



**«СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ
ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И
СЖАТИИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И НЕСУЩУЮ
СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»**

Выполнил: Голубчиков Иван Александрович

Научный руководитель: Красовицкий Михаил Юрьевич
кандидат технических наук, доцент

Москва 2018 г.

Методика расчёта железобетонных конструкций по деформационной модели на нынешний день является весьма перспективной и приближенной к реальному поведению материала.

Но до сих пор в данной модели остаются неосвещенные и неизученные моменты. В частности, в технической литературе отсутствует информация о влиянии изменения ограничений деформационных диаграмм бетона на результаты расчетов.

Изучение этого вопроса позволяет восполнить пробел в исследовании деформационной модели и поэтому является актуальным направлением в развитии строительной науки и практики.

Цель

• Провести сравнительный анализ влияния изменения ограничений деформационных диаграмм бетона на несущую способность и трещиностойкость железобетонных конструкций при растяжении и сжатии.

Задачи:

1. Провести анализ и обобщение сведений о различных типах диаграмм деформирования бетона и методиках расчета по ним.
2. Выбрать приемлемую методику для численных исследований.
3. На основе расчетной модели, разработать программный вычислительный комплекс, позволяющий рассчитывать железобетонные конструкции, как по методике деформационной модели с ограничениями из СП 63.13330.2012, так и с возможностью редактирования деформационных диаграмм и изменения их ограничений.
4. Провести проверку разработанных алгоритмов на основе сравнения с результатами ручного метода расчета.
5. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы о влиянии увеличений ограничений диаграмм деформирования на результаты расчета несущей способности и трещиностойкости железобетонных конструкций при сжатии и растяжении.

На защиту выносятся:

- Разработанный программный расчетный комплекс для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели на базе связки Microsoft Office Excel + Autodesk AutoCAD с использованием макросов на языке Visual Basic.
- Результаты численных исследований железобетонных конструкций по несущей способности и трещиностойкости при изменении ограничений деформационных диаграмм бетона.
- Сравнение полученных результатов и анализ влияния ограничений предельных деформаций бетона на несущую способность и трещиностойкость железобетонных элементов при растяжении и сжатии.

Общие соображения

Расчет напряжённо деформированного состояния нормальных сечений по деформационной модели сводится к решению системы уравнений механики деформируемого твёрдого тела, включающей:

- *Статические условия* – уравнения равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении;

$$N = \sum_i \sigma_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} A_{s,j},$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{b,i} x_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} x_{s,j} A_{s,j},$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{b,i} y_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} y_{s,j} A_{s,j},$$

- *Геометрические условия* – уравнения распределения деформаций бетона и арматуры по координатам сечения (уравнения совместности деформаций);

$$\varepsilon_{b,i} = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{r_x}\right) \cdot x_{b,i} + \left(\frac{1}{r_y}\right) \cdot y_{b,i},$$

$$\varepsilon_{s,j} = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{r_x}\right) \cdot x_{s,j} + \left(\frac{1}{r_y}\right) \cdot y_{s,j},$$

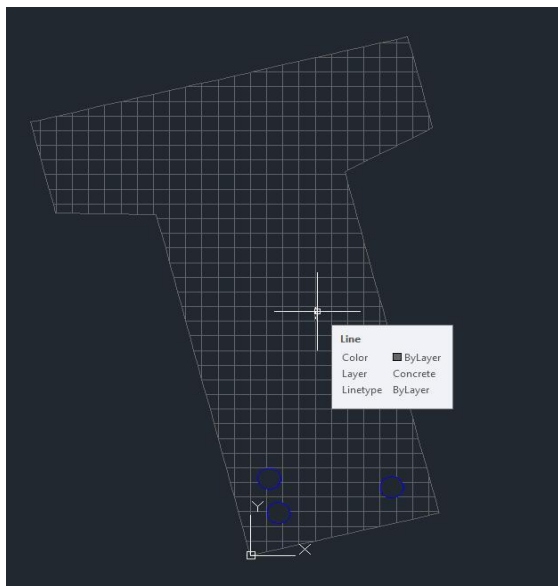
- *Физические условия* – уравнения связи между напряжениями и деформациями (уравнения состояния) материала

$$\sigma_{b,i} = f_b(\varepsilon_{b,i}) = \varepsilon_{b,i} E_b \nu_{b,i},$$

$$\sigma_{s,j} = f_s(\varepsilon_{s,j}) = \varepsilon_{s,j} E_s \nu_{s,j},$$

В случае такого физически нелинейного и конструктивно неоднородного материала, как железобетон, задачу удобнее решать с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению.

Для этого нормальное сечение представляют в дискретной форме – в виде набора элементарных участков, в пределах которых все характеристики (напряжения, деформации и др.) принимаются постоянными. Количество и размеры таких участков определяются особенностями напряженно деформированного состояния и другими факторами.



Пример деления сечения на элементарные участки для последующего проведения расчета

Методы решения исходных уравнений деформационной модели

Метод переменных параметров упругости.

Наиболее часто применяемый способ, в котором коэффициенты упругости физически нелинейного материала последовательно уточняются в процессе решения физически нелинейных задач.

Для его реализации составляется разрешающая система уравнений, в которой неизвестными являются обобщенные перемещения. Решение имеет вид:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ 1/r_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} N \\ M_x \end{Bmatrix}.$$

Компоненты матрицы жесткости зависят от коэффициентов секущего модуля бетона и арматуры, которые в свою очередь определяются уровнем деформаций.

