

10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91

Крючков А.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: krjuchkow@yandex.ru

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СПЛОШНОГО И СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Аннотация. Предложен расчетный аппарат, позволяющий с единых позиций рассматривать вопросы деформативности железобетонных элементов сплошного и составного (сборно-монолитного) сечения. В подходе использован итерационный подход для определения деформаций, основанный на деформационной модели квазиоднородного сплошного тела с использованием нелинейной диаграммы деформирования бетона и кусочно-линейной диаграммы деформирования арматуры, уравнений равновесия внешних сил и внутренних усилий. Подход возможен для определения параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых, внецентренно-сжатых элементов. Работа растянутого бетона до образования трещин описывается также нелинейной зависимостью, после – прямоугольная эпюра. Для сжатой части сечения – криволинейная эпюра. В методике расчета распределение жесткости по длине элемента имеет вид параболы (не в виде ломаной и не кусочно-линейный), что позволяет учесть прогиб от действия поперечной силы в коротких железобетонных элементах и может быть использован как внешний блок для системы автоматизированного проектирования. Выполнено сопоставление данных физического эксперимента, параметров, полученных по предложенной методике. Сделан вывод о коэффициенте корреляции данных физического эксперимента автора и результатами расчета по предлагаемой методике. Показаны перспективы развития подхода и возможные области его использования.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, изгибаемый элемент, нелинейный расчет, кривизна, квазиоднородное сплошное тело, запроектные воздействия

Введение. Совершенствование теоретических основ проектирования несущих конструкций зданий и сооружений, совершенствования новых схем зданий, отвечающих современным требованиям к конструктивному обеспечению среды жизнедеятельности, с учетом критериев их эксплуатации пригодности и безопасности (в том числе противодействие прогрессирующему обрушению), закрепленное для ряда зданий и сооружений законодательно, выявляют резервы для использования материалов. Наиболее простой, инженерный метод расчета, рекомендованный в действующих строительных нормах в качестве предварительного – метод предельного равновесия, позволяющий с достаточной точностью определять несущую способность элемента или конструкции в целом. Однако, при определенных сочетаниях прочностных параметрах более корректным является комплексный подход, позволяющий оценивать напряженно-деформированное состояние железобетонных изгибаемых, внецентренно сжатых, на всех стадиях эксплуатационной стадии работы конструкции широко рассмотрен как в нашей стране, так и за ее пределами. Существует большое количество различных подходов к оценке НДС сечений, при этом ни один из существующих не обладает всей полнотой получаемой в процессе расчета информацией. В предлагаемой методике для определе-

ния деформаций положена деформационная модель квазиоднородного сплошного тела [1, 11–13] с использованием уравнений равновесия внешних и внутренних усилий в нормальном сечении, условия деформирования в виде плоского поворота и плоского перемещения сечения (гипотеза Бернулли), реальной диаграммы бетона « $\sigma - \varepsilon$ », полученной в условиях жесткого статического нагружения (в качестве нагрузочного параметр при испытании призм – перемещение [2]) как для конструкционного бетона, так и для легких бетонов [3], со способом описания в виде степенного полинома (рис. 1), кусочно-линейной диаграммы работы арматурной стали « $\sigma_s - \varepsilon_s$ ».

Методика. Разработанная методика нелинейного расчета, базируясь на едином подходе оценки прочности, деформативности, в настоящее время уже позволила решить широкий спектр задач: 1) учет действия (влияния) поперечной силы для коротких элементов [3] и элементов из легкого бетона [4, 5] (в том числе с возможностью решения вопросов трещиностойкости [6]); 2) развитие методики позволило учесть коррозионные повреждения [7, 8] железобетонных элементов сплошного и составного (сборно-монолитного) сечения; 3) предложенная методика [3] с небольшими доработками математического аппарата позволила адекватно отслеживать все параметры напряженно-деформированного

состояния при кратковременном и длительном действии нагрузки, в том числе и для предварительно-напряженных элементов [9]; 4) учет переменной жесткости элементов также возможен, как это показано в работе [11].

Общеизвестно, что достоверную связь между жесткостными параметрами сечения и возникающими в нем усилиями можно получить на основе реальных диаграмм деформирования материала (рис. 1).

