УДК 624.072.221

© Э. К. Опбул, канд. техн. наук, зав. лабораторией

© Фан Ван Фук, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: fduecnufce@mail.ru, phucprodhv@gmail.com

© Д. А. Дмитриев, инженер

(ООО «ТЕКТОН-СПБ»)

E-mail: dmitriev@tekton-spb.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-58-67

© Eh. K. Opbul, PhD in Sci. Tech., Laboratory Head

© Phan Van Phuc, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: fduecnufce@mail.ru, phucprodhv@gmail.com

© D. A. Dmitriev, engineer

(ООО «ТЕКТОН-СПБ»)

E-mail: dmitriev@tekton-spb.ru

ПРАКТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ ТИПОВОГО РИГЕЛЯ РГД 4.56-90

PRACTICAL CALCULATION OF BENT ELEMENTS USING THE NONLINEAR DEFORMATION MODEL ON THE EXAMPLE OF THE STANDARD RGD CROSSBAR 4.56-90

Рассмотрен практический расчет прочности изгибаемых элементов, выполненный на основе нелинейной деформационной модели с учетом опытных диаграмм деформирования материалов. В предлагаемом расчете относительные деформации определяются в зависимости от максимальной кривизны элемента. Расчет максимальной кривизны элемента выполнен двумя итерационными методами. Приведены основные расчетные формулы, оригинальные блок-схемы методов и сравнение расчетных параметров по результатам практических расчетов, выполненных на примере типового ригеля.

Ключевые слова: деформационная модель, нелинейный расчет, диаграмма деформирования, итерация, матрица жесткости, эпюра, деформации, напряжения, нейтральная линия, прогиб, жесткость, бетон, арматура.

The article is devoted to the practical calculation of the bent elements strength made on the basis of a nonlinear deformation model, taking into account the experimental deformation diagrams of materials. In the proposed calculation, the relative deformations are determined according to the maximum curvature of the element. The maximum curvature of the element is calculated by two iterative methods. Basic calculation formulas, original block diagrams of the methods and a comparison analysis of the calculated parameters based on the results of practical calculations performed on the example of a standard crossbar are presented.

Keywords: deformation model, nonlinear calculation, deformation diagram, iteration, stiffness matrix, diagram, deformations, stresses, neutral line, deflection, stiffness, concrete, reinforcement.

Введение

Расчет строительных конструкций с использованием нелинейной деформационной модели (НДМ) относится к проверочно-контрольным или же тестирующим методам. При этом расчет по НДМ выполняется при известных значениях усилия (внешнего или внутреннего), армирования (бетона) и геометрических размеров элемента.

Представлены два способа итерационных вычислений. Цель итерационного процесса — определение максимальной кривизны элемента,

и в зависимости от этой кривизны нахождение относительных деформаций в контролируемых точках сечения.

Искомая кривизна в первом методе определяется с нахождением нового положения нейтральной линии, а во втором — в зависимости от матрицы жесткостных характеристик каждого малого участка.

Первый итерационный метод расчета применительно для сталефибробетонных конструкций описывался в работах [1, 2].

Ниже приводится второй способ нелинейного расчета¹ с учетом п. 8.1.20–8.1.29, 3.72–3.75, приведенных в нормах^{2,3,4}.

1. Диаграммы деформирования материалов

Рассматривается типовой ригель РГД 4.56-90: бетон В40, арматура А400. Расчетные формулы для определения напряжений и модулей деформаций получены из норм^{5,6,7}, результаты расчетов по ним представлены на рис. 1, 2. Геометрические размеры и армирование ригеля см. рис. 5.

Предпосылки и допущения: справедлива гипотеза плоских сечений; при определении центра тяжести приведенного поперечного сечения ригеля и для первого итерационного расчета материал ригеля работает в упругой стадии (трещин нет, модули малых участков равны начальному модулю упругости).

А. Расчетные формулы напряжений и модулей для бетона класса В40.