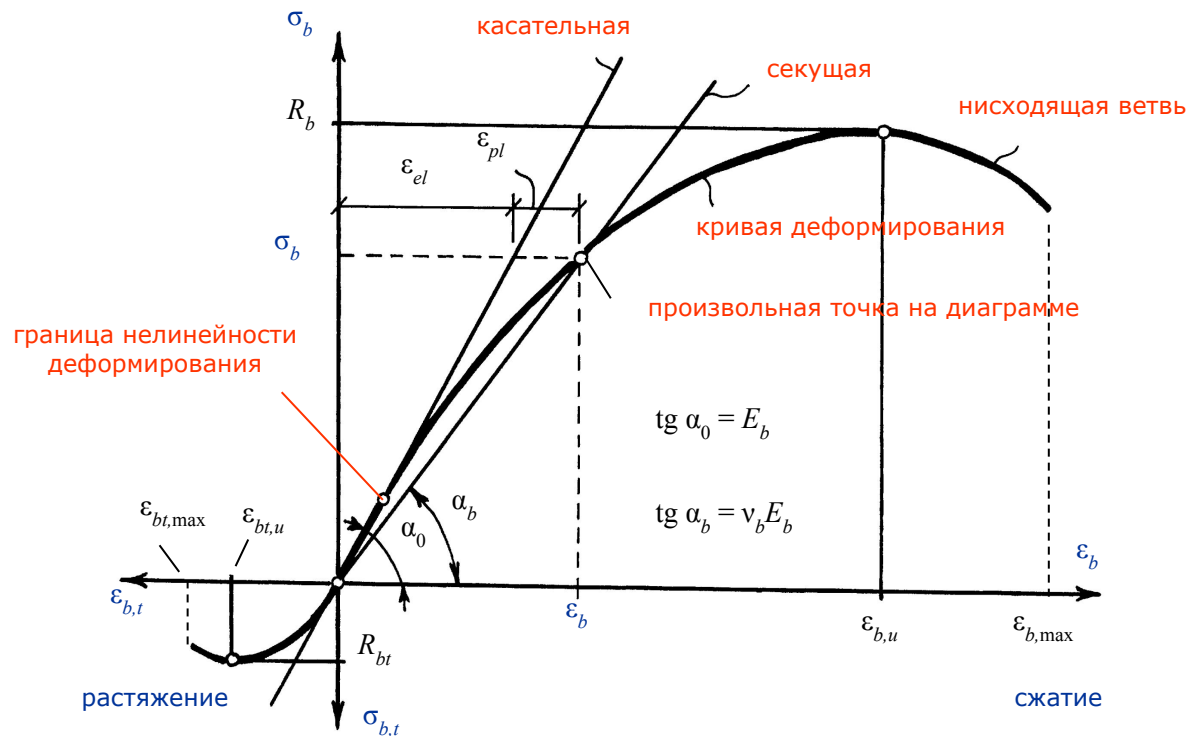
Решается методом приближений, задаваясь некоторыми значениями коэффициентов, определяя значения обобщенных деформаций, затем по гипотезе плоских сечений находят силовые деформации каждого компонента сечения, по ним вычисляют коэффициенты секущего модуля, а затем вновь проводят расчет до совпадения соответствующих деформаций двух смежных

Метод непосредственного подбора.

Для определения несущей способности и анализа состояния сечения в случаях плохой сходимости итерационного процесса более удобным оказывается метод непосредственного подбора параметров деформированного состояния.

Использование метода подбора позволяет выявить нисходящую ветвь на диаграмме «момент-кривизна», поскольку каждому заданному значению кривизны $1/r_x$ соответствует единственное значение момента M_x .

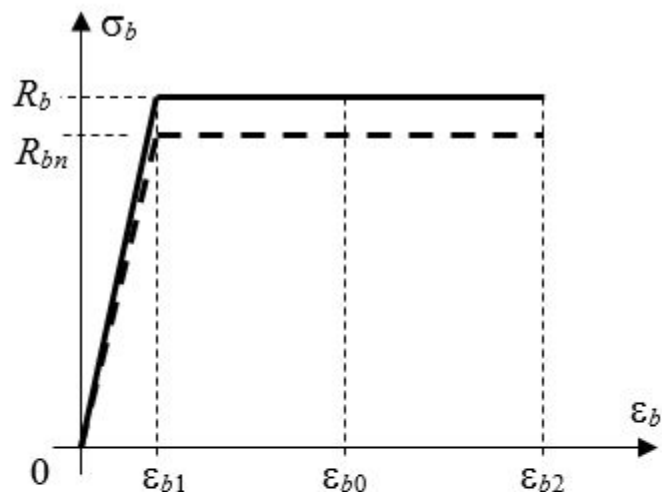
Однако и данный метод имеет свои недостатки, он сложнее алгоритмируется, что является немаловажным моментом при создании программного расчетного комплекса.



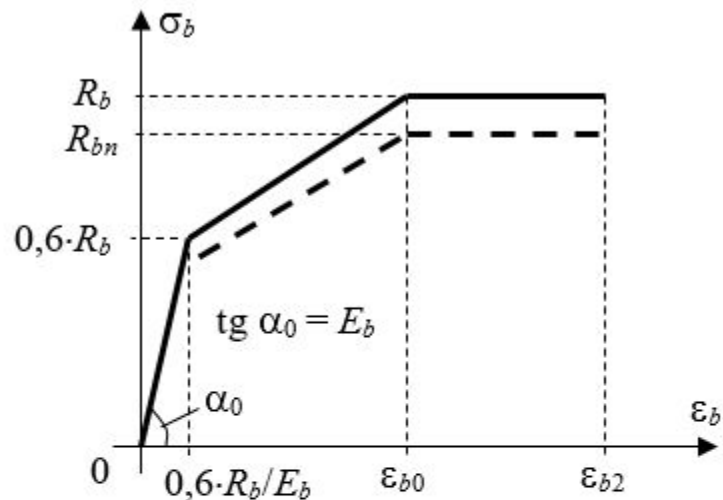
Полная диаграмма деформирования бетона

Российскими нормами допускается применять любые виды очертания диаграмм деформирования, однако СП 63.133300.2012 рекомендует к использованию двухлинейные и трехлинейные диаграммы по типу диаграмм Прандтля. В свою очередь, для расчета по несущей способности – двухлинейные, а для расчета по трещиностойкости – трехлинейные.