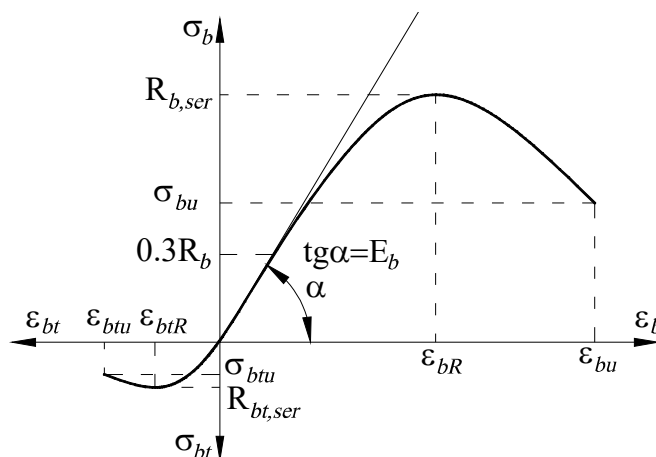


Рис. 1. Нелинейная диаграмма деформирования бетона, получаемая в условиях жесткого статического нагружения

В статически-неопределимых системах после появления «пластического шарнира» общая несущая способность системы не снижается, а происходит перераспределение усилий [10]. Это является свидетельством остаточного внутреннего момента и работой сечений на нисходящей ветви деформирования бетона. Учет данного момента позволяет более достоверно оценивать деформации системы в области запроектных (аварийных) воздействий, которая реализуется, например, при расчетном обосновании прогрессирующего разрушения.

В настоящей методике определения напряженно-деформированного состояния нормальных сечений изгибаемых стержневых элементов как без предварительного напряжения, так и предварительно напряженных используются следующие исходные предпосылки:

1. В качестве расчетного принято сечение, в котором напряженно-деформированное состояние соответствует усредненному состоянию блока между трещинами (если таковые имеются).

2. Для расчетного сечения является справедливым линейный закон распределения деформаций по высоте (гипотеза Бернулли).

3. На всем протяжении деформирования конструкции обеспечивается совместная работа сборного и монолитного бетонов. Это достигается за счет сцепления, механического зацепления и трения, а также работы поперечной арматуры на срез (для сборно-монолитных конструкций).

4. Связь между напряжениями и деформациями тяжелого конструкционного бетона представлено выражением ($k=5$)

$$\sigma_b = R_b \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bR}} \right)^k \quad (1)$$

5. Часть бетона, где деформации сжатой зоны достигли предельную деформативность бетона, выключаются из работы.

6. Работа растянутого бетона до достижения деформаций, равных $\varepsilon_{btu} = 2R_{bt} / E_b$, описывается зависимостью 1, после прямоугольной эпюрой с ординатой $R_{bt} \psi_{bt}$.

7. Зависимость между напряжениями и деформациями арматурной стали принимается в виде кусочно-линейной диаграммы (рис. 2), параметры которой получены экспериментальным путем (испытанием стандартных образцов).

Уравнения связи между напряженно-деформированным состоянием составного сечения без трещин и внешними усилиями – рисунок 3 (а, б, в):

$$\int_A \sigma_b dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} - N = 0; \quad (2)$$

$$\int_A \sigma_b y dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} y_{si} A_{si} - M = 0, \quad (3)$$

где σ_b – напряжения в элементарной площадке в «сборном» или «монолитном» бетоне площадью dA_b , расположенной на расстоянии, равном y от нижней грани сечения; σ_{si} ; A_{si} и y_{si} – напряжения в i -ом арматурном стержне, площадь его поперечного сечения и расстояние от

нижней грани сечения конструкции до центра тяжести указанной площади, N – внешнее силовое воздействие в виде продольной силы, M – внешний изгибающий момент.