При сжатии бетона:

- $0 < \varepsilon_{bi} < 150 \cdot 10^{-5}$: $\sigma_{bi} = R_b \frac{\varepsilon_{bi}}{150 \cdot 10^{-5}}$ МПа;

$$E'_{bi} = \text{const} = \frac{R_b}{150 \cdot 10^{-5}} = 14\,666,7 \text{ МПа.}$$

- $150 \cdot 10^{-5} < \varepsilon_{bi} < 350 \cdot 10^{-5}$: $\sigma_{bi} = R_b = 22 \text{ МПа}$;

$$E'_{bi} = \frac{R_b}{\varepsilon_{bi}} = \frac{22}{\varepsilon_{bi}} \text{ МПа.}$$

При растяжении бетона:

- $0 < \varepsilon_{bti} < 8 \cdot 10^{-5}$: $\sigma_{bti} = R_{bt} \frac{\varepsilon_{bti}}{8 \cdot 10^{-5}}$;

$$E'_{bti} = \frac{R_{bt}}{8 \cdot 10^{-5}} = \frac{1,4}{8 \cdot 10^{-5}} = 17\,500 \text{ МПа;}$$

- $8 \cdot 10^{-5} < \varepsilon_{bti} < 15 \cdot 10^{-5}$: $\sigma_{bti} = R_{bt} = 1,4 \text{ МПа}$;

$$E'_{bti} = \frac{1,4}{\varepsilon_{bti}} \text{ МПа.}$$

¹ В целях сокращения объема статьи приводятся только первые три и последняя (одиннадцатая) итерации расчетов.

² СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., 2004.

³ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменениями № 1, 2). М.: Минстрой России, 2013.

⁴ Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения (к СП 52-101-2003). М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 166 с.

⁵ СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., 2004.

⁶ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменениями № 1, 2). М.: Минстрой России, 2013.

⁷ Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения (к СП 52-101-2003). М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 166 с.

Рис. 1. Диаграмма состояния бетона

Рис. 2. Диаграмма состояния арматуры

Б. Расчетные формулы напряжений и модулей для арматуры при растяжении и сжатии:

- $0 < \varepsilon_{si} < 1,775 \cdot 10^{-3}$:

$$\sigma_{si} = R_s \frac{\varepsilon_{si}}{\varepsilon_{s1}} = 355 \frac{\varepsilon_{si}}{1,775 \cdot 10^{-3}} \text{ МПа,}$$

$$\text{где } \varepsilon_{s1} = \frac{R_s}{E_s} = \frac{355}{2 \cdot 10^5} = 1,775 \cdot 10^{-3}; E'_s = E_s;$$

- $1,775 \cdot 10^{-3} < \varepsilon_{si} < 25 \cdot 10^{-3}$: $\sigma_{si} = R_s = 355 \text{ МПа}$,

$$E'_s = \frac{R_s}{\varepsilon_{si}} = \frac{355}{\varepsilon_{si}} \text{ МПа.}$$

2. Основные расчетные формулы и блок-схема первого метода

Ниже приведены общеизвестные расчетные формулы^{8,9} [4–8].

⁸ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменениями № 1, 2). М.: Минстрой России, 2013.

⁹ Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения (к СП 52-101-2003). М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 166 с.

$$\begin{cases} D_{11} = \sum_i E'_{bi} A_{bi} (y'_{bi})^2 + \sum_i E'_{si} A_{si} (y'_{si})^2 \\ D_{13} = D_{31} = \sum_i E'_{bi} A_{bi} y'_{bi} + \sum_i E'_{si} A_{si} y'_{si} \\ D_{33} = \sum_i E'_{bi} A_{bi} + \sum_i E'_{si} A_{si} \end{cases} \quad (10)$$

