

Поцебин Виктор Владимирович
Potsebin Viktor Vladimirovich
Ростовский Государственный Строительный Университет (РГСУ)
Rostov State University of Civil Engineering
Аспирант/Postgraduate student

Щуцкий Виктор Лукьянович
Shchutskiy Viktor Lukyanovich
Ростовский Государственный Строительный Университет (РГСУ)
Rostov State University of Civil Engineering
Декан института промышленного и гражданского строительства
Dean of Civil Engineering faculty

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения
E-Mail: ru.victa@gmail.com

К расчету прочности изгибаемых элементов железобетонных конструкций кольцевого сечения

Calculation of the flexural strength of reinforced concrete ring sections

Аннотация: В статье изложена методика расчета прочности элементов железобетонных конструкций кольцевого сечения с использованием нелинейной деформационной модели, выполнен сопоставительный анализ результатов расчета различными методами для сечений с различным армированием и даны рекомендации по выбору метода расчета и вида диаграммы деформирования бетона.

The Abstract: The article describes the method of calculating the flexural strength of reinforced concrete ring sections using fiber section model, analyzes the results of different methods of calculating strength calculation with different reinforcement and makes recommendations on the choice of the method of calculation and the type stress-strain diagram of concrete.

Ключевые слова: Железобетонные элементы, кольцевые сечения, численный расчет, деформационная модель, диаграммный метод.

Keywords: Concrete structures, ring sections, numerical calculations, fiber section model, integral constitutive model.

Введение

Для расчета прочности изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов кольцевого сечения в течение многих лет применялся метод предельных усилий, который был разработан и экспериментально обоснован С. Т. Андросовым, В. Н. Лебедевым и Т. Ф. Нагорной под руководством В. М. Баташева [4]. Расчетные формулы данного метода были получены с учетом прямоугольных эпюр напряжений в бетоне и арматуре сжатой зоны и криволинейной эпюры в арматуре растянутой зоны. В нормативные документы, в частности

СНиП II-21-75 [2] и СНиП 2.03.01-84* [1], этот метод вошел в несколько упрощенном виде [5].

В то же время СП 52-101-2003 [3] приводит рекомендации по расчету прочности нормальных сечений методом предельных усилий лишь для «железобетонных элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений с арматурой, расположенной у перпендикулярных плоскости изгиба граней элемента, при действии усилий в плоскости симметрии нормальных сечений» (п. 6.2.2). Для всех остальных случаев, согласно рекомендациям СП 52-101-2003, расчет по прочности следует производить на основе нелинейной деформационной модели.

Метод расчета прочности на основе нелинейной деформационной модели включен в европейские нормы, строительные нормы и своды правил России, нормы Беларуси и других стран. Этот метод основан на использовании нелинейных диаграмм деформирования материалов и линейного закона распределения относительных деформаций бетона и арматуры по площади поперечных сечений элементов.

Основные соотношения нелинейной деформационной модели для расчета кольцевых сечений.

Напряженно-деформированное состояние кольцевого сечения при действии продольной сжимающей или растягивающей силы и изгибающего момента в одной плоскости можно описать системой двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} M &= D_{11}\chi + D_{12}\varepsilon_0; \\ N &= D_{12}\chi + D_{22}\varepsilon_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

χ – кривизна элемента; ε_0 – относительная деформация в точке начала координат;

D_{11} , D_{12} и D_{22} – жесткостные характеристики сечения.

Для решения системы уравнений (1) используем метод переменных параметров упругости. Рассматриваемое сечение разбиваем на малые элементы, в пределах которых деформацию и напряжение считаем постоянными (см. *Рис. 1*).