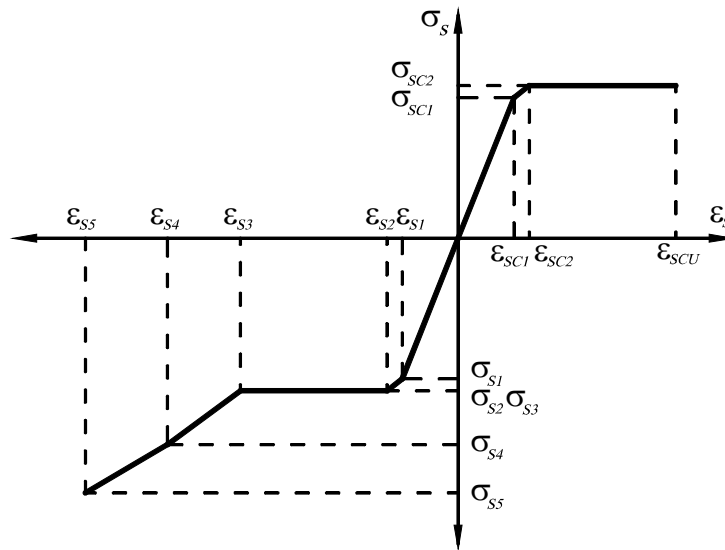


Рис. 2. Диаграмма растяжения арматурной стали

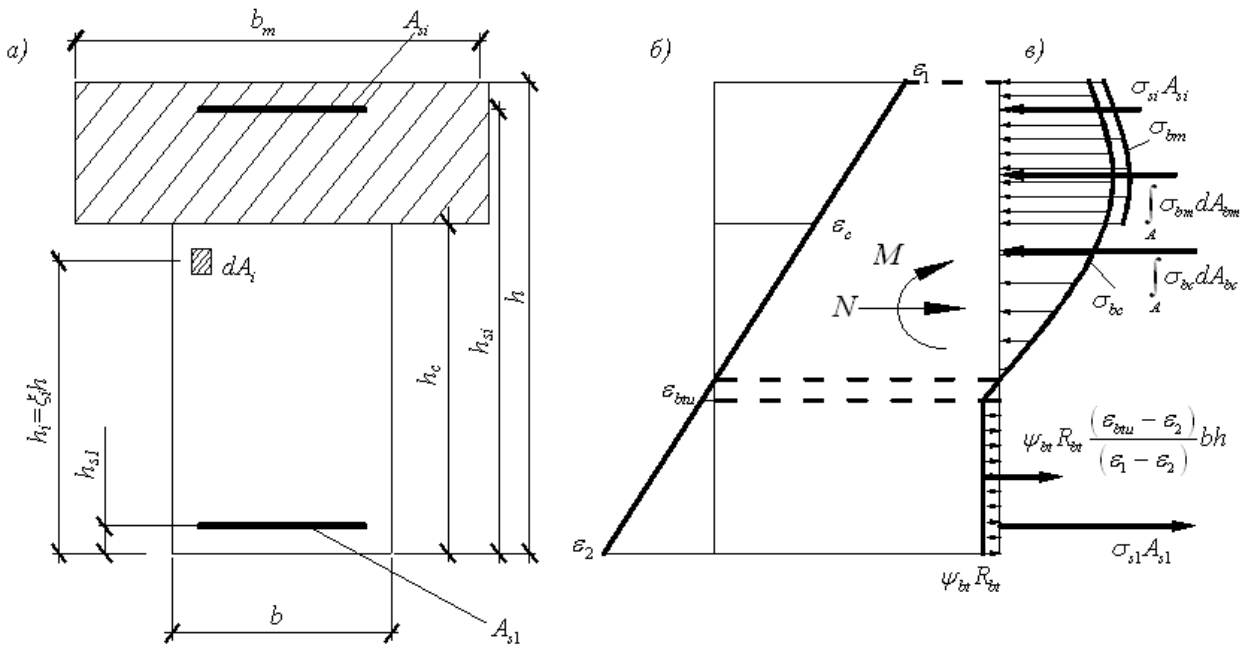


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние сборно-монолитного сечения: а – поперечное сечение; б – эпюра деформаций; в – эпюра напряжений

Значение продольной силы N подразумевает как внешнюю сжимающую нагрузку при расчете сжатых и сжато-изогнутых стержней, так и величину предварительного напряжения [8], а при некоторой перестройке расчетного аппарата

позволяет учесть реологические свойства бетона (прежде всего усадку и ползучесть).

Система уравнений, описывающая работу сборно-монолитных железобетонных элементов без предварительного напряжения, в общем случае будет иметь вид:

$$\frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left[R_{bc} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_1^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) - R_{bc} \beta \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_2^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) + \right. \\ \left. + R_{bm} \beta_m \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_3^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) + \psi_{bt} R_{bt} (\chi_4 - \varepsilon_2) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} = 0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left\{ R_{bc} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+2} - \chi_1^{k+2}}{\varepsilon_{bR}} \right) - R_{bc} \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_1^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) - \right. \\ & - R_{bc} \beta \left[\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+2} - \chi_2^{k+2}}{\varepsilon_{bR}} \right) - R_{bc} \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_2^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) \right] + \\ & + R_{bm} \beta_m \left[\sum_{k=1}^n \frac{b_k}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+2} - \chi_3^{k+2}}{\varepsilon_{bR}} \right) - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{b_k}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_1^{k+1} - \chi_3^{k+1}}{\varepsilon_{bR}} \right) \right] + \\ & \left. + \frac{\psi_{bt} R_{bt}}{2} (\chi_4 - \varepsilon_2)^2 \right\} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} - m = 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Значения параметров χ_1 , χ_2 , χ_3 и χ_4 приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Значения параметров | | | | | | |
|-----------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|
| Случай деформирования | Исходные условия | χ_1 | χ_2 | χ_3 | χ_4 | Примечания |
| 1 | $\varepsilon_2 \leq \varepsilon_{btu}$ | ε_2 | ε_c | ε_c | ε_c | трещин нет |
| 2 | $\varepsilon_2 > \varepsilon_{btu}$ $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{btu}$ | ε_{btu} | ε_c | ε_c | ε_{btu} | трещины только в сборном бетоне |
| 3 | $\varepsilon_2 > \varepsilon_{btu}$ $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{btu}$ | ε_{btu} | ε_{btu} | ε_{btu} | ε_{btu} | трещины в сборном и монолитном бетоне |

В предлагаемой методике описание жесткости выполнено в виде параболы, что более полно отображает действительную работу конструкции.