Двухлинейная



Трёхлинейная



Значения деформаций для тяжёлого бетона при непродолжительном действии нагрузки

Сжатие

$\epsilon_{b0} = 0,002$ (0,2%)

$\epsilon_{b1} = 0,0015$ (0,15%)

$\epsilon_{b2} = 0,0035$ (0,35%) – для классов бетона не выше В60

Растяжение

$\epsilon_{bt,0} = 0,0001$ (0,01%)

$\epsilon_{bt,1} = 0,00008$ (0,008%)

$\epsilon_{bt,2} = 0,00015$ (0,015%)

Созданная мною программа позволяет рассчитывать железобетонные элементы по деформационной модели, как в одной, так и в двух плоскостях.

Алгоритм выполнения расчета сводится к трем основным этапам:

Задание геометрии сечения, а также его разбиение на «элементарные» участки в программе Autodesk AutoCAD.

Импорт сечения в MS Office Excel, а также ввод таких исходных данных, как характеристики материалов, характер действия нагрузки, тип деформационных диаграмм и т.д.

Непосредственно выполнения расчета, а также, при желании, экспорт в Autodesk AutoCAD графического отображения расчетов.

Обзор созданной программы

12

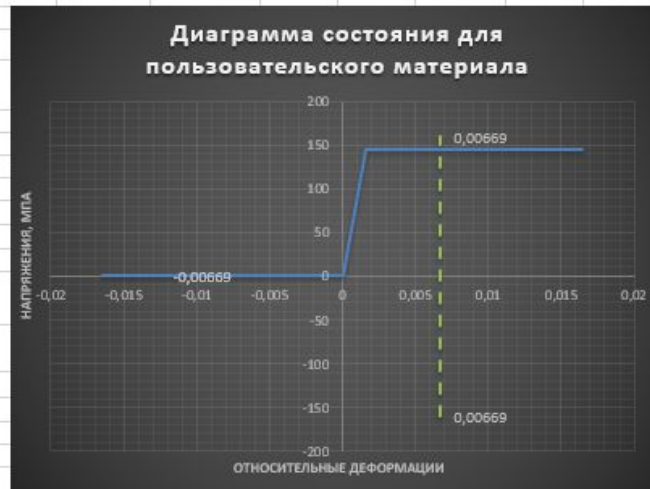
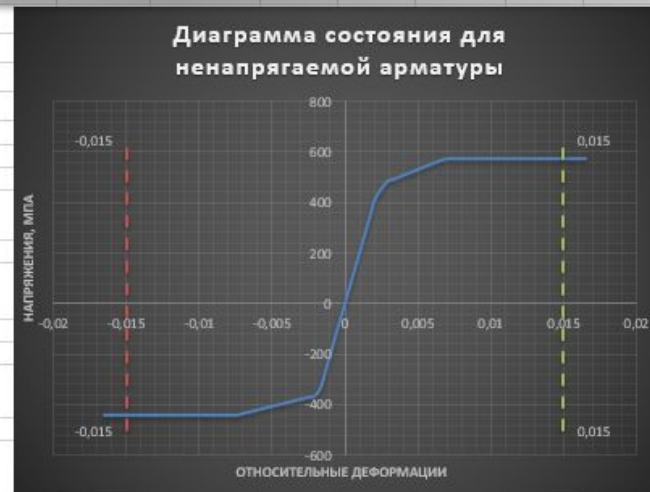
Примеры окон ввода/вывода данных

