

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-31-40

^{1,*}Шевченко А.В., ²Баглаев Н.Н., ²Зеленев Е.А., ³Курбатов В.Л.¹Национальный исследовательский московский государственный строительный университет²АО «КТБ Железобетон»³Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: a.shevchenko@ktbbeton.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ПРОГИБОВ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. Целью работы является численная реализация определения остаточных прогибов железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели. Для решения уравнений в физически нелинейной постановке применен метод итераций в сочетании с Microsoft Excel и VBA. Большинство существующих инженерных методов поверочного расчета и усиления изгибаемых элементов базируется на подходах, основанных на определении интегральных жесткостных характеристик сечения по упрощенным методикам. Новую актуальность эта проблема приобретает при использовании действующих норм, когда необходимо учесть особенности нелинейного деформирования материалов, режим загрузки, предысторию работы конструкции. В статье рассмотрено применение нелинейной деформационной модели при расчете остаточных прогибов, для чего изгибаемый элемент разбивается на отдельные участки, на каждом из которых вычисляются жесткости на основе нелинейной деформационной модели. При решении систем уравнений равновесия нелинейной деформационной модели применяется метод итераций. На участках с трещинами напряжения в арматуре корректируются коэффициентом, учитывающим неравномерность их распределения в сечении с трещиной и между ними. После определения жесткостных коэффициентов в каждом сечении производится определение перемещения путем интегрирования численным методом трапеций значений на участках единичных моментов и вычисленной кривизны. Строится график «нагрузка-прогиб» и аппроксимируется квадратным полиномом с выводом аналитической зависимости для определения остаточных прогибов, а также напряжено-деформированного состояния изгибаемых элементов в целом. Приведен анализ и сравнение результатов с нормативной методикой. Численный пример показал хорошую сходимость с нормативной методикой.

Ключевые слова: нелинейная деформационная модель, изгибаемые железобетонные элементы, метод итераций, жесткость, остаточные прогибы.

Введение. Обследование сборных и монолитных железобетонных изгибаемых конструкций, особенно в условиях появления и развития существенных эволюционных или спонтанно приобретенных деформаций, ставящих под вопрос достаточную несущую способность конструкции, представляют собой значительный объем полевой практики строительно-технического эксперта. Выявление причин дефектов и повреждений конструкций, условий возникновения напряженно-деформированного состояния, приведшего к недопустимым перемещениям ее отдельных сечений и фрагментов, влияние установленных инструментально дефектов на параметры ее усиления и безопасность дальнейшей эксплуатации конструкции требует выявления причин деформаций и связанных с ними остаточных прогибов. Основанная на инструментально установленных деформациях конструкций расчетная модель усиливаемого изгибаемого элемента проверяется поверочным расчетом, реализующим общепринятые в профессиональном сообществе расчетные методы и алгоритмы, опери-

рующие установленными дефектами как количественными факторами, снижающими проектную несущую способность конструкции, и в этой связи содержащими ряд дискуссионных положений расчета, имеющих существенный исследовательский потенциал. Большинство существующих инженерных методов поверочного расчета и усиления изгибаемых элементов базируется на подходах, основанных на определении интегральных жесткостных характеристик сечения изгибаемого элемента по упрощенным методикам. В то же время действующие нормы обязывают при поверочном расчете конструкции учесть особенности нелинейного деформирования материалов, режим загрузки элемента и предысторию ее работы под нагрузкой. Основное затруднение на практике в расчетах усиливаемых изгибаемых элементов вызывает учет нелинейной работы материалов конструкции, допустимость и рациональность применяемых алгоритмов определения жесткостных характеристик сечений элемента в условиях отсутствия общепринятой методики, представленной в норматив-

ных документах. В данной работе рассматривается численная реализация определения остаточных прогибов изгибаемых железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели. Для решения уравнений в физически нелинейной постановке применен метод итераций в сочетании с Microsoft Excel и VBA.

