

УДК 624.012.35

Ромашко Василий Николаевич

*Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
Национальный университет водного хозяйства и природопользования
г. Ровно, Украина*

Romashko Vasyl

*Ph. D. in Engineering, associate professor, head of chair
National University of Water Management and Nature Recourses Use
Rivne, Ukraine*

РАСЧЕТ ПРОГИБОВ СЛОЖНОДЕФОРМИРУЮЩИХСЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОНСТРУКЦИЙ

CALCULATION OF THE DEFLECTIONS OF COMPLICATED DEFORMING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

***Аннотация.** В статье рассматривается рациональный способ определения прогибов кососжимаемых железобетонных элементов, базирующийся на прямом использовании функции кривизны из обобщенной диаграммы их состояния.*

***Ключевые слова:** железобетон, косое сжатие, элементы, конструкции, деформирование, жесткость, кривизна, прогибы.*

***Summary.** The article deals with rational way of determining the oblique compressed reinforced concrete elements deflection, based on the direct use of curvature function of the generalized phase diagram.*

***Keywords:** reinforced concrete, oblique compression, elements, structures, deformation, stiffness, curvature, deflections.*

Вступление. Практически во всех известных на сегодня моделях деформирования прогибы железобетонных элементов и конструкций прямо увязываются с их кривизной. Тем не менее, соответствующих аналитических

зависимостей для определения последней, которые были бы достаточно обоснованы с физической точки зрения, до сих пор так и не предложено. Более того, существующие на сегодня методики расчета кривизны даже тех железобетонных элементов и конструкций, которые деформируются лишь только в одной плоскости, практически не увязываются с диаграммами их состояния. Поэтому настоящая статья направлена на разработку универсальной методики расчета прогибов железобетонных элементов и конструкций, включая и косодеформирующиеся, которая была бы прямо связана с диаграммами их состояния и являлась бы составной частью единой обобщенной методики расчета железобетонных элементов и конструкций по предельным состояниям.

Обзор литературы. В общем прогиб, являясь некой интегральной характеристикой, относится к тем основным параметрам напряженно-деформированного состояния элементов и конструкций, значения которых можно проконтролировать либо прямо измерить во время экспериментальных исследований. Его же теоретические значения определяют исходя из:

- упрощенных методик [2] для наиболее простых схем закрепления и деформирования железобетонных элементов и конструкций;
- энергетических методов, связанных с точными [3] или с приближенными [4] способами вычисления интеграла Мора;
- прямого интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки с упрощенными способами его решения графоаналитическими методами [7] или методами начальных параметров [8];
- усредненных значений по двум возможным случаям деформирования: по отсутствию и наличию трещин в расчетном сечении.

Важно отметить, что отдельные недостатки расчета прогибов за этими методами в условиях плоского деформирования железобетонных элементов и конструкций еще больше усугубляются при их косом деформировании.

Результаты исследований. Детальный анализ вышеупомянутых методик расчета показывает, что в обобщенной модели деформирования железобетонных элементов и конструкций энергетические методы могут быть

одними из наиболее эффективных при вычислениях прогибов и перемещений. Для этого необходимо располагать аналитической зависимостью или функцией усредненной кривизны железобетонного элемента вдоль его оси. Подобная функция обеспечит получение эпюры усредненной кривизны элемента, как на его отдельных участках, так и в пределах отдельных блоков между трещинами.

Поскольку реализация энергетических методов обычно сводится к точным или приближенным вычислениям интеграла Мора, то ее удобнее осуществлять путем разбивки элемента на ряд парных участков (рекомендуется $n \geq 10$) с определением кривизны на их границах.

При линейном распределении кривизны в пределах каждого участка, перемножение эпюры кривизны от силовой нагрузки с эпюрой моментов от единичной нагрузки целесообразно осуществлять по правилу трапеций [1]

$$f = \frac{l}{n} \left(\frac{m_{\delta 0}}{2} \frac{1}{r_{\delta 0}} + \frac{m_{\delta n}}{2} \frac{1}{r_{\delta n}} + m_{\delta 1} \frac{1}{r_{\delta 1}} + \dots + m_{\delta i} \frac{1}{r_{\delta i}} + \dots + m_{\delta, n-1} \frac{1}{r_{\delta, n-1}} \right), \quad (1)$$

где $m_{\delta 0}, \dots, m_{\delta n}$ - ординаты эпюры моментов от единичной силы в направлении оси X на границах каждого участка (рис. 1);

$1/r_{\delta 0}, \dots, 1/r_{\delta n}$ - ординаты эпюры кривизны от внешней нагрузки на границах тех же участков.