Информация о расчете					Информация о косвенном армировании				
Характеристики материалов		Расчетные			Учет косвенного армирования		Нет		
Точность расчета (% кН (кН×м))		0,10% 0,10			Класс арматуры сеток косвенного армирования		A400		
Учитывать сопротивление растяжению бетона		Нет			Расчетное сопротивление арматуры сеток косвенного армирования $R_{s,xy}$		350		
Максимальное количество итераций		750			МПа [табл. 6.13, 6.14]				
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения		Нет							
Информация о бетоне					Информация о косвенном армировании				
Класс тяжелого бетона		B40			Косвенное армирование в направлении X		число стержней n_x	5	
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %		40 - 75					площадь сечения стержня, A_{sx} , см ²	0,785	
Действие нагрузки		Непродолжительное					длина стержня сетки l_{sx} , см	55,0	
Произведение коэффициентов условий работы γ_{bi} [п. 6.1.12]		0,90			Косвенное армирование в направлении Y		число стержней n_y	5	
Произведение коэффициентов условий работы γ_{bti} [п. 6.1.12]		0,90					площадь сечения стержня, A_{sy} , см ²	0,785	
Диаграмма состояния бетона		Двухлинейная					длина стержня сетки l_{sy} , см	55,0	
Начальный модуль упругости бетона, E_b, E_{bt} , МПа [табл. 6.11]		3,60E+04			Площадь, заключенная внутри контура сеток косвенного армирования A_{ef} , считая по их крайним стержням, см ²		3600		
Модуль деформации бетона, E_{bt}, E_{bti} , МПа [табл. 6.11]		3,60E+04			Шаг сеток косвенного армирования s , см		10		
Расчетное сопротивление осевому сжатию R_b , МПа [табл. 6.7, 6.8]		19,8			Коэффициент косвенного армирования $\mu_{s,xy}$ [(K.10)]		0,0120		
Расчетное сопротивление осевому растяжению R_{bt} , МПа [табл. 6.7, 6.8]		1,26			Коэффициент α_{red} [(K.12)]		0,1312		
					Коэффициент φ [(K.11)]		2,7687		
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]		Величина ϵ_{b1}	0,00033		Информация о ненапрягаемой арматуре				
		Величина $\epsilon_{bt1,red}$	0,00150		Класс продольной ненапрягаемой арматуры		A600		
		Величина ϵ_{b0}	0,00200		Произведение коэффициентов условий работы γ_{si}		1,00		
		Величина ϵ_{b2}	0,00350		Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)		
Растяжение [п 6.1.14]		Величина ϵ_{bt1}	0,00002		Расчетное сопротивление арматуры растяжению R_p , МПа [табл. 6.13, 6.14]		400		
		Величина $\epsilon_{bt1,red}$	0,00008		Расчетное сопротивление арматуры сжатию R_{sc} , МПа [табл. 6.13, 6.14]		2,00E+05		
		Величина ϵ_{bt0}	0,00010		Модуль упругости арматуры, E_p , МПа [п. 6.2.12]		0,0046		
		Величина ϵ_{hp2}	0,00015		Величина ϵ_{s0} [п. 6.2.11]		0,015		
					Величина ϵ_{s2} [п. 6.2.14, п. 6.2.15]				
Учет продольного изгиба и случайного эксцентриситета					Информация о напрягаемой арматуре				
Конструкция статически неопределимая		Да			Класс продольной напрягаемой арматуры		A600		
Расчетная длина элемента [п. 8.1.17]		в плоскости момента M_{xy} , l_{0xy} , м	8,00		Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения γ_{sp} (растяж/сжатие)		0,9 1,1		
		в плоскости момента M_{yy} , l_{0yy} , м	8,00		Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)		
Случайный эксцентриситет [п. 7.1.7]		в плоскости момента M_{xy} , e_{ax} , см	1,00		Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь σ_{sp} , МПа		346,0		
		в плоскости момента M_{yy} , e_{ay} , см	1,00		Расчетное сопротивление арматуры растяжению R_p , МПа [табл. 6.13, 6.14]		520		
Доля длительности нагрузки (отношение моментов внешних сил от действия постоянных и длительных нагрузок к моментам от действия всех нагрузок)		1,00			Расчетное сопротивление арматуры сжатию R_{sc} , МПа [табл. 6.13, 6.14]		400		
Информация об усилиях в сечении элемента					Модуль упругости арматуры, E_p , МПа [п. 6.2.12]		2,00E+05		
Нагрузки	Заданные	С учетом прогиба, e , и преднапряжения	Полученные	Разница	Величина ϵ_{s0} [п. 6.2.11]		0,0046		
Нормальная сила, N, кН	-110,0	-1006,4	-1006,8	-0,05%	Величина ϵ_{s2} [п. 6.2.14, п. 6.2.15]		0,015		
Изгибающий момент M_{xy} , кНм	0,0	1,3	1,3	0,03%					
Изгибающий момент M_y , кНм	-330,0	-387,0	-389,9	-0,76%					

Дополнительные элементы управления

	Результаты расчета													
	Визуальные	Численные												
	<table border="1"> <tr> <td>1 МПа</td> <td>=</td> <td>-15</td> </tr> <tr> <td>Множитель "столбиков" деформаций</td> <td></td> <td>1,0E+05</td> </tr> </table>	1 МПа	=	-15	Множитель "столбиков" деформаций		1,0E+05	<table border="1"> <tr> <td>Размер текста для бетона и польз. мат.</td> <td>10,0</td> </tr> <tr> <td>Размер текста для арматуры и точек</td> <td>10,0</td> </tr> <tr> <td>Множитель отн. деформаций</td> <td>1,0,E+04</td> </tr> </table>	Размер текста для бетона и польз. мат.	10,0	Размер текста для арматуры и точек	10,0	Множитель отн. деформаций	1,0,E+04
1 МПа	=	-15												
Множитель "столбиков" деформаций		1,0E+05												
Размер текста для бетона и польз. мат.	10,0													
Размер текста для арматуры и точек	10,0													
Множитель отн. деформаций	1,0,E+04													
<u>Получение геометрии и расчет</u>														
Получить геометрию из AutoCAD	Отобразить сжатую зону	Отобразить напряжения в арматуре, МПа												
Выполнить расчет	Отобразить сжатые элементы с отн. деф. больше предельной	Отобразить напряжения в бетоне, МПа												
	Отобразить растянутые элементы с отн.	Отобразить напряжения в пользовательском материале, МПа												
	Отобразить "столбики" напряжений в бетоне	Отобразить напряжения в точках, МПа												
	Отобразить "столбики" напряжений в пользовательском материале	Отобразить относительные деформации в элементах												
	Отобразить "столбики" отн. деформаций	Отобразить относительные деформации в точках												
	Очистить чертеж	Отобразить усилия в арматуре, кН												
		Отобразить усилия в пользовательском материале, кН												

Диаграммы состояния материалов

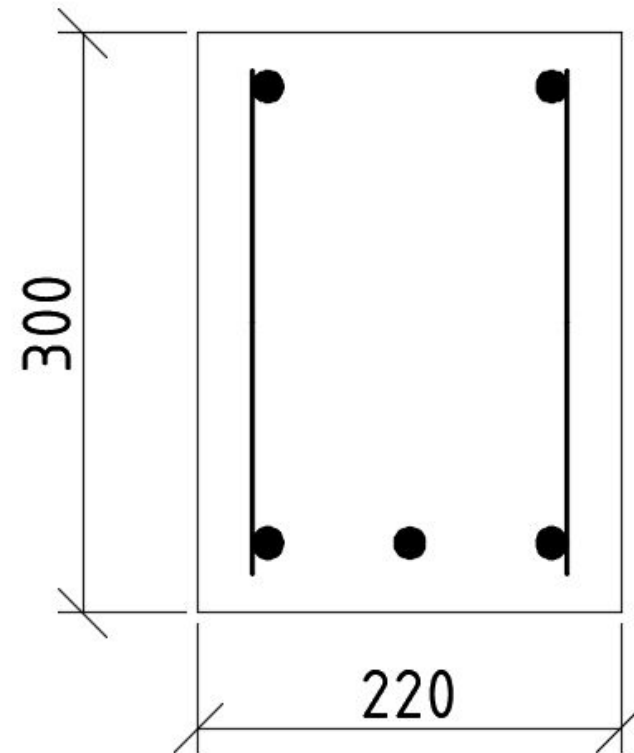
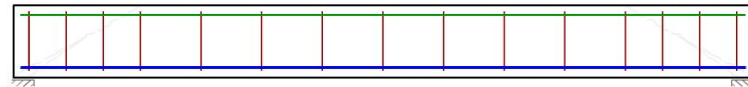


Исходные данные:

-прямоугольная балка 30x22x300

-Класс арматуры А500

-Класс бетона В25.