Материалы и методы. Использование нелинейной деформационной модели (НДМ) железобетона позволяет в наиболее полной степени приблизить расчетную схему конструкции к фактическим условиям работы материала, обладающего переменными по времени и уровню нагружения физико-механическими характеристиками. Традиционно отмечается не только возможность учета переменных свойств материала при расчете на предельных и близких к ним деформациях и напряжениях, но и следующая из этого существенно большая точность получаемых результатов расчета, особенно при анализе конструкций, обладающих приобретенными в процессе нагружения или начальными деформациями, или при анализе стадии разрушения элемента. НДМ обеспечивает наиболее полный учет влияние хронологии нагружения на свойства и реакцию конструкции, связанную как с длительностью приложения нагрузки, так и характерной для всех бетонов релаксацией напряжений, что особенно важно при анализе долговечной работы и долгосрочной надежности конструкций. Учет присущих железобетону неоднородностей материала (включения, нарушения сплошности), влияющих на напряженно-деформированное состояние конструкции и ее инженерные характеристики обеспечивается использованием НДМ в основе методов количественного анализа дефектов и повреждений как при проектировании новых, так и оценке технического состояния существующих железобетонных

конструкций [1, 2]. НДМ лежит в основе методов учета температурно-влажностных режима окружающей конструкцию среды и долгосрочного прогноза ее безопасности в этих условиях [3, 4]. Однако, следует отметить, что применение нелинейной деформационной модели требует более сложных вычислительных методов и большего объема данных, чем линейная модель. Также, нелинейная модель может быть более трудоемкой в использовании и требовать более высокой квалификации инженера для ее применения.

Основная часть. Для решения рассматриваемой задачи изгибаемый элемент разбивается на отдельные участки, на каждом из которых вычисляются жесткости на основе нелинейной деформационной модели [5, 6]. Для каждого участка составляется уравнение равновесия усилия в материалах бетона и арматуры, и внутренних сил от внешней нагрузки. При решении систем уравнений равновесия нелинейной деформационной модели применяется метод итераций. На участках с трещинами напряжения в арматуре корректируются коэффициентом, учитывающим неравномерность их распределения в сечении с трещиной и между ними [7]. В расчете используются предпосылка что разгрузка происходит по упругому закону, пропорционально коэффициенту k_{mx} .

Определение остаточных прогибов в общем случае осуществляется по зависимости «нагрузка-прогиб»:

$$q_j = k_{mx}v_j - v_{plj}, \quad (1)$$

где q_j – нагрузка на элемент; v_j – прогиб в плоскости действия изгибающего момента; v_{plj} – остаточное значения прогиба при полной разгрузке; k_{mx} – коэффициент пропорциональности, j – шаг загрузки.

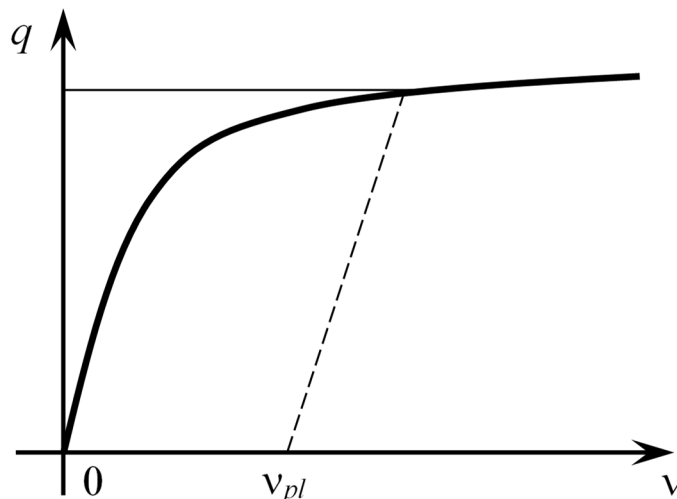


Рис. 1. Определение остаточных параметров напряжений при разгрузке

Расчет осуществляется разбиением конструкции на расчетные участки и последующим определением на каждом из участков жесткости при изгибе D_{11} . Для этого в каждом расчетном сечении составляется и решается система уравнений равновесия (2)–(3):

$$D_{11} \frac{1}{\rho_x} + D_{13} \varepsilon_0 = M_x; \quad (2)$$

$$D_{31} \frac{1}{\rho_x} + D_{33} \varepsilon_0 = N. \quad (3)$$

где $\frac{1}{\rho_x}$ – кривизна балки в рассматриваемом сечении; ε_0 – относительная осевая деформация при сжатии (растяжении); D_{11} , D_{22} , D_{33} – коэффициенты, определяемые по методике [8].

В общем виде решение на каждом шаге можно записать:

$$\left(\frac{1}{\rho_x} \right)_j^{(k)} = \frac{M_{x,j}}{D_{11,j}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{13,j}^{(k-1)}}{D_{11,j}^{(k-1)}} \right) (\varepsilon_0)_j^{(k-1)}, \quad (4)$$

$$(\varepsilon_0)_j^{(k)} = \frac{N}{D_{33,j}^{(k-1)}} - \left(\frac{D_{31,j}^{(k-1)}}{D_{33,j}^{(k-1)}} \right) \left(\frac{1}{\rho_x} \right)_j^{(k-1)}, \quad (5)$$

где (k) – номер итерации; j – шаг загрузки.