С учетом граничных условий для однопролетной шарнирно опертой балки получаем выражение для определения перемещений сечений, а также углов поворота.

$$y_i = y_1 + (i-1) \cdot \varphi_1 \Delta + \sum_{j=1}^{i-1} [2 \cdot (i-j) - 1] \cdot \frac{N_j}{2} \cdot \Delta^2 + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{Q_k^R \cdot [8 \cdot (i-k) - 5]}{24 \cdot B_k} \cdot \Delta^3 + \sum_{l=2}^i \frac{Q_l^L \cdot [4 \cdot (i-l) + 1]}{24 \cdot B_l} \cdot \Delta^3, \tag{6}$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \sum_{j=1}^{i-1} N_j \Delta + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{Q_k^R}{3B_k} \Delta^2 + \sum_{l=1}^i \frac{Q_l^L}{6B_l} \Delta^2 \tag{7}$$

Проведя необходимые преобразования, получаем выражение для силового воздействия

$$F = \frac{-n \cdot \varphi_1}{\sum_{j=2}^n [2(n-j) + 1] \cdot \frac{Fp_j \cdot \Delta}{2 \cdot B_j} + \sum_{k=1}^n \frac{MKR_k \cdot [8(n-k) + 3] \Delta^2}{24B_k} + \sum_{l=2}^{n+1} \frac{MKL_l \cdot [4(n-l) + 5] \Delta^2}{24 \cdot B_l}}, \tag{8}$$

где n – количество участков разбиения; φ_1 – угол поворота в сечении на опоре, являющийся «нагрузочным» параметром; Δ – длина участка разбиения; Fp – параметр описания эпюры моментов; MKL, MKR – параметры описания эпюры поперечных сил.

В связи со сложностью выполнения расчетов инженерными методами рекомендуется выполнять расчетную программу на компьютере. В то же время для решения любой задачи необходимы

два алгоритма: один позволяет установить связь между жесткостью элемента и внутренними силовыми факторами в нем, а также блока оценки напряженно-деформированного состояния балки в целом.

На основе разработанной методики расчета разработаны компьютерный алгоритм и расчетная программа для монолитных и сборно-монолитных железобетонных элементов поперечного сечения.

В результате проведенных расчетов распределение жесткости по длине элемента имеет параболический вид, что позволяет учитывать прогиб железобетонных элементов и может быть использовано в качестве компонента системы автоматизированного проектирования (САПР).

Сравнение экспериментальных данных [14] и результатов сравнения теоретических данных, полученных на основе разработанной методики, показывает достаточно хорошее совпадение (коэффициент корреляции составляет 0,65), что также позволяет проводить численный эксперимент на основе данного метода, тем самым значительно расширяя сферу изучаемых факторов.

Основная часть. Для изучения влияния на силовые и деформативные свойства сборно-монолитных балок, соотношения прочности сборного и монолитного бетона, содержание продоль-

ной арматуры, их свойства и относительный пролет среза было выполнено математическое моделирование (эксперимент).

Часть математического эксперимента направлена на определение рабочих характеристик сборно-монолитных балок при различных величинах продольного армирования.

Основные геометрические размеры балок принимались одинаковыми как в физическом эксперименте, так и первой части математического эксперимента (свободно опертая балка, с двумя сосредоточенными силами в пролете). Балки приняты из бетона В25/В45, и коэффициенты полинома, соответствующие свойствам этих бетонов, назначены в соответствии с табл. 2, прочностные и деформационные характеристики бетона – табл. 3, а арматура – табл. 4. Внешний вид исходных диаграмм показан на рис. 4, арматуры рис. 5.