Б. Далее вычисляются определитель ($\det A$) матрицы вида $A = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{13} \\ D_{31} & D_{33} \end{bmatrix}$, откуда

$$\det A = D_{11} \cdot D_{33} - D_{31} \cdot D_{13} \quad (11)$$

Обратная матрица

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \times A^*, \quad (12)$$

где $A^* = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ — матрица алгебраических дополнений, которые равны

$$\begin{cases} A_{11} = (-1)^{1+1} \times D_{33} = D_{33} \\ A_{12} = (-1)^{1+2} \times D_{31} = -D_{31} \\ A_{21} = (-1)^{2+1} \times D_{13} = -D_{13} \\ A_{22} = (-1)^{2+2} \times D_{11} = D_{11} \end{cases} \quad (13)$$

В. Вычисляется произведение матриц в виде

$$A^{-1} \times \begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $x_1 = \frac{1}{\rho_j}$; $x_2 = \varepsilon_0$. (15)

Г. По формулам (8.29), (8.30)¹⁵ с учетом формул (15) определяются относительные деформации в бетоне и арматуре

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bi} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{\rho_j} y'_{bi}; \\ \varepsilon_{si} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{\rho_j} y'_{si}. \end{aligned} \quad (16)$$

Д. Условие прочности:

- по деформациям — см. формулу (8);
- по усилиям согласно формуле (3.144)¹⁶:

$$M_{calc} = \sum \sigma_{bi} A_{bi} y_{bi} + \sum \sigma_{si} A_{si} y_{si} \geq M_{ult}. \quad (17)$$

На рис. 4 представлена оригинальная блок-схема второго итерационного метода.

Рис. 4. Блок-схема второго метода

4. Определение несущей способности ригеля

Исходные данные:

Класс бетона В40: $R_b = 22$ МПа, $R_{bt} = 1,4$ МПа, $E_b = 36\,000$ МПа.

Продольная арматура класса А-III:

$R_s = 355$ МПа, $R_{sc} = 355$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Поперечное сечение 570×450 мм, длина ригеля 5400 мм (рис. 5).

Высота сжатой зоны

$$x = \frac{R_s (A_{s1} + A_{s2} - A_{s3})}{R_b b} = \frac{355(3685 + 314 - 402)}{22 \cdot 310} = 187 \text{ мм.}$$

Положение центра тяжести сжатой зоны

$$y_x = \frac{b \frac{x^2}{2} + \alpha \cdot A_{s3} \cdot a'_s}{b \cdot x + \alpha \cdot A_s} = \frac{310 \frac{187^2}{2} + 5,26 \cdot 402 \cdot 38}{310 \cdot 187 + 5,26 \cdot 402} = 92 \text{ мм.}$$

Расчетная несущая способность

$$\begin{aligned} M_{ult} &= R_s [A_{s1} (h_0 - y_x) + A_{s2} (h_0 - y_x - 141)] = \\ &= 355 [3685 \cdot (406 - 92) + 314 (406 - 92 - 141)] = \\ &= 430 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм.} \end{aligned}$$

¹⁵ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменениями № 1, 2). М.: Минстрой России, 2013.

¹⁶ Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения (к СП 52-101-2003). М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2005. 166 с.

Рис. 5. Поперечное сечение ригеля

5. Разбивка поперечного сечения на малые участки и нахождение центра тяжести каждого участка

Для расчета поперечное сечение элемента произвольно разбиваем на малые участки (рис. 6). Для нашего примера имеем 13 малых участков. Нумерация участков начинается с нижней растянутой зоны сечения.

В табл. 1 приведены расчетные параметры этих малых участков (обозначения: i — порядковый номер малого участка; $\Delta_{bi}, y_{bi}, b_{bi}, A_{bi}$ — соответственно высота, расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести, ширина и площадь i -го малого участка бетона; $E'_{bi} = 0,85E_b$ — модуль деформации бетона; $y_{si}, A_{si}, E_{si} = E_s$ — соответственно расстояние от крайнего волокна нижней растянутой зоны до центра тяжести, площадь и модуль упругости i -й арматуры; $y_{0j} = y_{01} = 180$ мм — положение нейтральной линии при первой итерации).