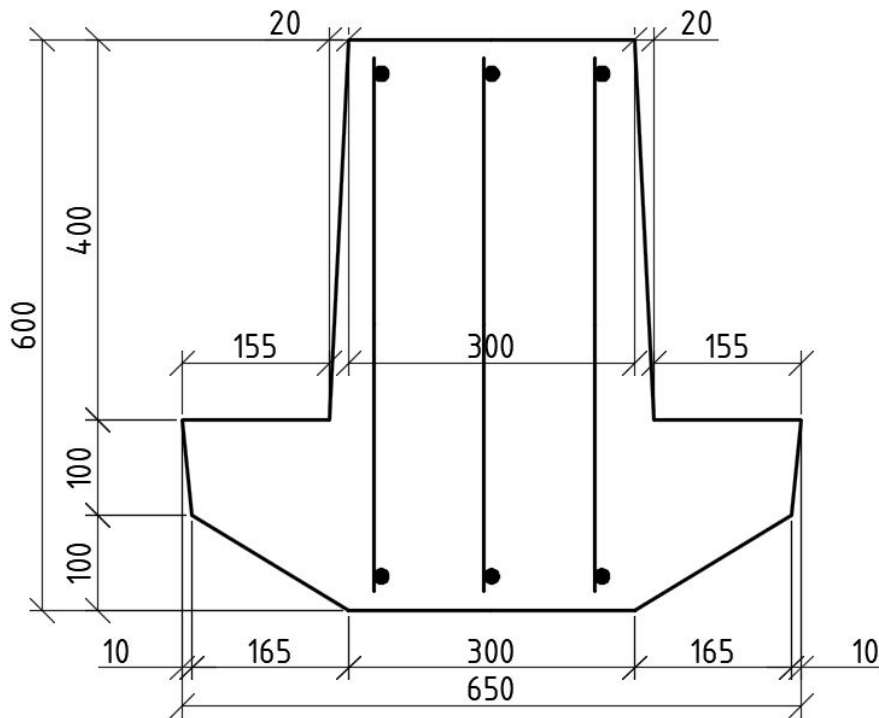
Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	35,8	35,87	36,19	36,44	36,59	37,02
На момент трещинообразования (кН*м)	21,5	21,52	21,89	22,08	22,45	22,75

Исходные данные:

-ригель таврового сечения пролет 5,1м.

-Класс арматуры А400

-Класс бетона В20.

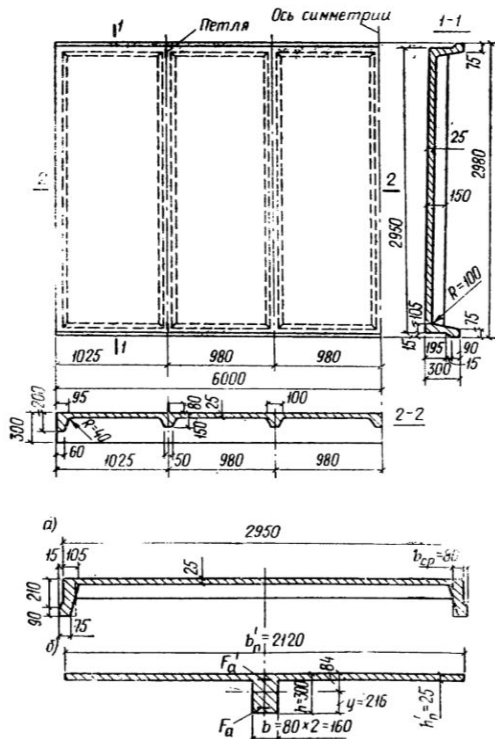


№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка $q_{н,к}$ кН/м ²	γ_f	Расчетная нагрузка q кН/м ²
I	Постоянная нагрузка			
1	Железобетонные плиты	18,0	1,1	19,8
2	Пол и перегородки	15,0	1,1	16,5
3	Собственный вес ригеля	5,0	1,1	6,6
	Итого	38,0	-	42,9
II	Временная нагрузка			
1	Кратковременная	66,69	1,2	80,03
2	Длительная	35,75	1,2	42,9
	Всего	102,44	-	122,93

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	211,32	212,02	215,20	216,47	219,23	220,93
На момент трещинообразования (кН*м)	124,81	124,92	127,54	128,92	131,42	136,04

Исходные данные:

- ребристая панель 3х6 м.
- Класс напрягаемой арматуры А800
- Класс бетона В30.