Сходимость итерационного процесса следует определять из условия:

$$|D_{ii}| \geq |D_{i1}| + \dots + |D_{i,i-1}| + |D_{i,i+1}| + \dots + |D_{in}|, \quad (6)$$

для всех или по крайней мере для одного i .

Расчет ведем в следующем порядке:

- задаются размеры, класс бетона, армирование,
- сечение стержня разбивается на отдельные участки,
- задаются площади участков бетона и арматуры A_{bij} , A_{sij} ;
- задаются начало координат (например, вверху) и координаты центра тяжести каждого участка x_{ij} , y_{ij} ;
- назначаются начальные кривизна, относительная деформациями и координата нейтрального слоя (обычно из условия упругой работы материалов). Например, для прямоугольного сечения на первом шаге итерации:

$$\left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(0)} = \frac{M_x}{E_b \cdot J_{bx}}, \quad (7)$$

$$(\varepsilon_0)^{(0)} = \frac{N}{E_b \cdot A_b}, \quad (8)$$

$$z_{y0j}^{(0)} = -\frac{h}{2}, \quad (9)$$

$$z_{x0i}^{(0)} = -\frac{b}{2}, \quad (10)$$

где J_{bx} , J_{by} – моменты инерции сечения (по бетону); E_b – начальный модуль упругости; A_b – площадь поперечного сечения (по бетону); h – высота прямоугольного сечения; b – ширина прямоугольного сечения; z_{y0j} , z_{x0i} – положение нейтрального слоя,

– вычисляются относительные деформации на участках

$$\varepsilon_{ij}^{(0)} = (\varepsilon_0)^{(0)} + \left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(0)} (y_{ij} + z_{y0j}^{(0)}) \quad (11)$$

– вычисляются напряжения и секущие модули бетона и стали согласно законам

$$\sigma_{bij}(\varepsilon_{ij}^{(0)}), \sigma_{sij}(\varepsilon_{ij}^{(0)}), \quad (12)$$

$$E_{b,redij}^{(0)} = \frac{\sigma_{bij}(\varepsilon_{ij}^{(0)})}{\varepsilon_{ij}^{(0)}}, \quad (13)$$

$$E_{s,redij}^{(0)} = \frac{\sigma_{sij}(\varepsilon_{ij}^{(0)})}{\varepsilon_{ij}^{(0)}}, \quad (14)$$

– определяется новое положение нейтрального слоя:

$$z_{x0i}^{(0)} = -\frac{\sum_{j=1}^m (A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} \cdot E_{s,redij}^{(0)}) \cdot x_{ij}}{\sum_{j=0}^m (A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} \cdot E_{s,redij}^{(0)})}, \quad (15)$$

$$z_{y0j}^{(0)} = -\frac{\sum_{i=1}^n (A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} \cdot E_{s,redij}^{(0)}) \cdot y_{ij}}{\sum_{i=0}^n (A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} \cdot E_{s,redij}^{(0)})}, \quad (16)$$

– вычисляются коэффициенты системы уравнений равновесия:

$$D_{11}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{sij} \cdot E_{s,redij}^{(0)}) (y_{ij} + z_{y0j}^{(0)})^2, \quad (17)$$

$$D_{13}^{(0)} = D_{31}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{sj} \cdot E_{s,redij}^{(0)} \right) \cdot \left(y_{ij} + z_{y0j}^{(0)} \right), \quad (18)$$

$$D_{33}^{(0)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(A_{bij} \cdot E_{b,redij}^{(0)} + A_{si,j} \cdot E_{s,redij}^{(0)} \right) \quad (19)$$

– вычисляются новые величины кривизны и осевой деформации на следующей итерации:

$$\left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(1)} = \frac{M_x}{D_{11}^{(0)}} - \left(\frac{D_{13}^{(0)}}{D_{11}^{(0)}} \right) \cdot (\varepsilon_0)^{(0)}, \quad (20)$$

$$(\varepsilon_0)^{(1)} = \frac{N}{D_{33}^{(0)}} - \left(\frac{D_{31}^{(0)}}{D_{33}^{(0)}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(0)}, \quad (21)$$

– расчет по формулам (8)-(18) продолжается пока не выполняются условия:

$$\left| \frac{\left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(k)} - \left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(k-1)}}{\left(\frac{1}{\rho_x} \right)^{(k-1)}} \right| \leq \delta, \quad (22)$$

$$\left| \frac{(\varepsilon_0)^{(k)} - (\varepsilon_0)^{(k-1)}}{(\varepsilon_0)^{(k-1)}} \right| \leq \delta, \quad (23)$$

где δ – точность расчета.