При нелинейном распределении кривизны на отдельных участках железобетонного элемента (рис.1) его прогибы в практических расчетах рекомендуется вычислять по формуле Симпсона [1, 5]

$$f = \frac{l}{3n} \left[m_{\delta 0} \frac{1}{r_{\delta 0}} + m_{\delta n} \frac{1}{r_{\delta n}} + 4 \cdot \left(m_{\delta 1} \frac{1}{r_{\delta 1}} + m_{\delta 3} \frac{1}{r_{\delta 3}} + \dots + m_{\delta, n-1} \frac{1}{r_{\delta, n-1}} \right) + 2 \cdot \left(m_{\delta 2} \frac{1}{r_{\delta 2}} + m_{\delta 4} \frac{1}{r_{\delta 4}} + \dots + m_{\delta, n-2} \frac{1}{r_{\delta, n-2}} \right) \right]. \quad (2)$$

Эффективность использования зависимостей (1) и (2) в практических расчетах будет существенно возрастать, если их связывать с обобщенной диаграммой состояния железобетонных элементов и конструкций [6]

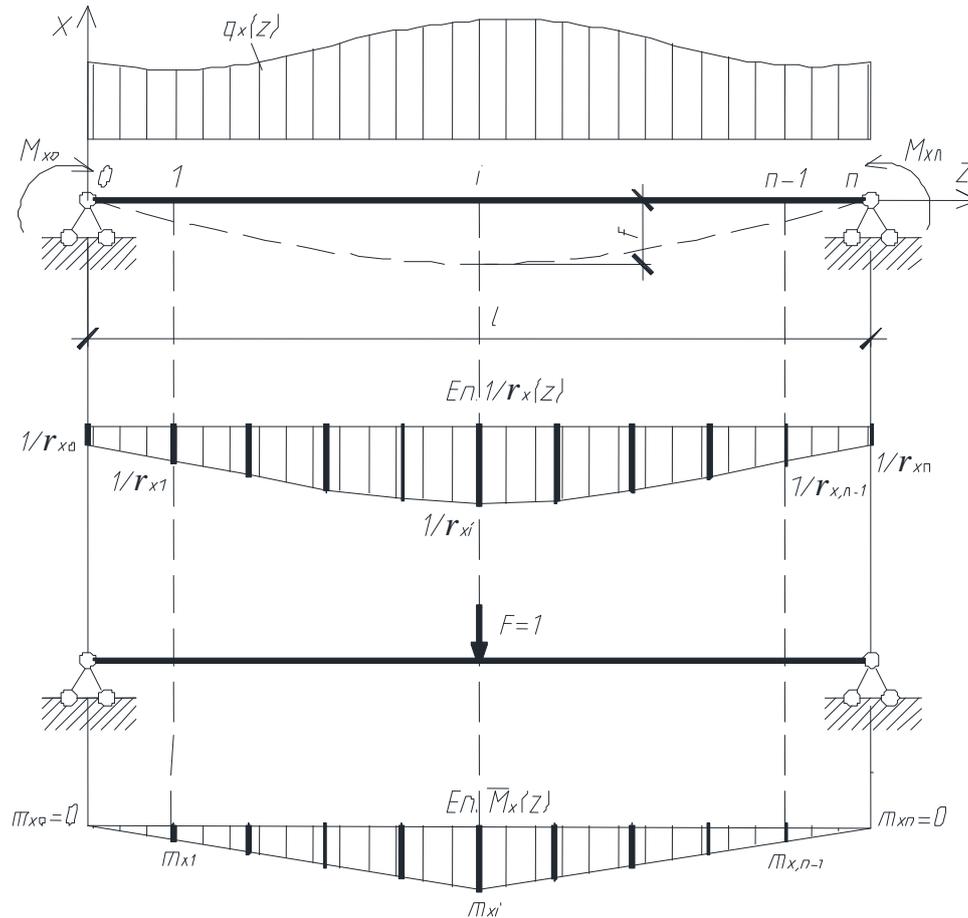


Рис. 1. К обобщенной методике определения прогибов

$$M = \frac{D_o \cdot (1/r) - M_u \cdot ((1/r)/(1/r_u))^2}{1 + (D_o / M_u - 2/(1/r_u)) \cdot (1/r)}, \quad (3)$$

где D_o – начальное значение приведенной жесткости железобетонного элемента;

M_u – несущая способность железобетонного стержня;

$1/r_u$ – предельное значение кривизны железобетонного элемента.

В этом случае ординаты кривизны элемента в любом его сечении можно довольно легко определить по формуле

$$\frac{1}{r} = \frac{1/r_u}{2M_u} \left[\left(1 - \frac{M}{M_u}\right) \frac{D_o}{r_u} + 2M - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M}{M_u}\right) \frac{D_o}{r_u} + 2M\right)^2 - 4M \cdot M_u} \right]. \quad (4)$$

Вышеописанная методика может быть использована для расчета прогибов как плоско-, так и косодеформирующихся элементов и конструкций. Правда, при расчете последних следует учитывать некоторые особенности их

напряженно-деформируемого состояния (рис.2).

