S. Oller, New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures, *Engineering Structures* 132 (2017) 70–86.
2. ABAQUS/CAE User's Manual.
3. ABAQUS Example Problems Manual v6.14.
4. ABAQUS - Применение комплекса в инженерных задачах.
5. Isaac M. Daniel, Ori Ishai, *ENGINEERING MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS*, New York, Oxford, 2006.
6. *MECHANICAL REBAR SPLICING SYSTEMS*.