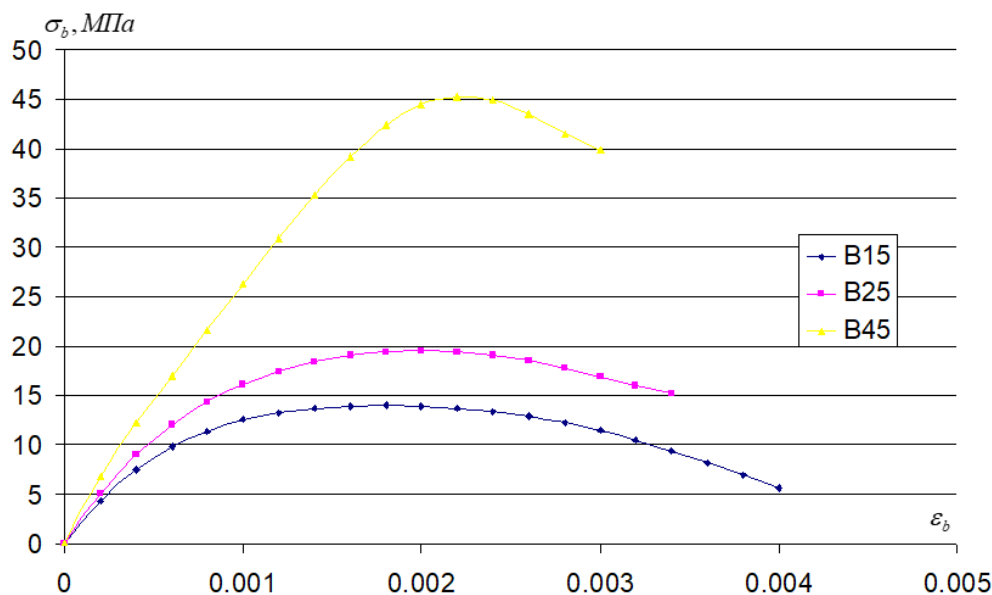


Рис. 4. Теоретические зависимости « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » для бетонов различных классов

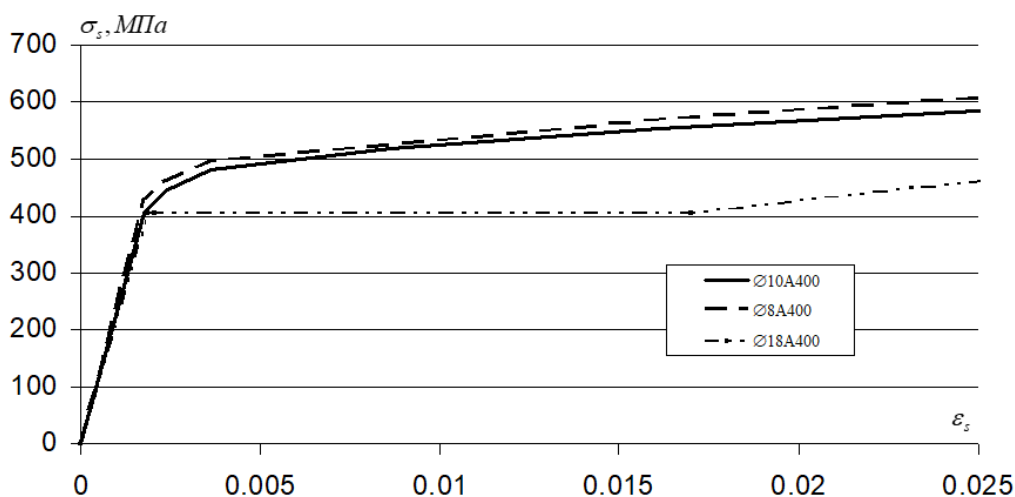


Рис. 5. Теоретические зависимости « $\sigma_s - \varepsilon_s$ » для арматуры различных классов

Таблица 2

Значения коэффициентов полинома a_k бетонов опытных составов

| Класс бетона | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 |
|--------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| B15 | 0,1472 | -1,0246 | 2,7836 | -4,0931 | 3,1870 |
| B25 | 0,2201 | -1,2344 | 2,8892 | -4,1939 | 3,7053 |
| B45 | 2,1988 | -9,0839 | 12,2948 | -7,4587 | 5,0724 |

Таблица 3

Прочностные и деформативные характеристики бетонов опытных составов

| Класс бетона | R_b , МПа | E_b , МПа | $\varepsilon_{bu} \times 10^5$ | $\varepsilon_{bR} \times 10^5$ | β_u |
|--------------|-------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| B15 | 14 | 21529 | 400 | 180 | 0,58 |
| B25 | 23 | 25486 | 366 | 205 | 0,61 |
| B45 | 44 | 32100 | 270 | 200 | 0,84 |

Таблица 4

Численные значения напряжений и деформаций в точках перелома кусочно-линейных диаграмм « $\sigma - \varepsilon$ » для стержней диаметром, мм

| № точки | 18 | | 10 | | 8 | |
|---------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| | σ_s , МПа | $\varepsilon_s \times 10^5$ | σ_s , МПа | $\varepsilon_s \times 10^5$ | σ_s , МПа | $\varepsilon_s \times 10^5$ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 406 | 188 | 332 | 165 | 407 | 186 |
| 3 | 420 | 204 | 373 | 205 | 444 | 235 |
| 4 | 420 | 1701 | 415 | 279 | 481 | 364 |
| 5 | 488 | 2316 | 456 | 440 | 518 | 864 |
| 6 | 528 | 3128 | 497 | 899 | 555 | 1614 |
| 7 | 550 | 3562 | 538 | 1964 | 591 | 2674 |

Площадь поперечного сечения арматуры варьировалась в диапазоне от 0,85 см² (3Ø6, $\mu=0,53\%$) до 7,6 см² (2Ø22, $\mu=4,75\%$). Нагрузка прикладывается в виде двух сосредоточенных сил, расположенных на равных расстояниях от опоры.