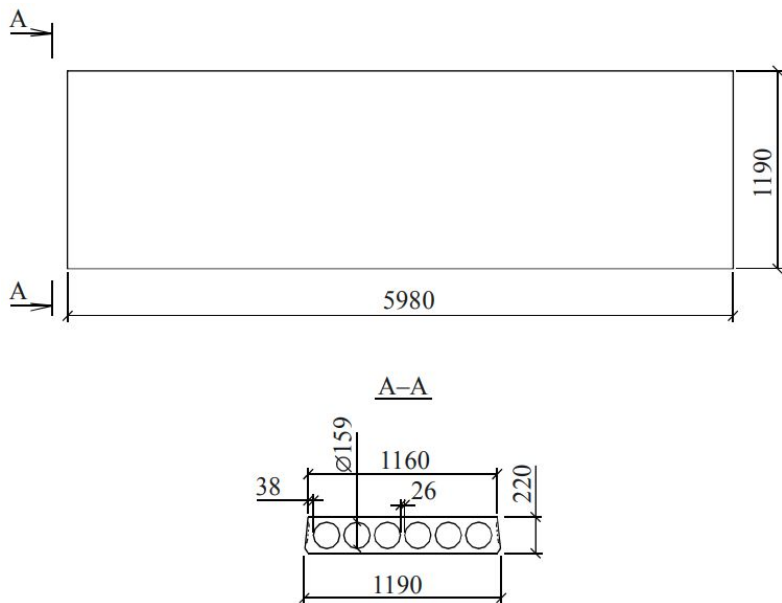


№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка q , кН/м ²	γ_f	Расчетная нагрузка q , кН/м ²
I	Постоянная нагрузка			
1	Трехслойный рубероид	0,15	1,2	0,18
2	Цементная стяжка	0,4	1,3	0,52
3	Утеплитель	0,6	1,2	0,72
4	Пароизоляция	0,1	1,2	0,12
5	Ребристые панели	1,35	1,1	1,485
	Итого	2,6	-	3,025
II	Временная нагрузка			
1	Кратковременная	0,3	1,4	0,42
2	Длительная	0,7	1,4	0,98
	Всего	3,6	-	4,425

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограниченным из СП 63.13330.201 2	По нормативным коэффициентам			Без ограничений
			+10%	+20%	+50%	
По нормальному сечению (кН*м)	62,04	62,09	62,59	63,27	63,58	63,64
На момент трещинообразования (кН*м)	37,6	37,63	38,31	38,65	38,95	39,44

Исходные данные:

- Размеры плиты 1,2х6 м.
- Класс напрягаемой арматуры А600
- Класс бетона В15.

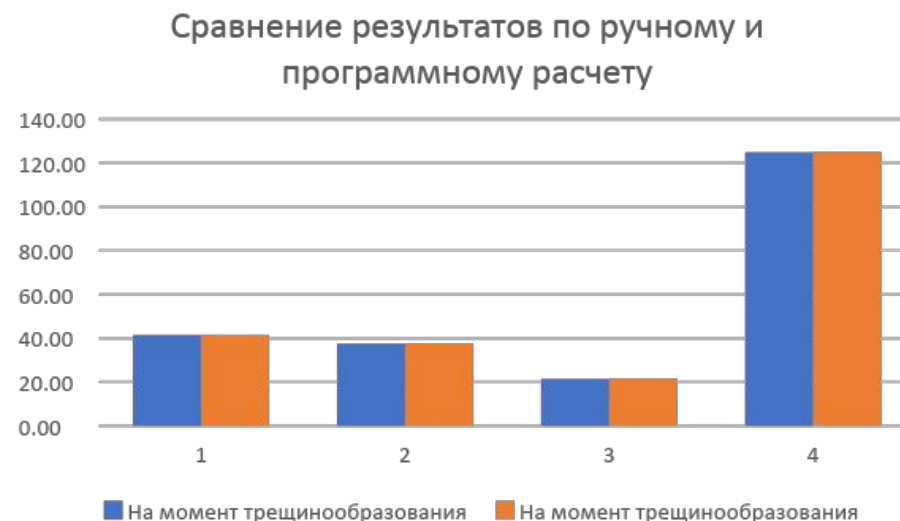


№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка q_n , кН/м ²	γ_f	Нормативная нагрузка q , кН/м ²
I	Постоянная нагрузка			
1	Трехслойный рубероид	0,15	-	0,711
2	Цементная стяжка	3	1,1	3,3
	Итого	3,578	-	4,011
II	Временная нагрузка	8	1,2	9,6
1	Кратковременная	2,667	1,2	3,2
2	Длительная	5,333	1,2	6,4
	Всего	11,578	-	13,611

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.201 2	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	70,60	70,71	71,49	71,91	72,34	73,18
На момент трещинообразования (кН*м)	41,45	41,43	42,05	42,47	43,08	43,67

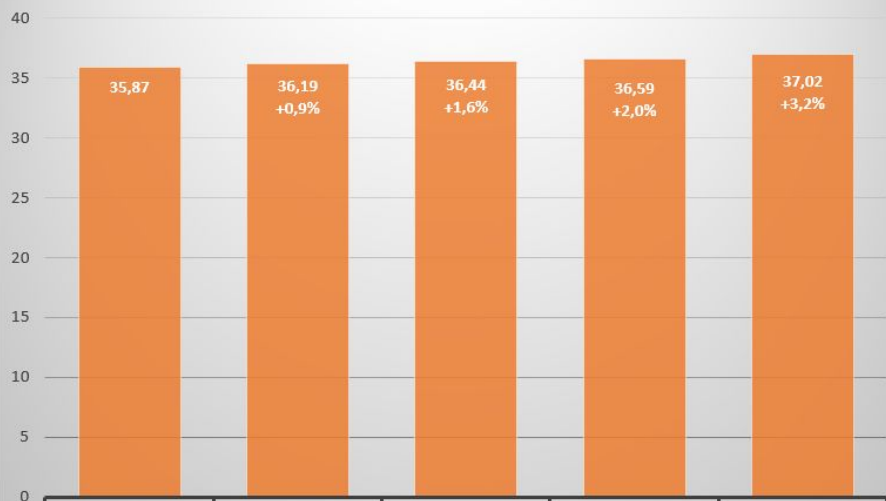
Проведенные расчеты показали, что разница в результатах, полученных при ручном расчете и расчете по деформационной модели с использованием программы по ограничениям диаграмм из СП 63.13330.2012, совершенно незначительна и не составляет более 0,33%.