Рис. 6. Разбивка поперечного сечения

Таблица 1

Расчетные параметры малых участков

i	Δ_{bi} см	y_{bi} см	b_{bi} см	A_{bi} см ²	E'_{bi} МПа	y_{si} см	A_{si} см ²	E'_{si} МПа	y_{0j} см
1	3	1,5	57	171	3,06E+04				18,01
2	2,8	4,4	57	122,8	3,06E+04	4,4	36,8	2,E+05	
3	4,5	8,05	57	256,5	3,06E+04				
4	4,5	12,55	57	256,5	3,06E+04				
5	3,2	16,4	57	182,4	3,06E+04				
6	1	18,5	57	53,86	3,06E+04	18,5	3,14	2,E+05	
7	3	20,5	57	171	3,06E+04				
8	4,5	24,25	31	139,5	3,06E+04				
9	4,5	28,75	31	139,5	3,06E+04				
10	4,5	33,25	31	139,5	3,06E+04				
11	4,9	37,95	31	151,9	3,06E+04				
12	1,6	41,2	31	45,58	3,06E+04	41,2	4,02	2,E+05	
13	3	43,5	31	93	3,06E+04				

В табл. 2–9 и на рис. 7–14 приводятся результаты итерационных расчетов по первому и второму методам.

6. Пример расчета по первому итерационному методу

Таким образом, суммарный предельный момент по полученным расчетным данным, приведенным в табл. 5:

$$M_{calc} = \sum \sigma_{bi} A_{bi} y_{bi}' + \sum \sigma_{si} A_{si} y_{si}' = 424,459 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Высота сжатой зоны

$$x = h - y_{011} = 45 - 21,09 = 24,91 \text{ см}.$$

7. Пример расчета по второму итерационному методу

Относительные деформации определяются в зависимости от жесткостных характеристик каждого малого участка. Определение высоты сжатой зоны и графическое представление НДС сечения при каждой итерации выполнены в зависимости от вычисленных значений напряжений и деформаций с соблюдением масштаба.

Высота сжатой зоны по принципу «подобия треугольников» определяется по формуле

$$x_j = \frac{h}{\frac{\varepsilon_1}{|\varepsilon_{13}|} + 1}.$$

Таким образом, суммарный предельный момент по полученным расчетным данным, приведенным в табл. 9:

$$M_{calc} = \sum \sigma_{bi} A_{bi} y_{bi}' + \sum \sigma_{si} A_{si} y_{si}' = 427,795 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}, \text{ или } 427,795 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Таблица 2

Первая итерация первого метода

i	A_{bl} см ²	E'_{bl} МПа	A_{sl} см ²	E'_{sl} МПа	y_{oj} см	y'_{bl} см	y'_{sl} см	$\frac{1}{\eta}$ см ⁻¹	ε_{bl}	σ_{bl} МПа	ε_{sl}	σ_{sl} МПа
1	171	3,06E+04				16,51			6,41E-04	0,00		
2	122,8	3,06E+04	36,8	2,E+05		13,61	13,61		5,29E-04	0,00	5,29E-04	105,7
3	256,5	3,06E+04				9,96			3,87E-04	0,00		
4	256,5	3,06E+04				5,46			2,12E-04	0,00		
5	182,4	3,06E+04				1,61			6,26E-05	1,10		
6	53,86	3,06E+04	3,14	2,E+05		-0,49	-0,49		-1,89E-05	-0,28	-1,89E-05	-3,7846
7	171	3,06E+04				-2,49			-9,66E-05	-1,42		
8	139,5	3,06E+04				-6,24			-2,42E-04	-3,55		
9	139,5	3,06E+04				-10,74			-4,17E-04	-6,11		
10	139,5	3,06E+04				-15,24			-5,92E-04	-8,68		
11	151,9	3,06E+04				-19,94			-7,74E-04	-11,35		
12	45,58	3,06E+04	4,02	2,E+05		-23,19	-23,19		-9,00E-04	-13,20	-9,00E-04	-180,05
13	93	3,06E+04				-25,49			-9,90E-04	-14,51		