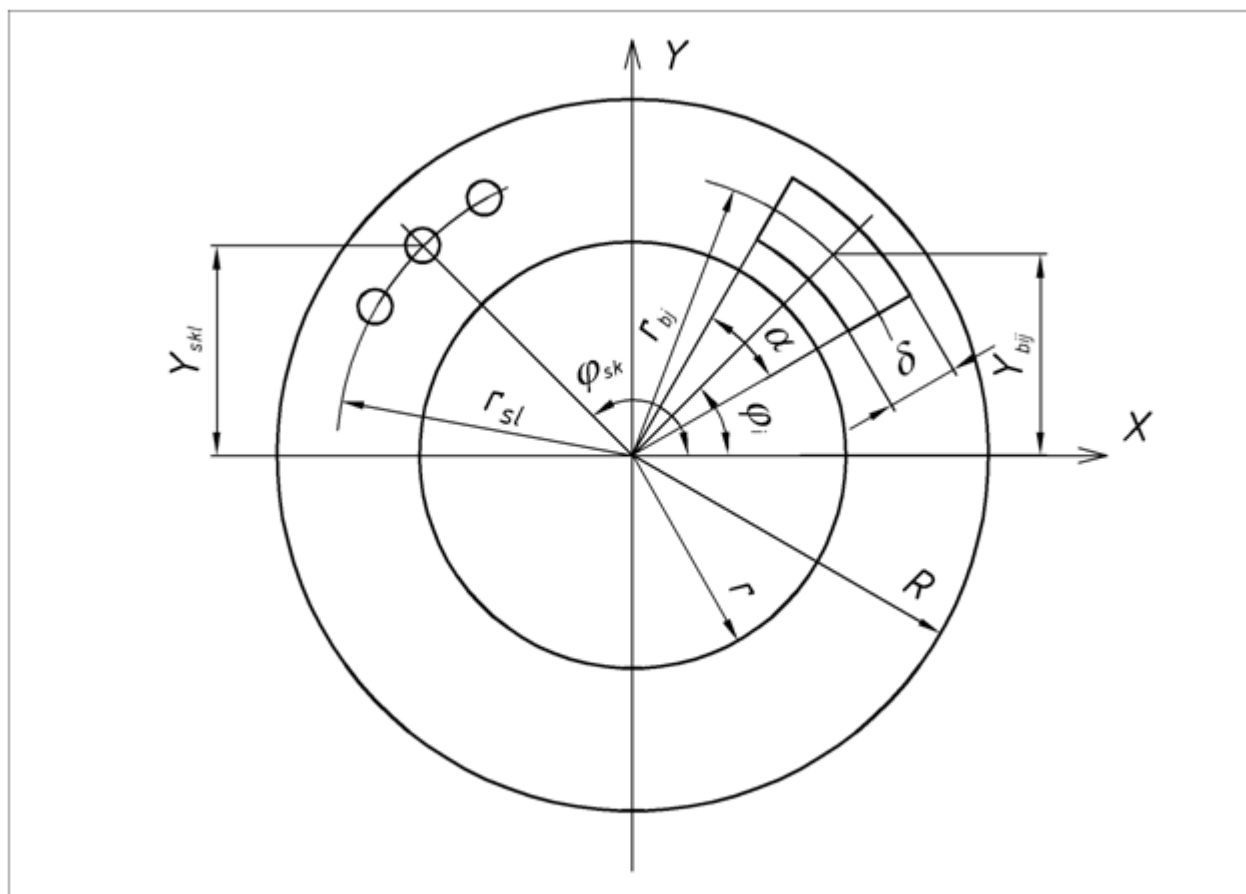


Рис. 1. Расчетная схема сечения

Разделим кольцевое сечение на n равных кольцевых секторов, ограниченных углом α , где номера секторов $i = 0, 1, \dots, n - 1$. Каждый такой сектор разделим на m полос одинаковой толщины δ , где номера полос $j = 0, 1, \dots, m - 1$. Тогда площадь i -ой полосы, центр тяжести которой расположен на окружности радиусом r_{bj} , можно определить по формуле

$$A_{bij} = r_{bj} \cdot \alpha \cdot \delta, \quad (2)$$

а расстояние от центра тяжести этой полосы до оси x по формуле

$$Y_{bij} = r_{bj} \sin \varphi_i, \quad (3)$$

где

$$r_{bj} = r + (j + 0,5) \delta; \quad \delta = \frac{R - r}{m}; \quad \varphi_i = \frac{2\pi i}{n}. \quad (4)$$

Пусть в сечении имеется v окружностей с номерами $l = 0, 1, \dots, v - 1$, на каждой из которых расположено t стержней с номерами $k = 0, 1, \dots, t - 1$, тогда расстояние от центра тяжести k -го арматурного стержня, расположенного на окружности радиусом r_{sl} , до оси x можно определить по формуле

$$Y_{skl} = r_{sl} \sin \varphi_k, \quad \text{где } \varphi_k = \frac{2\pi k}{t}. \quad (5)$$

