

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ, ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ

Лазовский Е.Д., Глухов Д.О.

В данной статье рассматривается состояние вопроса нелинейных расчетов строительных конструкций, в частности железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

Введение. Внедрение и совершенствование новых строительных технологий и конструкций приносит в отрасль новые требования к развитию нормативной технической документации, совершенствованию существующих и разработки новых методов в области проектирования и расчета строительных конструкций. Новые системы контроля качества производства строительных материалов и изделий, включающие полный перечень необходимых контрольных мероприятий, обеспечивающих гарантированный уровень надежности на стадии производства, выдвигают новые требования к полному использованию ресурсов строительных материалов, использованных для изготовления конструкции. Это, в свою очередь, ведет к необходимости совершенствования существующих методов расчета строительных конструкций с целью повышения их точности, без снижения целевого уровня надежности для конечного потребителя.

Вместе с тем, заказчика, зачастую, интересует работа конструкции (элемента) на всех стадиях ее эксплуатации, вплоть до предельной, что особенно актуально в случае определения фактического технического состояния конструкции и резерва ее несущей способности при реконструкции [1].

Одним из важнейших факторов, определяющих эксплуатационную безопасность конструкции (конструктивного элемента), является соответствие принятой расчетной модели действительному характеру работы анализируемой конструкции, либо отдельного конструктивного элемента.

Методики расчета, заложенные в нормы проектирования и расчета железобетонных конструкций [2, 3], за редким исключением, используют линейные расчетные модели, не позволяющие учесть историю нагружения элемента, последовательность приложения тех или иных нагрузок, цикличность загрузений, абсолютно нелинейные неупругие свойства материалов бетона и частично арматуры.

Вместе с тем, современное развитие электронно-вычислительной техники и алгоритмов поиска решений позволяет реализовывать в виде компьютерных программ сколь угодно сложные расчетные модели, способные учесть значительную часть элементов нелинейности для повышения точности инженерных расчетов строительных конструкций и их элементов.

Основная часть. Одной из наиболее интересных для решения представляется задача нелинейной работы сечений изгибаемых железобетонных элементов в зоне действия изгибающих моментов, продольных и поперечных сил. Пути решения может быть моделирование железобетонных элементов с помощью современных программ для конечно-элементного анализа (Ansys, Abaqus, SCAD, др.) [4-6] с заданием точных характеристик и нелинейных диаграмм материалов и контактных соединений. Однако, ввиду сложности реализации для различных элементов и необходимости точного задания входных параметров не позволяет широко применять моделирование в практике строительного проектирования. Наиболее перспективным представляется использование расчетных моделей сечений элементов. В качестве основы для рассмотрения нелинейности может быть использована наиболее широко применяемая методика, основанная на положениях модифицированной теории полей сжатия (МСФТ) [7] и общей деформационной модели.

При применении деформационных методов расчета железобетонных элементов, находящихся в плоском напряженном состоянии (в частности метод «модифицированной теории сжатых полей»), сам железобетон с наклонными трещинами рассматривается как некий не-

прерывный материал, обладающий определенными свойствами, которые меняются в зависимости от степени нагружения. Учитывая это, в расчетах на стадии после образования трещин рассматривают средние напряжения и относительные деформации в бетоне и арматуре, полученные путем осреднения на определенной базовой площадке, ориентированной поперек нескольких наклонных трещин, включая относительные деформации от раскрытия трещин.

Аналогично расчету прочности изгибаемых железобетонных элементов по нормальным сечениям с использованием деформационной модели, «модифицированная теория сжатых полей» предлагает рассчитывать все параметры напряженно-деформированного состояния поперечного сечения зоны среза: напряжения в бетоне σ_{cx} , σ_{cy} , σ_{c1} , σ_{c2} , τ_{xy} , напряжения в арматуре σ_{sx} , σ_{sy} , относительные деформации элементарного участка ε_x , ε_y , γ_{xy} , а также угол θ (определяющий положение наклонных трещин и главных напряжений). Участки рассматриваются поочередно, последовательными приближениями, предварительно задавшись распределением касательных напряжений τ_{xy} и продольных деформаций ε_x по высоте сечения. Уравнения равновесия для зоны среза изгибаемого элемента при действии изгибающего момента M_{Ed} , продольных N_{Ed} и поперечных сил V_{Ed} имеют вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \sigma_{cx(i)} b(i) h(i) + \sum_{j=1}^n \sigma_{sx(j)} A_{s(j)} &= N_{Ed} \\ \sum_{i=1}^m \sigma_{cx(i)} b(i) h(i) (y_{c(i)} - y_{c0}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{sx(j)} A_{s(j)} (y_{s(j)} - y_{c0}) &= M_{Ed} \\ \sum_{i=1}^m \tau_{xy(i)} b(i) h(i) &= V_{Ed} \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения равновесия и совместности деформаций для плоской элементарной площадки при использовании модели переменного угла выглядят следующим образом:

Уравнения равновесия и совместности деформаций для элементарной площадки выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{c2} \cos^2 \alpha + \sigma_{c1} \sin^2 \alpha + \rho_x \sigma_{sx} \\ \sigma_y &= \sigma_{c2} \sin^2 \alpha + \sigma_{c1} \cos^2 \alpha + \rho_y \sigma_{sy} \\ \tau_{xy} &= (-\sigma_{c2} + \sigma_{c1}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_{c2} \cos^2 \alpha + \varepsilon_{c1} \sin^2 \alpha \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_{c2} \sin^2 \alpha + \varepsilon_{c1} \cos^2 \alpha \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} &= (-\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{c1}) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ_x, ρ_y – процент армирования в продольном и поперечном направлениях соответственно.

Начальное распределение касательных напряжений по высоте анализируемого сечения может задаваться равномерным, параболическим, либо по другому закону. Для уточнения начального распределения может применяться метод «двух сечений» [8]. При этом принимается линейная зависимость между касательными напряжениями и сдвиговыми деформациями (постоянный модуль сдвига).

Модифицированная теория полей сжатия опирается, помимо вышеназванных, на следующие предпосылки:

- в пределах отдельных элементарных участков и по сечению арматурных стержней распределение относительных деформаций и напряжений является равномерным;

- средние напряжения, а также средние относительные деформации в железобетонном элементе, находящемся в условиях плоского напряженного состояния, связаны теорией напряженных состояний (кругами Мора);

- главные растягивающие напряжения изменяются по ширине сжатой бетонной полосы от нуля в сечении с трещиной, до некоторого максимума в середине расстояния между трещинами. В расчетах используют средние величины главных растягивающих напряжений, рассматривая их как функцию от средних растягивающих деформаций для элемента с наклонными трещинами.

- в сечении, проходящем вдоль наклонной трещины, действуют касательные напряжения, вызванные зацеплением по берегам трещины, описываемые эмпирически [7];

- бетон в сжатой полосе между наклонными трещинами находится в условиях двухосного напряженного состояния, в связи с этим для расчетов используется трансформированная с учетом эффекта разупрочнения диаграмма деформирования (рис.2), описанная полиномом второй степени

$$\sigma_{c2} = \sigma_{c2,max} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right]; \quad (2)$$

либо любым другим описанием, способным учесть историю нагружений и длительность действия нагрузки с учетом ползучести бетона.