Номер расчета	По нормальному сечению		На момент трещинообразования	
	ручной расчет	расчет по программе	ручной расчет	расчет по программе
1	70,60	70,71	41,45	41,43
2	62,04	62,09	37,60	37,63
3	35,80	35,87	21,50	21,52
4	211,32	212,02	124,81	124,92



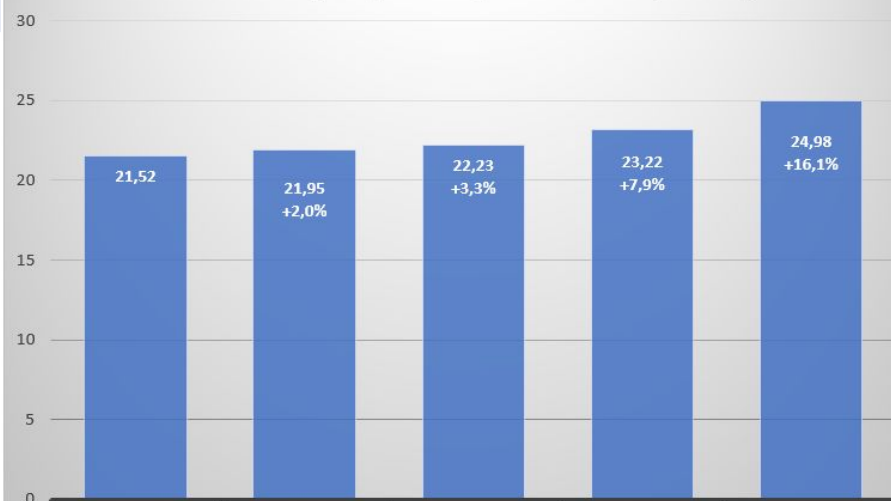
Наименование расчёта	По ограничениям из СП 63.13330.2 012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	35,87	36,19 (+0,9%)	36,44 (+1,6%)	36,59 (+2,0%)	37,02 (+3,2%)
На момент трещинообразования	21,52	21,95	22,23	23,22	24,98

По нормальному сечению (кН*м)



ПО ОГРАНИЧЕНИЯМ ИЗ СП 63.13330.2012 10% 20% 50% БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ

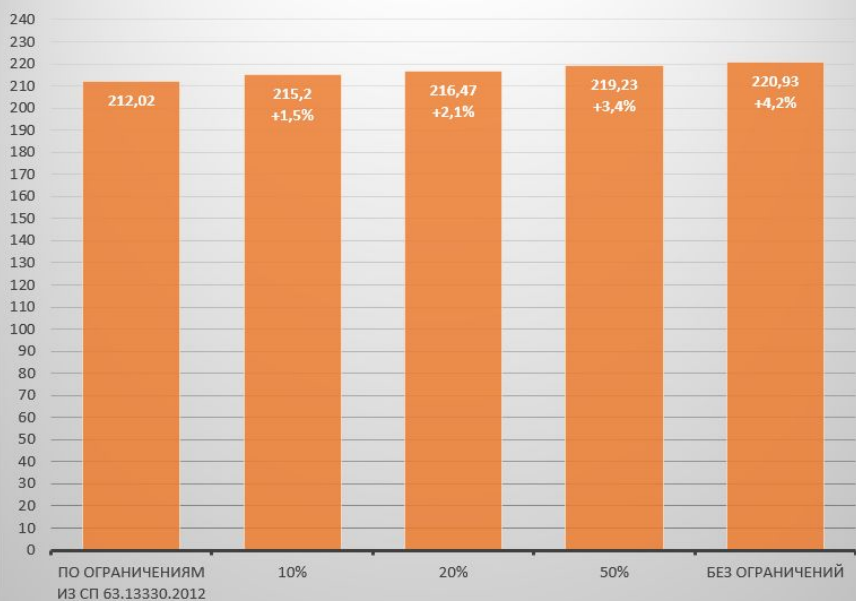
На момент трещинообразования (кН*м)



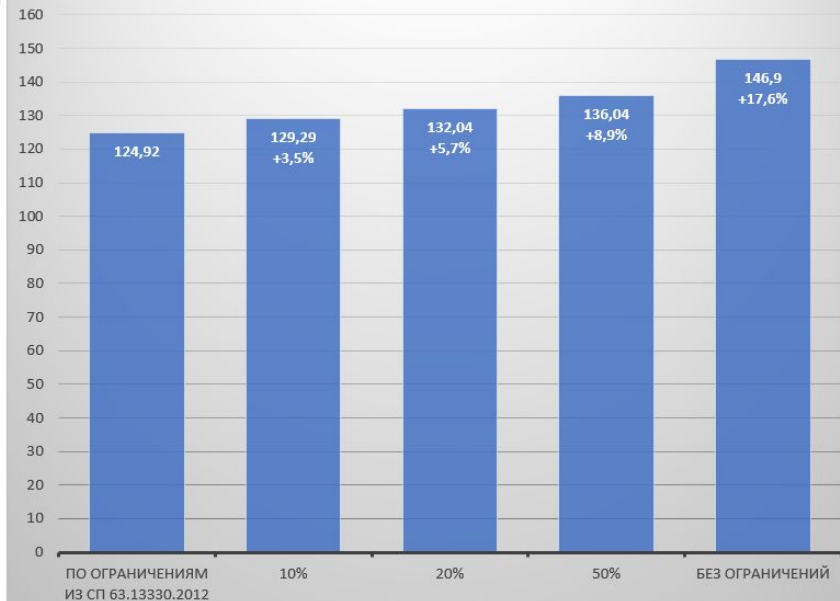
ПО ОГРАНИЧЕНИЯМ ИЗ СП 63.13330.2012 10% 20% 50% БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	212,02	215,20 (+1,5%)	216,47 (+2,1%)	219,23 (+3,4%)	220,93 (+4,2%)
На момент трещинообразования	124,92	129,29 (+3,5%)	132,04 (+5,7%)	136,04 (+8,9%)	146,9 (+17,6%)

По нормальному сечению (кН*м)