Таблица 3

Вторая итерация первого метода

i	A_{bl} см ²	E'_{bl} МПа	A_{sl} см ²	E'_{sl} МПа	y_{oj} см	y'_{bl} см	y'_{sl} см	$\frac{1}{\eta}$ см ⁻¹	ε_{bl}	σ_{bl} МПа	ε_{sl}	σ_{sl} МПа
1	171	0,00E+00				19,66			1,88E-03	0,00		
2	122,8	0,00E+00	36,8	2,E+05		16,76	16,76		1,61E-03	0,00	1,61E-03	321,2
3	256,5	0,00E+00				13,11			1,26E-03	0,00		
4	256,5	0,00E+00				8,61			8,25E-04	0,00		
5	182,4	1,75E+04				4,76			4,56E-04	0,00		
6	53,86	1,47E+04	3,14	2,E+05		2,66	2,66		2,55E-04	0,00	2,55E-04	50,977
7	171	1,47E+04				0,66			6,32E-05	1,11		
8	139,5	1,47E+04				-3,09			-2,96E-04	-4,34		
9	139,5	1,47E+04				-7,59			-7,27E-04	-10,67		
10	139,5	1,47E+04				-12,09			-1,16E-03	-16,99		
11	151,9	1,47E+04				-16,79			-1,61E-03	-22,00		
12	45,58	1,47E+04	4,02	2,E+05		-20,04	-20,04		-1,92E-03	-22,00	-1,92E-03	-355
13	93	1,47E+04				-22,34			-2,14E-03	-22,00

Рис. 7. Первая итерация первого метода

Рис. 8. Вторая итерация первого метода

Используя признаки подобия треугольников, через деформации определяем высоту сжатой зоны $x = \frac{h}{1,86956} = \frac{45}{1,86956} = 24,06$ см.

Сравнение результатов, полученных разными методами, приведено в табл. 10.

Вывод. Результаты, представленные в табл. 10, свидетельствуют о том, что полученные расчетные значения деформаций имеют незначительные отличия при расчете по первому и вто-

рому методам и удовлетворительно согласуются с данными расчета по предельным состояниям, что также подтверждает правильность разработанных методик.

Библиографический список

1. Морозов В. И., Отбул Э. К. Расчет изгибаемых сталефибробетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием

Таблица 4

Третья итерация первого метода

i	A_{bl} см ²	E'_{bl} МПа	A_{sl} см ²	E'_{sl} МПа	y_{oj} см	y'_{bl} см	y'_{sl} см	$\frac{1}{f_j}$ см ⁻¹	ε_{bl}	σ_{bl} МПа	ε_{sl}	σ_{sl} МПа
1	171	0,00E+00				19,71			2,08E-03	0,00		
2	122,8	0,00E+00	36,8	2,E+05		16,81	16,81		1,77E-03	0,00	1,77E-03	354,41
3	256,5	0,00E+00				13,16			1,39E-03	0,00		
4	256,5	0,00E+00				8,66			9,13E-04	0,00		
5	182,4	0,00E+00				4,81			5,07E-04	0,00		
6	53,86	0,00E+00	3,14	2,E+05		2,71	2,71		2,86E-04	0,00	2,86E-04	57,219
7	171	1,75E+04				0,71			7,53E-05	1,32		
8	139,5	1,47E+04				-3,04			-3,20E-04	-4,69		
9	139,5	1,47E+04				-7,54			-7,94E-04	-11,65		
10	139,5	1,47E+04				-12,04			-1,27E-03	-18,60		
11	151,9	1,37E+04				-16,74			-1,76E-03	-22,00		
12	45,58	1,15E+04	4,02	2,E+05		-19,99	-19,99		-2,11E-03	-22,00	-2,11E-03	-355
13	93	1,03E+04				-22,29			-2,35E-03	-22,00		