Был разработан математический план эксперимента с учетом принятой комбинации переменных факторов. В результате расчетов, выполненных на основе предложенной методики описания криволинейной оси с использованием полинома четвертой степени, были получены данные о напряженно-деформированном состоянии

нормальных сечений и величины несущей способности балок. В качестве критериев оценки несущей способности принимаются следующие критерии: достижение предельных значений при деформации сжатого бетона и растянутой продольной арматуре.

Кроме того, расчеты проводились по специально составленной программе, но с интерпретацией изогнутой оси уравнениями третьей степени. Затем были сопоставлены результаты расчетов, полученных с использованием полиномов третьей степени. По результатам сравнения была создана диаграмма (рис. 6).

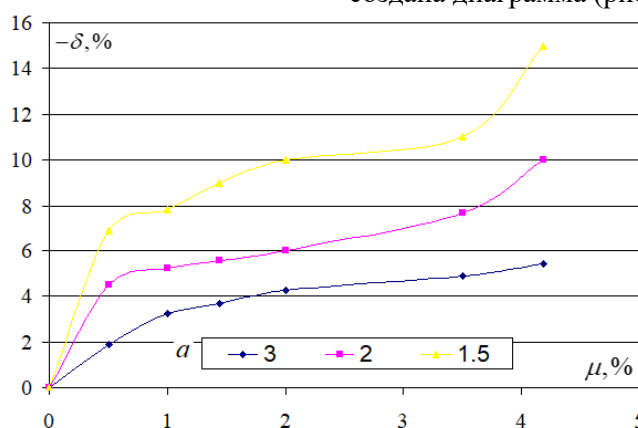


Рис. 6. Зависимость неточности определения прогиба ($-\delta$) от процента продольного армирования (μ) и различного пролета среза (сравнение предлагаемой методики и методики, основанной на полиноме третьей степени)

Согласно результатам математического эксперимента, процент содержания продольной арматуры оказывает существенное влияние не только на распределение прогибов по оси балки, но и на напряженно-деформированное состояние всего элемента. Например, по данным математического эксперимента наблюдается занижение величины прогибов при использовании полинома третьей степени в расчетах до 10–11 % по сравнению с уточненным методом предлагаемым автором.

Выводы. Проведенный математический эксперимент, направленный на уточнение методики расчета, при варьировании таких факторов, как вид бетона, величина прочности сборного и монолитного бетона, процент продольного армирования и относительный пролет среза, позволил сформулировать следующие результаты исследований:

1. Сравнение экспериментальных и теоретических данных показывает, что они в достаточной степени достоверны (коэффициент корреляции 0,86).

2. При оценке деформаций железобетонных балок по разработанной методике можно ограничиться разделением элемента на четыре части (участка).

3. Увеличение коэффициента продольного армирования приводит к недооценке значения прогиба во всех существующих методиках (включая методику действующих норм).

4. Сокращение пролета среза приводит к значительной недооценке величины прогиба элементов.

5. С помощью математического эксперимента удалось определить область, где поперечная сила оказывает особенно большое влияние на прогиб балки:

- недооценка величины прогиба, без учета поперечной силы в железобетонном элементе, увеличивается по мере увеличения процента продольного армирования и уменьшения расстояния от опоры до места приложения силы (пролета среза).

6. Согласно данным математического эксперимента, итерационный процесс, основанный на разработанной методике расчета, обладает достаточной сходимостью для расчета стержневых железобетонных элементов во всем диапазоне его работы, в том числе на нисходящей ветви диаграммы "момент–кривизна", что особенно важно для расчета статических неопределимых конструкций и каркасных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голышев А.Б., Бачинский В.Я. К разработке прикладной теории расчёта железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2011. №6. С. 16–18.

2. Методические рекомендации по определению параметров диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » бетона при кратковременном сжатии. Киев: НИИСК Госстроя СССР, 1985. 16 с.

3. Крючков А.А. Деформативность сборно-монолитных стержневых конструкций : дисс. ... кандидата технических наук. Белгород, 2006. 210 с.

4. Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дронова А.В., Дрокин С.В. К расчету изгибаемых элементов составного сечения из легких бетонов на пористых заполнителях // Строительство и реконструкция. 2012. № 2(40). С. 38–43.

5. Дронова А.В., Смоляго Г.А. Каркасные конструктивные системы малоэтажных жилых домов из монолитного керамзитобетона. Белгород, 2016. 158 с.