Более подробно решение системы уравнений (4)–(5) рассмотрены в [8].

На каждом шаге нагружения корректируем напряжения в арматуре по методике [8].

После определения D_{11} для каждого участка определяем прогибы методом сил по формуле:

$$v_j^{(k)} = \int_0^l \frac{M_p(x_i) \cdot M_1(x_i)}{(D_{11})_i} dx. \quad (24)$$

После определения жесткостных коэффициентов в каждом сечении производится расчет перемещения путем интегрирования численным методом трапеций значений на участках единичных моментов и вычисленной кривизны [6]. Решение с определением прогибов также возможно при помощи метода начальных параметров, который достаточно хорошо формализуем с точки зрения программирования [9, 10].

При определении прогибов следует учесть особенность распределение жесткости в сечении с трещиной и на участках между ними [7]. Для этого следует использовать экспериментальные зависимости в отношениях между моментом трещинообразования и моментом в сечении, где определяется жесткость, напряжением в арматуре момент трещинообразования и соответствующим напряжением в рассматриваемом сечении [11].

Далее строим зависимость $q(v)$ и аппроксимируем ее в виде полинома:

$$q = av^2 + bv, \quad (25)$$

где a и b – коэффициенты, аппроксимирующие зависимость $q(v)$.

Остаточные прогибы определяем, решая уравнение:

$$k_{mx} v - v_{pl} = av^2 + bv. \quad (26)$$

Так как $k_{mx} = b$, то остаточный прогиб определяем по формуле:

$$v_{pl} = -\frac{a}{b} v^2. \quad (27)$$

Алгоритмизация решения задачи в VBA осуществляется в следующем факторном пространстве [12, 13]:

Dim NnodC As Integer ' Количество узлов бетона
 Dim XnodC() As Double ' Координаты узлов бетонных участков по оси X
 Dim YnodC() As Double ' Координаты узлов бетонных участков по оси Y
 Dim n As Integer ' Количество элементов бетона
 Dim Ab() As Double ' Площади бетона
 Dim X() As Double ' Координаты центров тяжести бетонных участков по оси X
 Dim Y() As Double ' Координаты центров тяжести бетонных участков по оси Y
 Dim XElem() As Double ' Текущие координаты элемента
 Dim YElem() As Double ' Текущие координаты элемента
 Dim NnodS As Integer ' Количество узлов стали
 Dim XnodS() As Double ' Координаты узлов стальных участков по оси X
 Dim YnodS() As Double ' Координаты узлов стальных участков по оси Y
 Dim m As Integer ' Количество элементов арматуры
 Dim Aarm() As Double ' Площади арматуры
 Dim Xs() As Double ' Координаты центров тяжести бетонных участков по оси X
 Dim Ys() As Double ' Координаты центров тяжести бетонных участков по оси Y
 Dim XElemS() As Double ' Текущие координаты элемента

Dim YElemS() As Double 'Текущие координаты элемента
 Dim ZY0 As Double 'Координаты нейтрального слоя по оси X
 Dim ZX0 As Double 'Координаты нейтрального слоя по оси Y

со следующими характеристиками бетона:

Dim Epsilon() As Double
 Dim SigmaB() As Double
 Dim Ebred() As Double
 Dim NuB() As Double

с учетом разрушенных элементов

Dim ElemConcreteDead() As Double

со следующими характеристиками стали:

Dim EpsilonS() As Double
 Dim Esred() As Double
 Dim SigmaS() As Double

параметрами искомым уравнений:

Dim ChiX() As Double
 Dim ChiY() As Double
 Dim Epsilon0() As Double
 Dim ChiXn() As Double
 Dim ChiYn() As Double
 Dim Epsilon0n() As Double

и при учете участков с трещиной

Dim SectBeamCrc() As Double

По отыскании участков с предполагаемыми трещинами:

```
For i = 4 To NSectBeamM - 4 Step 4
  SectBeamCrc(i) = 1 'Элемент не разрушен
Next i
```

устанавливается количество сечений, в которых определяются прогибы:

NSectBeam = Sheets(6).Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row - 2

и количество сечений, в которых определяются жесткости:

NSectBeamM = Sheets(6).Cells(Rows.Count, 15).End(xlUp).Row - 2

Затем задаются приращения нагрузки, определяемые количеством шагов длительной части нагружения ($NFL = 10$), последовательными приближениями с контролем установленной сходимости результатов итераций отыскивается нагрузка на этапе jF , по заданным величинам предельных относительных деформаций нелинейной диаграммы бетона и стали вычисляются напряжения и секущие модули бетона и стали на участках, используемые для определения параметров напряженно-деформированного состояния сечения на этапе расчета.