Таблица 5

Одиннадцатая итерация первого метода

i	A_{bl} см ²	E'_{bl} МПа	A_{sl} см ²	E'_{sl} МПа	y_{oj} см	y'_{bl} см	y'_{sl} см	$\frac{1}{f_j}$ см ⁻¹	ε_{bl}	σ_{bl} МПа	ε_{sl}	σ_{sl} МПа
1	171	0,00E+00				19,59			2,43E-03	0,00		
2	122,8	0,00E+00	36,8	2,E+05		16,69	16,69		2,07E-03	0,00	2,07E-03	355
3	256,5	0,00E+00				13,04			1,61E-03	0,00		
4	256,5	0,00E+00				8,54			1,06E-03	0,00		
5	182,4	0,00E+00				4,69			5,81E-04	0,00		
6	53,86	0,00E+00	3,14	2,E+05		2,59	2,59		3,21E-04	0,00	3,21E-04	64,175
7	171	1,75E+04				0,59			7,32E-05	1,28		
8	139,5	1,47E+04				-3,16			-3,91E-04	-5,74		
9	139,5	1,47E+04				-7,66			-9,48E-04	-13,91		
10	139,5	1,47E+04				-12,16			-1,51E-03	-22,00		
11	151,9	1,06E+04				-16,86			-2,09E-03	-22,00		
12	45,58	8,92E+03	4,02	1,E+05		-20,11	-20,11		-2,49E-03	-22,00	-2,49E-03	-355
13	93	8,01E+03				-22,41			-2,78E-03	-22,00

Рис. 9. Третья итерация первого метода

Рис. 10. Одиннадцатая итерация первого метода

опытных диаграмм деформирования сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 5 (58). С. 51–55.

2. Опбул Э. К., Дмитриев Д. А., Ведерникова А. А. Нелинейно-итерационный расчет прочности сталефибробетонных элементов с использованием опытных диаграмм деформирования материалов // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 79–91.

3. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1995. 705 с.

4. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 512 с.

5. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции. 4-е изд., перераб. М.: Стройиздат, 1985. 728 с.

Таблица 6

Первая итерация второго метода

i	Δ	y_{bi}	b_{bi}	A_{bi}	E_{bi}	y_{si}	A_{si}	E'_{si}	ε_{bi}	σ_{bi}	ε_{si}	σ_{si}
	см	см	см	см ²	МПа	см	см ²	МПа		МПа		МПа
1	3	1,5	57	171	3,06E+04				6,41E-04	0,00		
2	2,8	4,4	57	122,8	3,06E+04	4,4	36,8	2,E+05	5,29E-04	0,00	5,29E-04	105,70
3	4,5	8,05	57	256,5	3,06E+04				3,87E-04	0,00		
4	4,5	12,6	57	256,5	3,06E+04				2,12E-04	0,00		
5	3,2	16,4	57	182,4	3,06E+04				6,26E-05	1,10		
6	1	18,5	57	53,86	3,06E+04	18,5	3,14	2,E+05	-1,89E-05	-0,28	-1,89E-05	-3,78
7	3	20,5	57	171	3,06E+04				-9,66E-05	-1,42		
8	4,5	24,3	31	139,5	3,06E+04				-2,42E-04	-3,55		
9	4,5	28,8	31	139,5	3,06E+04				-4,17E-04	-6,11		
10	4,5	33,3	31	139,5	3,06E+04				-5,92E-04	-8,68		
11	4,9	38	31	151,9	3,06E+04				-7,74E-04	-11,35		
12	1,6	41,2	31	45,58	3,06E+04	41,2	4,02	2,E+05	-9,00E-04	-13,20	-9,00E-04	-180,05
13	3	43,5	31	93	3,06E+04				-9,90E-04	-14,51		