В качестве переменных параметров упругости примем секущие модули упругости бетона E_{bij}^* и стали E_{skl}^* . Учитывая, что секущие модули упругости выражаются формулами

$$E_{bij}^* = \frac{\sigma_{bij}}{\varepsilon_{bij}}, \quad E_{skl}^* = \frac{\sigma_{skl}}{\varepsilon_{skl}}, \quad (6)$$

запишем выражения для жесткостных характеристик D_{11} , D_{12} и D_{22} , входящих в уравнение (1):

$$\begin{aligned} D_{11} &= \sum_{ij} A_{bij} Y_{bij}^2 E_{bij}^* + \sum_{lk} A_{skl} Y_{skl}^2 E_{skl}^*; \\ D_{12} &= - \left(\sum_{ij} A_{bij} Y_{bij} E_{bij}^* + \sum_{lk} A_{skl} Y_{skl} E_{skl}^* \right); \\ D_{22} &= \sum_{ij} A_{bij} E_{bij}^* + \sum_{lk} A_{skl} E_{skl}^*. \end{aligned} \quad (7)$$

На первом шаге расчета значения E_{bij}^* и E_{skl}^* принимаем равными их начальным значениям. Далее, решая систему уравнений (1), находим значения χ , ε_0 и определяем деформации в каждой бетонной площадке и каждом арматурном стержне, в соответствии с гипотезой плоских сечений:

$$\varepsilon_{bij} = \varepsilon_0 - \chi Y_{bij}, \quad \varepsilon_{skl} = \varepsilon_0 - \chi Y_{skl}. \quad (8)$$

Затем значения секущих модулей уточняем по формулам

$$E_{bij}^* = \frac{f(\varepsilon_{bij})}{\varepsilon_{bij}}, \quad E_{skl}^* = \frac{f(\varepsilon_{skl})}{\varepsilon_{skl}}, \quad (9)$$

где в качестве функций $f(\varepsilon_{bij})$ и $f(\varepsilon_{skl})$ могут использоваться любые диаграммы деформирования бетона и арматуры, аппроксимирующие их нелинейную работу.

Процедура итерационного расчета повторяется до тех пор, пока выполняются неравенства:

$$\left| \frac{\varepsilon_{0i} - \varepsilon_{0i-1}}{\varepsilon_{0i}} \right| \geq \Delta_1; \quad \left| \frac{\chi_i - \chi_{i-1}}{\chi_i} \right| \geq \Delta_2; \quad i \leq i_{\max}, \quad (10)$$

где

i – порядковый номер итерации;

Δ_1 и Δ_2 – некоторые малые критерии точности;

i_{\max} – максимально разрешенное число итераций, вводимое для предотвращения заикливания итерационного процесса.

Результаты численного расчета

Расчет кольцевых сечений двумя рассматриваемыми методами реализован автором в виде программ для ЭВМ. Всего было рассчитано четыре типа сечения, с различными процентами армирования на действие изгибающего момента (см. Рис. 2). При расчете сечений по нелинейной деформационной модели использовались двухлинейная и трехлинейная диаграммы деформирования бетона, рекомендованные сводом правил [3], криволинейная диаграмма деформирования бетона, рекомендованная нормами [7], а также двухлинейная диаграмма для стали с физическим пределом текучести, рекомендованная [3]. Результаты расчета представлены в таблице.

Выводы

Во всех рассмотренных случаях расчет по методу предельных усилий показал результаты близкие к результатам расчета по нелинейной деформационной модели, поэтому этот метод допустимо использовать для оценки прочности изгибаемых железобетонных элементов кольцевого сечения.

Значения предельных моментов, кНм при расчете прочности				
Процент армирования сечения, %	по методу предельных усилий	по нелинейной деформационной модели		
		двухлинейная диаграмма	трехлинейная диаграмма	криволинейная диаграмма
0.63	182	176	175	176
1.25	358	340	340	339
2.55	642	649	648	647
4.44	989	1044	1044	1041