Результаты исследования. Для численной реализации методики определим остаточные деформации от постоянных и длительных нагрузок $q_l = 3,25$ кН/м плиты перекрытия гражданского здания (пример 44 [14]): прямоугольного сечения размерами $h = 20$ см, $b = 100$ см, $h_0 = 17,3$ см, пролетом $l = 5,6$ м; тяжелый бетон класса В15 ($E_b = 24000$ МПа; $R_{b,ser} = 11$ МПа, $R_{bt,ser} = 1,1$ МПа); растянутая арматура класса А400 ($E_s = 206$ ГПа) с площадью поперечного сечения $A_s = 7,69$ см²

(5d14). Диаграммы принимаем по приложению Г [15]. Значения предельных относительных деформаций при непродолжительном действии нагрузки принимались равными $\varepsilon_{b0} = -0,002$, $\varepsilon_{b2} = -0,0035$, $\varepsilon_{bt0} = 0,0001$, $\varepsilon_{bt2} = 0,00015$. При продолжительном действии нагрузки величины предельных относительных деформаций $\varepsilon_{b0,l} = -0,0034$, $\varepsilon_{b2,l} = -0,0048$, $\varepsilon_{bt0,l} = 0,00024$, $\varepsilon_{bt2,l} = 0,00031$. Диаграмма деформирования для стали принята по билинейному закону.

Для автоматизации расчета была написана программа на языке VBA. По составленной программе строим зависимость нагрузки от перемещений $q(v)$. Также для численного анализа была построена зависимость $q(v)$ на основе нелинейных расчетов в программе ЛИРА-САПР с такими же диаграммами материалов. Результаты расчета даны на рис. 1 и в табл. 1.

Предварительно определим момент трещинообразования, при вычислении которого ниспадающие ветвь диаграммы бетона не учитывается.

Режим нагружения принят для кратковременной нагрузки. Из численного решения по методике [8] получим $M_{срс} = 10,22$ кНм. По формуле (9) найдем остаточные прогибы из данных методики нелинейно-деформационной модели (НДМ):

$$v_{pl} = \frac{0,0036}{0,3284} \cdot 10,509^2 = 1,21 \text{ мм},$$

а по результатам расчетов по методу конечных элементов (МКЭ):