Таблица 7

Вторая итерация второго метода

i	y_{bi}	b_{bi}	A_{bi}	E_{bi}	y_{si}	A_{si}	E'_{si}	ε_{bi}	σ_{bi}	ε_{si}	σ_{si}
	см	см	см ²	МПа	см	см ²	МПа		МПа		МПа
1	1,5	57	171	0,00E+00				1,88E-03	0,00		
2	4,4	57	122,8	0,00E+00	4,4	36,8	2,E+05	1,61E-03	0,00	1,61E-03	321,20
3	8,05	57	256,5	0,00E+00				1,26E-03	0,00		
4	12,6	57	256,5	0,00E+00				8,25E-04	0,00		
5	16,4	57	182,4	1,75E+04				4,56E-04	0,00		
6	18,5	57	53,86	1,47E+04	18,5	3,14	2,E+05	2,55E-04	0,00	2,55E-04	50,98
7	20,5	57	171	1,47E+04				6,32E-05	1,11		
8	24,3	31	139,5	1,47E+04				-2,96E-04	-4,34		
9	28,8	31	139,5	1,47E+04				-7,27E-04	-10,67		
10	33,3	31	139,5	1,47E+04				-1,16E-03	-16,99		
11	38	31	151,9	1,47E+04				-1,61E-03	-22,00		
12	41,2	31	45,58	1,47E+04	41,2	4,02	2,E+05	-1,92E-03	-22,00	-1,92E-03	-355,00
13	43,5	31	93	1,47E+04				-2,14E-03	-22,00

Рис. 11. Первая итерация второго метода

Рис. 12. Вторая итерация второго метода

6. Бондаренко В. М., Римшин В. И. Примеры расчета железобетонных и каменных конструкций. М.: Высшая школа, 2006. 504 с.

7. Кувалдин А. Н., Клевцова Г. С. Примеры расчета железобетонных конструкций зданий. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1976. 288 с.

8. Мандриков А. П. Примеры расчета железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1979. 419 с.

References

1. Morozov V. I., Opbul Eh. K. Raschet izgibaemykh stalefibrozhelezobetonnykh ehlementov po nelineynoy deformatsionnoy modeli s sipol'zovaniem opytnykh diagramm deformirovaniya stalefibrobeta [Calculation of steel-fiber reinforced concrete members subjected to bending according to the nonlinear deformation model using test deformation diagrams of steel-fiber-reinforced

Таблица 8

Третья итерация второго метода

i	Y_{bt} см	b_{bt} см	A_{bt} см ²	E_{bt} МПа	Y_{st} см	A_{st} см ²	E'_{st} МПа	ε_{bt}	σ_{bt} МПа	ε_{st}	σ_{st} МПа
1	1,5	57	171	0,00E+00				2,08E-03	0,00		
2	4,4	57	122,8	0,00E+00	4,4	36,8	2,E+05	1,77E-03	0,00	1,77E-03	354,41
3	8,05	57	256,5	0,00E+00				1,39E-03	0,00		
4	12,6	57	256,5	0,00E+00				9,13E-04	0,00		
5	16,4	57	182,4	0,00E+00				5,07E-04	0,00		
6	18,5	57	53,86	0,00E+00	18,5	3,14	2,E+05	2,86E-04	0,00	2,86E-04	57,22
7	20,5	57	171	1,75E+04				7,53E-05	1,32		
8	24,3	31	139,5	1,47E+04				-3,20E-04	-4,69		
9	28,8	31	139,5	1,47E+04				-7,94E-04	-11,65		
10	33,3	31	139,5	1,47E+04				-1,27E-03	-18,60		
11	38	31	151,9	1,37E+04				-1,76E-03	-22,00		
12	41,2	31	45,58	1,15E+04	41,2	4,02	2,E+05	-2,11E-03	-22,00	-2,11E-03	-355,00
13	43,5	31	93	1,03E+04				-2,35E-03	-22,00		