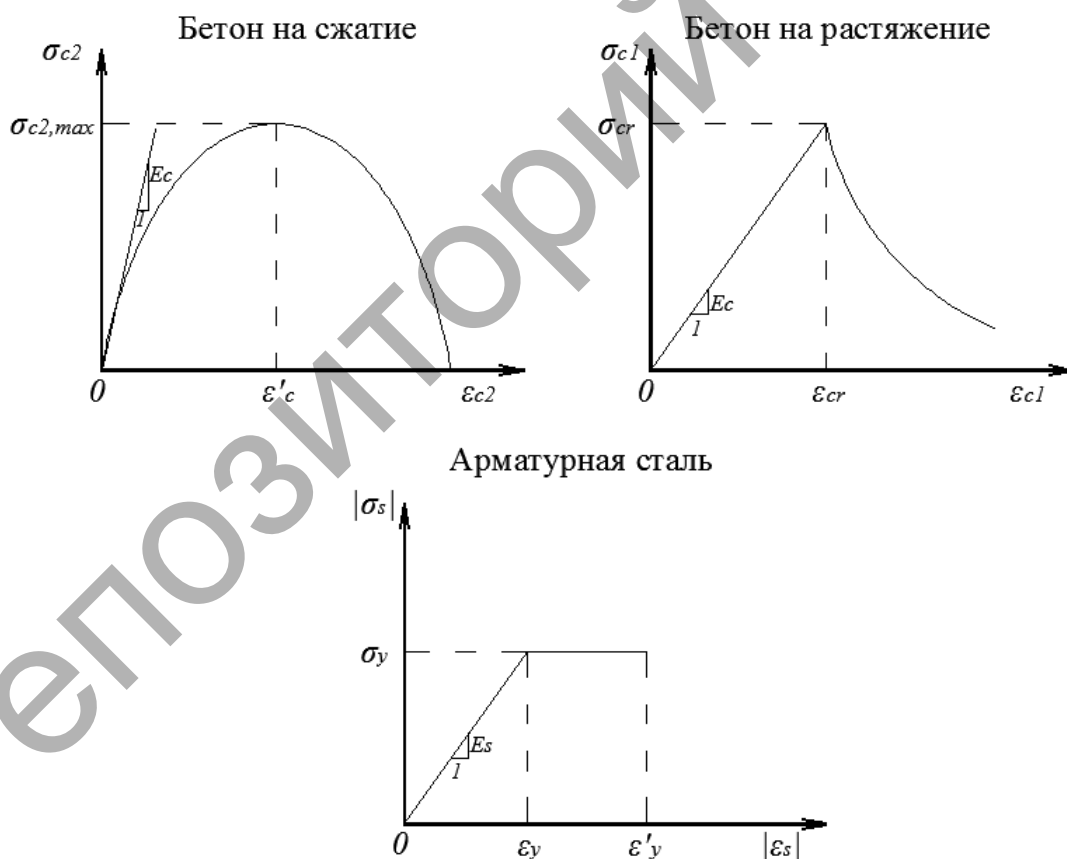


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования материалов, используемые в расчетах по МСФТ в общем случае

- при деформационных расчетах принимается гипотеза плоских сечений в постановке Мурашова-Немировского [9-10].

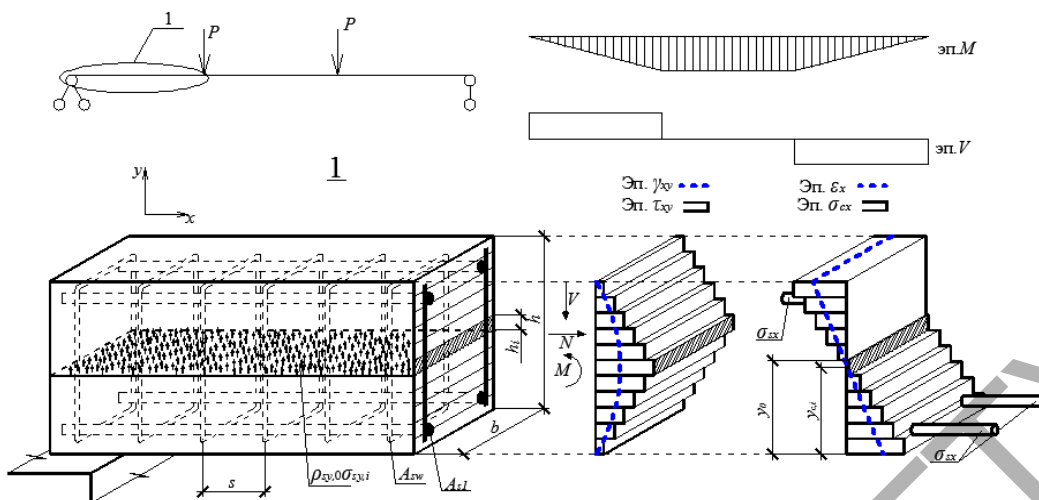


Рисунок 2 – Распределение касательных и нормальных напряжений и относительных деформаций в изгибаемом железобетонном элементе в зоне действия поперечных сил

Для реализации расчетов с использованием данной методики рекомендуется использовать метод последовательных нагружений. Таким образом, в результате расчетов вычисляются параметры напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента на любой стадии работы, вплоть до разрушения. При этом критерием достижения элементов предельного состояния может задаваться любое из требуемых значений деформаций бетона, арматуры, сечения в целом.

Выводы. Использование методики расчета сечений железобетонных элементов, основанной на положениях модифицированной теории полей сжатия и общей деформационной модели позволяет реализовать физически обоснованный нелинейный расчет при совместном действии в сечении изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

Список источников

1. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании / А.В. Перельмутер, В.В. Тур // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 13(3) 86-102 (2017) pp 86-102
2. ACI Building Code Requirements for Reinforced Concrete : ACI 318-05 and Commentary (318-95R) / American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995. – 369 p.
3. ТКП EN 1992-1-1. – 2009* Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: – 219 p.
4. Becker A.A. Understanding Non-linear Finite Element Analysis Through Illustrative Benchmarks. Glasgow, NAFEMS, 2001, 170 pages.
5. Попов А.Н., Хатунцев А.А. и др. Пространственный деформационный нелинейный расчет железобетонных изгибаемых конструкций методом конечных элементов / А.Н. Попов, А.А. Хатунцев и др. // «НАУКОВЕДЕНИЕ» №5 2013
6. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций / Клованич С.Ф., Безушко Д.И. – Одесса: изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с
7. Vecchio F.J., Collins M.P. // The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear / ACU. v. 83, N2, March-April 1986, pp.219-231.
8. Vecchio F.J. // Analysis based on the Modified Compression Field Theory / IABSE Colloq. On Structural Concrete, Stuttgart, 1991, IABSE Report, v. 62, pp.321-326
9. Мурашов, В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. / В.И. Мурашов. – М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.
10. Немировский, Я.М. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружениях / Я.М. Немировский // Бетон и железобетон. –1955.– №5. – С. 172-176.