$$v_{pl} = \frac{0,0041}{0,3641} \cdot 9,937^2 = 1,11 \text{ мм}.$$

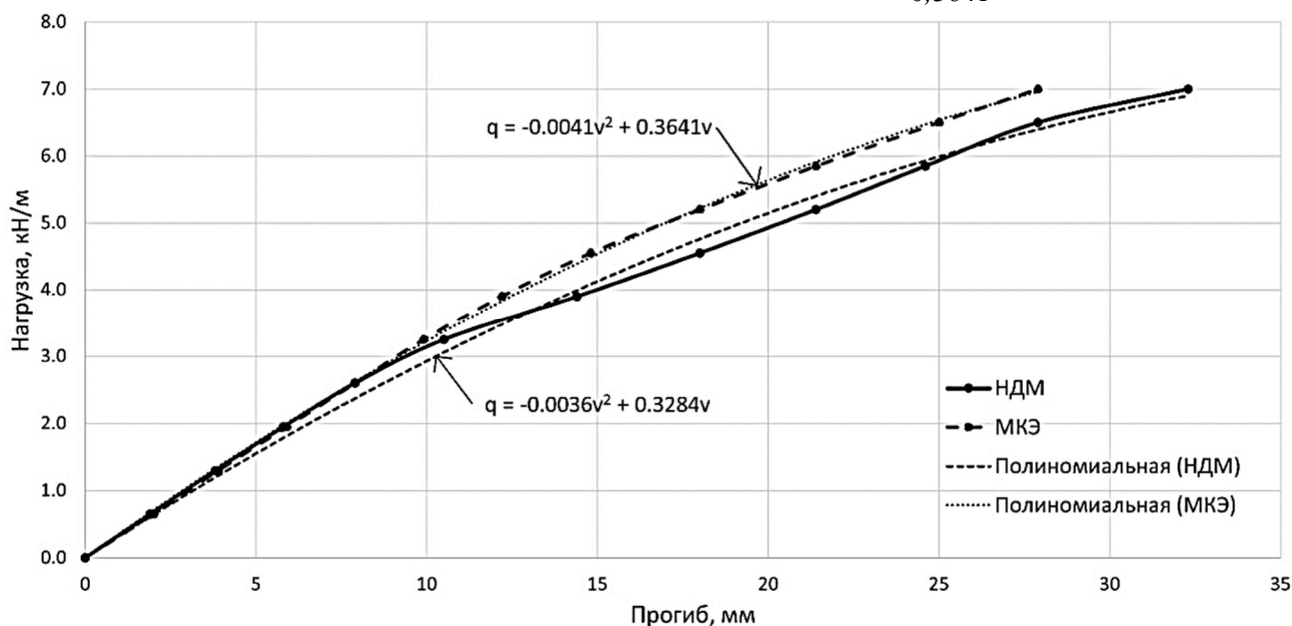


Рис. 2. Результаты расчета зависимости $q(v)$

Таблица 1

Результаты расчета

№ п/п	Нагрузка, кН/м	Прогибы, мм,		Остаточные прогибы, мм,	
		вычисленные по методике НДМ	вычисленные по методике МКЭ	вычисленные по методике НДМ	вычисленные по методике МКЭ
1	0,00	0,000	0,000	0,00	0,00
2	0,65	1,914	1,962	0,04	0,04
3	1,30	3,848	3,910	0,16	0,17
4	1,95	5,827	5,874	0,37	0,39
5	2,60	7,909	7,868	0,69	0,70
6	3,25	10,509	9,937	1,21	1,11
7	3,90	14,367	12,236	2,26	1,69
8	4,55	18,039	14,848	3,57	2,48
9	5,20	21,444	17,999	5,04	3,65
10	5,85	24,578	21,442	6,62	5,18
11	6,50	27,878	25,022	8,52	7,05
12	7,00	32,294	27,920	11,43	8,78

Расчеты по разработанной методике, методом конечных элементов [9, 10] и примера 44

[14] показывают, что прогибы имеют незначительное расхождение, представленное в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов расчета

Методика расчета	Прогиб, мм
СП 63.13330.2018	26,34
МКЭ	25,02
Метод итераций (НДМ)	27,88

Выводы. Представлено подтверждение эффективности подхода, лежащего в основе большинства существующих инженерных методов поверочного расчета и усиления изгибаемых железобетонных конструкций, основанного на определении интегральных жесткостных характеристик сечения по упрощенным методикам. Подтверждена рациональность использования нелинейной деформационной модели при использовании методик действующих норм, определяющих необходимость количественного учета особенностей нелинейного деформирования материалов, режима загрузки и предыстории работы конструкции. Продемонстрирована количественная и качественная эффективность применения нелинейной деформационной модели при расчете остаточных прогибов, при котором изгибаемый элемент разбивается на отдельные участки, на каждом из которых на основе нелинейной деформационной модели вычисляются жесткости. При решении систем уравнений равновесия нелинейной деформационной модели применяется метод итераций. На участках с трещинами напряжения в арматуре корректируются коэффициентом, учитывающим неравномерность их распределения в сечении с трещиной и между ними. После определения жесткостных коэффициентов в каждом сечении производится определение перемещения путем интегрирования численным методом трапеций значений на участках единичных моментов и вычисленной кривизны. Строится график «нагрузка-прогиб» и аппроксимируется квадратным полиномом с выводом аналитической зависимости для определения остаточных прогибов, а также напряжено-деформированного состояния изгибаемых элементов в целом. Приведен анализ и сравнение результатов с нормативной методикой. Численный пример показал хорошую сходимость с нормативной методикой.