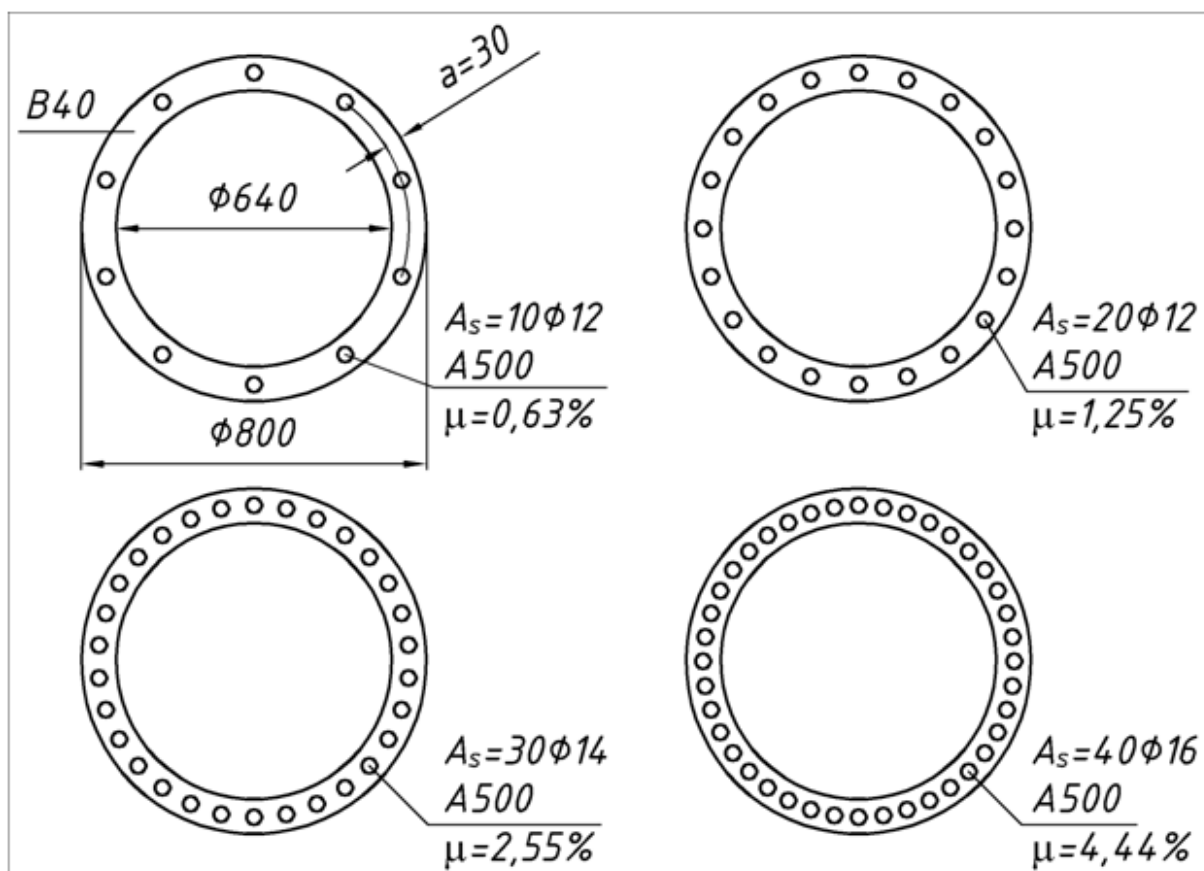


Рис. 2. Характеристики рассчитываемых сечений

В случае применения деформационной модели допустимо использовать как двухлинейную, так трехлинейную и криволинейную диаграммы деформирования бетона, поскольку результаты получаемые при использовании данных диаграмм очень близки.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. — М. : Госстрой СССР, 1989. — 78 с.
2. СНиП II-21-75 Бетонные и железобетонные конструкции. — М. : Стройиздат, 1976. — 86 с.
3. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного преднапряжения арматуры. — М. : ФГУП ЦПП, 2004. — 53 с.
4. Баташев В.М. Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многоярным армированием. — Киев : Будівельник, 1978. — 120 с.
5. Баташев В.М. Расчет прочности элементов кольцевого сечения по СНиП II-21-75 // Бетон и железобетон. 1976. № 12. — С. 29-31.
6. Поцебин В.В., Щуцкий В.Л. Влияние сочетания напрягаемой и ненапрягаемой арматуры на прочность центрифугированных железобетонных опор ЛЭП кольцевого сечения // Материалы международной научно-практической конференции "Строительство-2011" — Ростов-на-Дону : РГСУ, 2011.
7. ENV 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings. — Brussels : European Committee for Standardization, 1992.