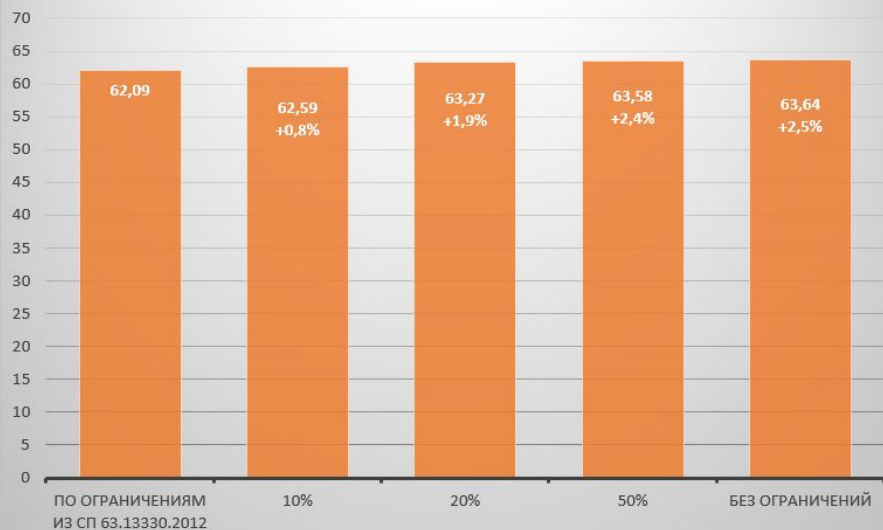
На момент трещинообразования (кН*м)



Расчёт железобетонной ребристой плиты

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	62,09	62,59 (+0,8%)	63,27 (+1,9%)	63,58 (+2,4%)	63,64 (+2,5%)
На момент трещинообра	37,63	38,53	38,98	40,72	44,58

По нормальному сечению (кН*м)

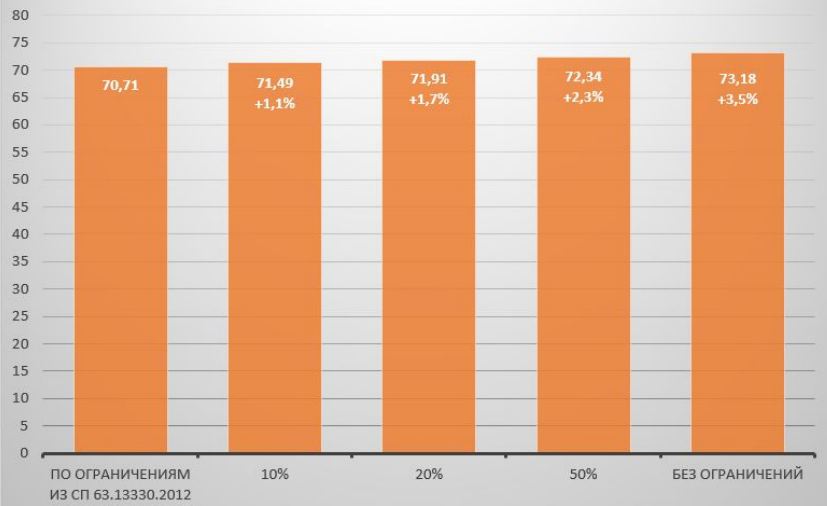


На момент трещинообразования (кН*м)

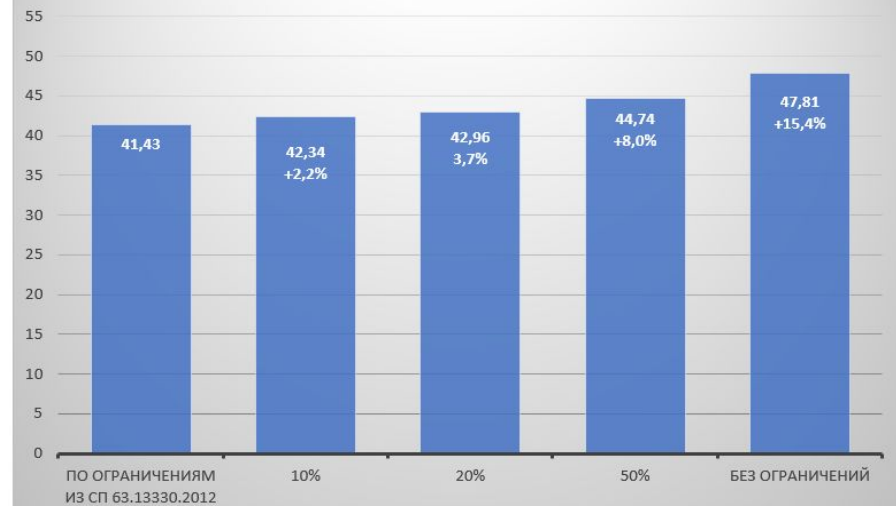


Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	10%	20%	50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	70,71	71,49	71,91	72,34	73,18
		(+1,1%)	(+1,7%)	(+2,3%)	(+3,5%)
На момент трещинообразования (кН*м)	41,43	42,34	42,96	44,74	47,81
		(+2,2%)	(+3,7%)	(+8,0%)	(+15,4%)

По нормальному сечению (кН*м)



На момент трещинообразования (кН*м)



Анализ полученных результатов показал, что при расчете по нормальному сечению средняя разница при полном снятии ограничений с диаграммы деформирования составила 3,35%, а максимальная разница достигала 4,2%. При расчете же на момент трещиностойкости средняя разница при полном снятии ограничений с диаграммы деформирования составила 16,2%, а максимальная разница достигала 17,6%.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что изменение ограничений границ диаграмм деформирования при расчете железобетонных конструкций влечет за собой получение результатов несущей способности и трещиностойкости, отличающихся от результатов ручного расчета и расчета по ограничениям из СП 63.13330.2012, причем результаты расчета по трещиностойкости достигают значительных различий.

**Доклад окончен.
Спасибо за внимание.**