При помощи разработанной методики возможно решать практическую задачу, часто встречающуюся при обследовании, имея фактические деформации и нагрузку определять остаточные прогибы. Следует отметить, что важное значение имеет шаг разбивки конструкции на участки и учет в вычислении жесткости неравномерность напряжений между трещинами. Разработанная методика позволяет достовернее определять остаточные деформации, учитывая стадийность работы конструкции и позволяет с большей точностью по сравнению с нормативной методикой определять их прогибы, что может послужить действенным аналитическим инструментом в практической деятельности современного строительного эксперта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колчунов В.И., Скобелева Е.А., Коржавых А.И. К расчету деформативности железобетонных рам с элементами составного сечения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. №4. С. 74–78.
2. Ribeiro R.R.J., Diogenes H.J.F., Nobrega M.V., Debs A.L.H.C.EL. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites // *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 2016. Vol. 9. No. 5. Pp. 722–744.
3. Байдин О.В. Шаповалов С.М.; Шевченко А.В. Учет температурных деформаций при расчете замкнутых цилиндрических оболочек вариационным методом // *Строительная механика и расчет сооружений*, 2009. №5. С. 6–9.
4. Коянкин А.А., Митасов В.М. Напряженно-деформированное состояние сборно-монолитного здания // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 6 (74). С. 175–184.
5. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Изд. «Наука», 1966. 664 с.
6. Байдин О.В. Шаповалов С.М.; Шевченко А.В. Расчет сборно-монолитных конструкций с применением вариационного метода и интегрального модуля деформации // *Строительная механика и расчет сооружений*, 2009. №4. С. 9–13.
7. Байдин О.В. Шаповалов С.М., Шевченко А.В. Экспериментальное исследование трещиностойкости стержневых сборно-монолитных конструкций // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2009. № 2. С. 78–83.
8. Шевченко А.В., Давидюк А.А., Баглаев Н.Н. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. №3. С. 13–18.
9. Abdulsamee H. Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis // *Proceedings of the 3rd World Congress on Civil Structural and Environmental Engineering (CSEE'18)*. Budapest, Hungary. 2018. ICSENM 103.
10. Wellison J.S.G. Reliability analysis of reinforced concrete beams using finite element models // *Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*. 2017.
11. Poloz M.A., Frolov N.V., Shevchenko A.V., Jiang Ji Mei. Analysis of Prestressed Bent Precast-Cast-In Structures in Vlasov-Mileykovsky Method with Physical Non-Linearity of Material // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974. Pp. 601–607.

12. McCracken D.D., Dorn W.S. Numerical methods and Fortran programming, Wiley, 1965. 583 p.

13. Pangaribuan G. An Introduction to Excel for Civil Engineers. e-Book, 2016. 387 p.

14. Методическое пособие. Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры. Пособие к СП 63.13330. М.: Минстрой России, 2015.

15. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Минстрой России, 2017.

Информация об авторах

Шевченко Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail a.shevchenko@ktbbeton.com. Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Баглаев Николай Николаевич, генеральный директор. E-mail n.baglaev@ktbbeton.com. АО «КТБ Железобетон». Россия, 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6, стр. 64

Зеленев Евгений Александрович заведующий отделом строительного инжиниринга и реконструкции. E-mail e.zelenev@ktbbeton.com. АО «КТБ Железобетон». Россия, 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6, стр. 64

Курбатов Владимир Леонидович, доктор экономических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail kurbatov.vl@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 30.06.2023 г.

© Шевченко А.В., Баглаев Н.Н., Зеленев Е.А., Курбатов В.Л., 2023

^{1,*}Shevchenko A.V., ²Baglaev N.N., ²Zelenev E.A., ³Kurbatov V.L.

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

²KTB Beton Group

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: a.shevchenko@ktbbeton.com

DETERMINATION OF RESIDUAL DEFLECTIONS OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS BASED ON A NONLINEAR DEFORMATION MODEL

Abstract. The purpose of this work is to numerically implement the determination of residual deflections of reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model. To solve the equations in a physically nonlinear formulation, the iteration method is used in combination with Microsoft Excel and VBA. Most of the existing engineering methods for the verification calculation and reinforcement of bent elements are based on approaches based on the determination of integral stiffness characteristics of the section by simplified methods. This problem acquires new relevance when using the current norms, when it is necessary to take into account the features of nonlinear deformation of materials, loading mode, and the background of the structure. The article considers the application of a nonlinear deformation model in the calculation of residual deflections. To solve this problem, the bent element is divided into separate sections, on each of which stiffness is calculated based on a nonlinear deformation model. When solving systems of equilibrium equations of a nonlinear deformation model, the iteration method is used. In areas with cracks, the stresses in the reinforcement are adjusted by a coefficient that takes into account the unevenness of their distribution in the section with the crack and between them. After determining the stiffness coefficients in each section, the displacement is determined by integrating the values in the sections of unit moments and the calculated curvature by the numerical method of trapezoids. A load-deflection graph is constructed and approximated by a square polynomial with the derivation of an analytical dependence to determine the residual deflections as well as the stress-strain state of the bent elements as a whole. The analysis and comparison of the results with the normative methodology is given. Numerical example of calculation of good convergence with the normative methodology.

Keywords: nonlinear deformation model, iteration method, residual deflections.