Таблица 9

Одиннадцатая итерация второго метода

i	Y_{bt} см	b_{bt} см	A_{bt} см ²	E_{bt} МПа	Y_{st} см	A_{st} см ²	E'_{st} МПа	ε_{bt}	σ_{bt} МПа	ε_{st}	σ_{st} МПа
1	1,5	57	171	0,00E+00				2,40E-03	0,00		
2	4,4	57	122,8	0,00E+00	4,4	36,8	2,E+05	2,04E-03	0,00	2,04E-03	355,00
3	8,05	57	256,5	0,00E+00				1,59E-03	0,00		
4	12,6	57	256,5	0,00E+00				1,04E-03	0,00		
5	16,4	57	182,4	0,00E+00				5,70E-04	0,00		
6	18,5	57	53,86	0,00E+00	18,5	3,14	2,E+05	3,12E-04	0,00	3,12E-04	62,40
7	20,5	57	171	1,75E+04				6,66E-05	1,17		
8	24,3	31	139,5	1,47E+04				-3,94E-04	-5,77		
9	28,8	31	139,5	1,47E+04				-9,46E-04	-13,87		
10	33,3	31	139,5	1,47E+04				-1,50E-03	-21,97		
11	38	31	151,9	1,07E+04				-2,07E-03	-22,00		
12	41,2	31	45,58	8,99E+03	41,2	4,02	1,E+05	-2,47E-03	-22,00	-2,47E-03	-355,00
13	43,5	31	93	8,07E+03				-2,76E-03	-22,00

Рис. 13. Третья итерация второго метода

Рис. 14. Одиннадцатая итерация второго метода

concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 5, pp. 51–55.

2. Opubl. Eh. K., Dmitriev D. A., Vedernikova A. A. *Nelineynno-iteratsionnyy raschet prochnosti stalefibrozhelezobetonnykh ehlementov s ispol'zovaniem opytnykh diagramm deformirovaniya materialov* [Non-linear iterative calculation of durability of steel fiber reinforced concrete elements using experimental charts of material deformations]. *Vestnik grazhdanskikh*

inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers, 2017, no. 1 (60), pp. 79–91.

3. Aleksandrov A. V., Potapov V. D., Derzhavin B. P. *Soprotivlenie materialov* [Material structural resistance]. Vysshaya shkola Publ., 1995, 705 p.

4. Feodos'ev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Material structural resistance]. MGTU im. N. Eh. Bauman Publ., 1999, 512 p.

Таблица 10

Сравнение расчетных параметров

Метод расчета	Деформации	Несущая способность, кНм	Высота сжатой зоны, см
По предельным состояниям	—	430,0	18,7
Деформационный расчет 1	$\varepsilon_{bc,calc} = 2,78 \cdot 10^{-3} < [\varepsilon_{b2} = 3,5 \cdot 10^{-3}]$ $\varepsilon_{s,calc} = 0,00207 < [\varepsilon_{s2} = 0,025]$	424,5	24,91
Деформационный расчет 2	$\varepsilon_{bc,calc} = 2,76 \cdot 10^{-3} < [\varepsilon_{b2} = 3,5 \cdot 10^{-3}]$ $\varepsilon_{s,calc} = 0,00204 < [\varepsilon_{s2} = 0,025]$	427,8	24,06

5. Baykov V. N., Sigalov Eh. E. *Zhelezobetonnye konstruksii* [Reinforced concrete structures]. 4-th ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985, 728 p.

6. Bondarenko V. M., Rimshin V. I. *Primery rascheta zhelezobetonnykh i kamennykh konstruksiy* [Examples of calculation of reinforced concrete and masonry structures]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2006, 504 p.

7. Kuvaldin A. N., Klevtsova G. S. *Primery rascheta zhelezobetonnykh konstruksiy zdaniy* [Examples of calculation of reinforced concrete structures of buildings]. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976, 288 p.

8. Mandrikov A. P. *Primery rascheta zhelezobetonnykh konstruksiy* [Examples of calculation of reinforced concrete structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 419 p.