6. Крючков А.А., Смоляго Е.Г. Экспериментальные исследования трещиностойкости сборно-монолитных изгибаемых железобетонных элементов // Строительство и реконструкция. 2010. № 1(27). С. 47–54.

7. Дронов А.В. Прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями.: дисс. ... канд.техн. наук. Белгород, 2017. 143 с.

8. Фролов Н.В., Смоляго Г.А. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона сжатой зоны // Безопасный и комфортный город: Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской научно-практической конференции. Орёл, 2019. С. 121–127.

9. Смоляго Е.Г., Луценко А.Н. Экспериментальные исследования трещиностойкости предварительно напряженных сборно-монолитных изгибаемых железобетонных элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 68–72.

10. Бачинский В.Я., Бамбура А.Н., Голоднов А.И., Жданов А.Е. Несущая способность железобетонных балок при силовых и деформационных воздействиях / НИИСК Госстроя СССР. Киев, 1986. 9 с. Деп. во ВНИИИС Госстроя СССР, №6807, вып. 6.

11. Смоляго Г.А., Жданов А.Е., Ищук Я.Л., Фролов Н.В. Расчет деформативности изгибаемых железобетонных элементов переменной жесткости // "Лейбовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: Сборник докладов Международной

научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта, Москва, 2018. С. 385–390.

12. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Nazhnev M.P. Setting a diagram approach to calculating vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged reinforced concrete columns with a variatropic structure // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. No 1(49). P. 30–44. doi:10.36622/VSTU.2021.49.1.003

13. Харламов А.В. Расчет статически неопределимых железобетонных конструкций с

использованием шагово-итерационных методов // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 32. С. 1465–1469.

14. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Расчет и проектирование строительных конструкций с учетом вариатропии структуры, сечений и дифференциации конструктивных характеристик материалов // Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 2(62). С. 27–48.

15. Крючков А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных стержневых элементов на основе уточненной методики // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Приложение №11. Новочеркасск, 2006. С. 70–73.

Информация об авторах

Крючков Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: krjuchkov@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.01.2022 г.

© Крючков А.А., 2022

Krjuchkov A.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

E-mail: krjuchkov@yandex.ru

STRESS-STRAIN STATE OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF CONTINUOUS AND COMPOSITE CROSS-SECTION BASED ON A REFINED NONLINEAR CALCULATION METHOD

Abstract. A calculation apparatus is proposed that allows considering the issues of deformability of reinforced concrete elements of solid and composite (prefabricated-monolithic) sections from a single position. The approach uses an iterative approach to determine deformations based on a deformation model of a quasi-homogeneous solid body using a nonlinear concrete deformation diagram and a piecewise linear reinforcement deformation diagram, equations of equilibrium of external forces and internal forces. The approach is possible to determine the parameters of the stress-strain state not only of the bent, but also for non-centrally compressed elements. The work of stretched concrete before the formation of cracks is also described by a nonlinear dependence, after that - a rectangular plot. For the compressed part of the section - when deformations are achieved. In the calculation method, the stiffness distribution along the length of the element has a parabolic appearance (not piecewise linear and not in the form of a polyline), which allows for additional deflection from the action of transverse force in short reinforced concrete elements and can be used as an external unit for a computer-aided design system. The comparison of the data of the physical experiment, the parameters obtained by the proposed method is carried out. The conclusion is made about the correlation coefficient of the author's physical experiment data and the calculation results according to the proposed methodology. The prospects for the development of the approach and possible areas of its use are shown.

Keywords: reinforced concrete structures, bendable element, nonlinear calculation, curvature, quasi-homogeneous solid body, out-of-design impacts.

REFERENCES

1. Golyshev A.B., Bachinsky V.Ya. To the development of the applied theory of calculation of reinforced concrete structures [K razrabotke prikladnoj

teorii raschyota zhelezobetonnyh konstrukcij]. Concrete and reinforced concrete. 2011. No. 6. Pp. 16–18. (rus)

2. Methodological recommendations for determining the parameters of the diagram « $\sigma - \varepsilon$ » of concrete under short-term compression

[Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu parametrov diagrammy « $\sigma - \varepsilon$ » betona pri kratkovremennom szhatii]. Kiev: NIISK Gosstroy of the USSR, 1985. 16 p. (rus)

3. Kryuchkov A.A. Deformability of prefabricated monolithic rod structures : diss. ... candidate of technical sciences [Deformativnost' sborno-monolitnyh sterzhnevyyh konstrukcij : diss. ... kandidata tekhnicheskikh nauk]. Belgorod, 2006. 210 p. (rus)

4. Smolyago G.A., Kryuchkov A.A., Dronova A.V., Drokin S.V. To the calculation of bendable elements of composite cross-section of light concrete on porous aggregates [K raschetu izgibaemyh elementov sostavnogo secheniya iz legkih betonov na poristyh zapolnitelyah]. Construction and reconstruction. 2012. No. 2(40). Pp. 38–43. (rus)