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Skobeleva E.A., Kogzhavnyh A.I. To calculation of deformation of reinforced concrete frames with elements of composite

section [K raschetu deformativnosti zhelezobetonnih ram s elementami sostavnogo secheniya]. Academia. Architecture and Civil Engineering. 2009. No. 4. Pp. 74–78. (rus)

2. Ribeiro R.R.J., Diogenes H.J.F., Nobrega M.V., Debs A.L.H.C.El. A survey of the mechanical properties of concrete for structural purposes prepared on construction sites. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 2016. Vol.9. No. 5. Pp. 722–744.

3. Bajdin O.V., Shevchenko A.V., Shapovalov S.M. Considering temperature deformations in the calculation of closed cylindrical shells by variational method [Uchet temperaturnykh deformatsiy pri raschete zamknytykh cilindricheskikh obolochek variacionnym metodom]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2009. No. 5. Pp. 6–9. (rus).

4. Koyankin A.A., Mitasov V.M. Stress-strain state of precast and cast-in place buildings [Napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie sborno-monolitnogo zdaniya]. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6. Pp. 175–184. (rus)

5. Demidovich B.P., Maron I.A. Demidovich B. P. Fundamentals of Computational Mathematics [Osnovy vychislitel'noj matematiki]. M.: Nauka Publ., 1966. 664 p. (rus)

6. Bajdin O.V., Shevchenko A.V., Shapovalov S.M. Calculation of precast-monolithic structures using variational method and the integral of the modulus of deformation [Raschet sborno-monolitnykh konstrukcij s primeneniem variacionnogo metoda i integral'nogo modulya deformatsii]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2009. No. 4. Pp. 9–13. (rus)

7. Bajdin O.V., Shevchenko A.V., Shapovalov S.M. Experimental study of the fracture toughness of the core precast-monolithic structures [Eksperimental'noe issledovanie treshchinostojkosti sterzhnevyyh sborno-monolitnykh konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2009. No. 2. Pp. 78–83. (rus).

8. Shevchenko A.V., Davidyuk A.A., Baglaev N.N. Iteration Method for the Calculation of Reinforced Concrete Elements Based on a Nonlinear

Deformation Model [Metod iteracij dlya rascheta zhelezobetonnykh elementov na osnove nelinejnoj deformatsionnoj modeli]. Industrial and Civil Engineering, 2022. No. 3. Pp. 13–18. (rus)

9. Abdulsamee H. Study the Behavior of Reinforced Concrete Beam Using Finite Element Analysis. Proceedings of the 3rd World Congress on Civil Structural and Environmental Engineering (CSEE'18). Budapest, Hungary. 2018. ICSENM 103. DOI:10.11159/icsenm18.103

10. Wellison J.S.G. Reliability analysis of reinforced concrete beams using finite element models. Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. 2017.

11. Poloz M.A., Frolov N.V., Shevchenko A.V., Jiang Ji Mei. Analysis of Prestressed Bent Precast-Cast-In Structures in Vlasov-Mileykovsky Method with Physical Non-Linearity of Material. Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 601–607.

12. McCracken D.D., Dorn W.S. Numerical methods and Fortran programming, Wiley, 1965. 583 p.

13. Pangaribuan G. An Introduction to Excel for Civil Engineers. e-Book, 2016. 387 p.

14. Methodical manual. Calculation of reinforced concrete structures without prestressed reinforcement. Manual for SP 63.13330 [Metodicheskoe posobie. Raschet zhelezobetonnykh konstrukcij bez predvaritel'no napryazhennoj armatury. Posobie k SP 63.13330]. M.: Ministry of Construction of Russia, 2015. (rus)

15. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions [SP 63.13330.2018 Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya.]. M.: Ministry of Construction of Russia, 2017. (rus)

Information about the authors

Shevchenko, Andrey V. PhD, Asc. professor. E-mail: a.shevchenko@ktbbeton.com. Moscow State University of Civil Engineering, Russian Federation, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

Baglaev, Nikolai N. General Director. E-mail: n.baglaev@ktbbeton.com. KTB BETON GROUP, Russian Federation, 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str., 6, 64

Zelenev, Evgeny A. Head of the Department of Construction Engineering and Reconstruction. E-mail: e.zelenev@ktbbeton.com. KTB BETON GROUP, Russian Federation, 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str., 6, 64

Kurbatov, Vladimir L. DSc, Professor. E-mail: kurbatov.vl@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

Received 30.06.2023

Для цитирования:

Шевченко А.В., Баглаев Н.Н., Зеленев Е.А., Курбатов В.Л. Определение остаточных прогибов изгибаемых железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 8. С. 31–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-31-40

For citation:

Shevchenko A.V., Baglaev N.N., Zelenev E.A., Kurbatov V.L. Determination of residual deflections of bent reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 8. Pp. 31–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-8-31-40