5. Dronova A.V., Smolyago G.A. Frame structural systems of low-rise residential buildings made of monolithic expanded clay concrete [Karkasnye konstruktivnye sistemy maloetazhnyh zhilyh domov iz monolitnogo keramzitobetona]. Belgorod, 2016. 158 p. (rus)

6. Kryuchkov A.A., Smolyago E.G. Experimental studies of crack resistance of prefabricated monolithic bent reinforced concrete elements [Eksperimental'nye issledovaniya treshchinostojkosti sborno-monolitnyh izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov]. Construction and reconstruction. 2010. No. 1(27). Pp. 47–54. (rus)

7. Dronov A.V. Strength and deformability of reinforced concrete bendable elements with corrosion damage.: Dis. ... candidate of Technical Sciences [Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov s korrozionnymi povrezhdeniyami.: Dis. ... kand.tekhn. nauk]. Belgorod, 2017. 143 p. (rus)

8. Frolov N.V., Smolyago G.A. Calculation of the strength of normal sections of bent reinforced concrete elements with corrosion damage to concrete of the compressed zone [Raschet prochnosti normal'nyh sechenij izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov s korrozionnymi povrezhdeniyami betona szhatoy zony]. Safe and comfortable city: Collection of scientific papers based on the materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference. Orel, 2019. Pp. 121–127. (rus)

9. Smolyago E.G., Lutsenko A.N. Experimental studies of crack resistance of prestressed prefabricated monolithic bent reinforced concrete elements [Eksperimental'nye issledovaniya treshchinostojkosti predvaritel'no napryazhennyh sborno-monolitnyh izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. Belgorod. 2010. No. 1. Pp. 68–72. (rus)

10. Bachinsky V.Ya., Bambura A.N., Golodnov A.I., Zhdanov A.E. Bearing capacity of reinforced

concrete beams under force and deformation effects [Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnyh balok pri silovyh i deformatsionnyh vozdeystviyah]. NIISK Gosstroy of the USSR. Kiev, 1986. 9 p. Dep. VNIIS Gosstroy of the USSR, No. 6807, issue 6.

11. Smolyago G.A., Zhdanov A.E., Ishchuk Ya.L., Frolov N.V. Calculation of deformability of bent reinforced concrete elements of variable stiffness [Raschet deformativnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh elementov peremennoj zhestkosti]. "Loleitovskiyе readings-150". Modern methods of calculation of reinforced concrete and stone structures by limiting conditions: A collection of reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Professor, author of the methodology for calculating reinforced concrete structures by the stage of destruction, founder of the Soviet scientific school of reinforced concrete theory, founder and first head of the Department of Reinforced Concrete Structures of the Moscow Institute of Civil Engineering (MISI) A.F. Loleita, M., 2018. Pp. 385–390. (rus)

12. Mailyan L.R., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Nazhnev M.P. Setting a diagram approach to calculating vibrated, centrifuged and vibrocentrifuged reinforced concrete columns with a variatropic structure. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. No. 1(49). Pp. 30–44. doi:10.36622/VSTU.2021.49.1.003

13. Kharlamov A.V. Calculation of statically indeterminate reinforced concrete structures using step-iterative methods [Raschet staticheski neopredelimyyh zhelezobetonnyh konstrukcij s ispol'zovaniem shagovo-iteracionnyh metodov]. Innovations. The science. Education. 2021. No. 32. Pp. 1465–1469. (rus)

14. Mailyan L.R., Stelmakh S.A., Shcherban E.M. Calculation and design of building structures taking into account the variatropy of structure, cross sections and differentiation of structural characteristics of materials [Raschet i proektirovanie stroitel'nyh konstrukcij s uchetom variatropii struktury, sechenij i differenciacii konstruktivnyh harakteristik materialov]. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2021. No. 2(62). Pp. 27–48. (rus)

15. Kryuchkov A.A. Theoretical and experimental study of the stress-strain state of reinforced concrete core elements based on a refined methodology [Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh sterzhnevyyh elementov na osnove utochnennoj metodiki]. Izvestiya VUZov. The North Caucasus region. Technical sciences. Appendix No. 11. Novochoerkassk. 2006. Pp. 70–73. (rus)

Information about the authors

Krjuchkov, Andrey A. PhD, Assistant professor. E-mail: krjuchkov@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 27.01.2022

Для цитирования:

Крючков А.А. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов сплошного и составного сечения на основе уточненной нелинейной методики расчета // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 82–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91

For citation:

Krjuchkov A.A. Stress-strain state of bent reinforced concrete elements of continuous and composite cross-section based on a refined nonlinear calculation method. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 82–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-82-91