Известно, что в гибком кососжимаемом элементе, вследствие развития прогибов, угол наклона силовой плоскости меняется от своего начального значения β_i до некоторого предельного значения β_f . При этом, из-за непропорционального смещения его сечений в направлении плоскостей, проходящих через геометрические оси сечения \tilde{O}_i и \acute{O}_i , происходит непропорциональный рост изгибающих моментов в указанных направлениях. Тем не менее, это не мешает рассчитывать прогибы таких элементов по аналогии с внецентренно сжатыми при начальном эксцентриситете продольной силы относительно нейтральной оси

$$e = \varepsilon_{c2} / (1/r) + e_{\tilde{n}} + f, \quad (5)$$

где
$$e_{\tilde{n}} = (e_o \cdot \cos \beta_o - h_n / 2) \cos \theta + (e_o \cdot \sin \beta_o - b_n / 2) \sin \theta. \quad (6)$$

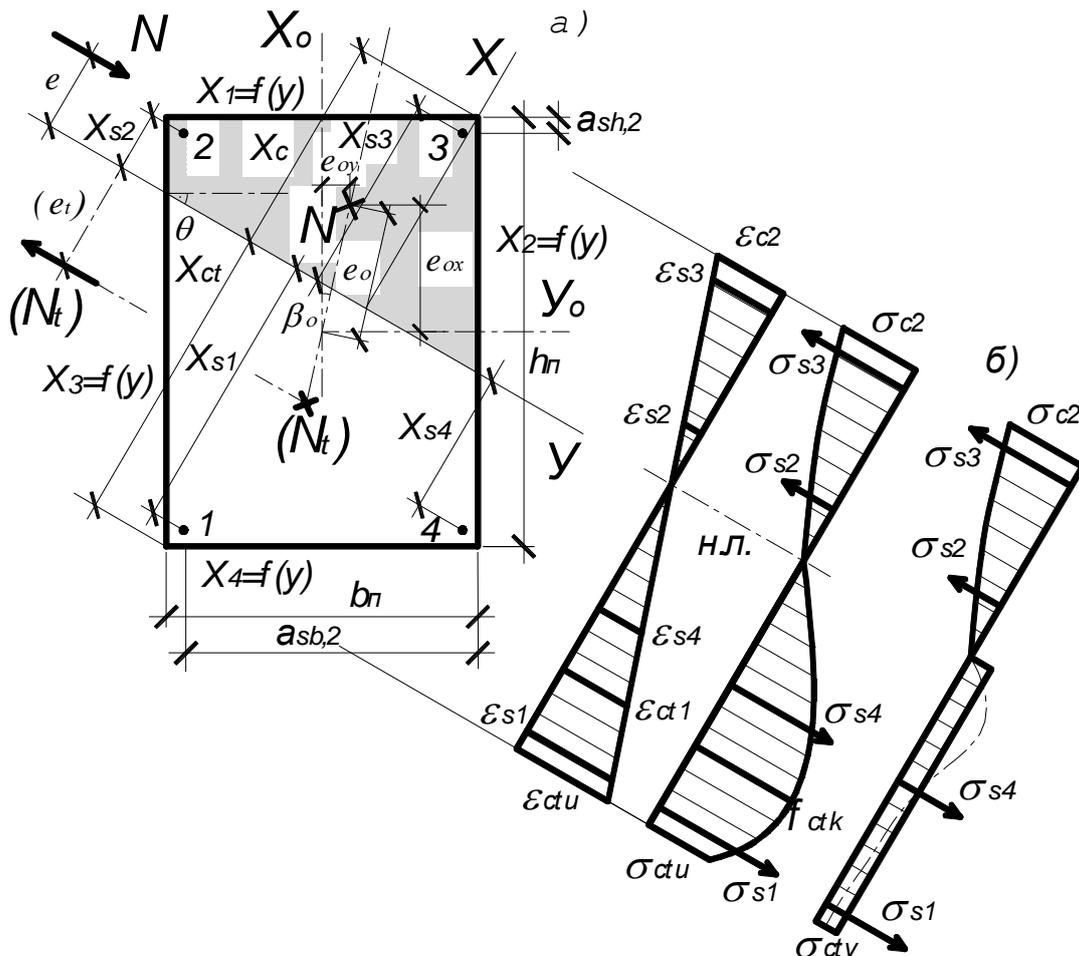


Рис. 2. К напряженно-деформируемому состоянию косодеформируемого элемента

Прогиб кососжимаемого элемента, определенный вышеупомянутым способом, в дальнейшем уточняется вместе с основными параметрами его напряженно-деформированного состояния (ε_{c2} , ε_{s1} , ε_{ctv} , l/r и т.п.) по двум классическим уравнениями равновесия до неоспоримого выполнения условия

$$|(f_{i-1} - f_i) / f_{i-1}| \leq \delta = 0,01, \quad (7)$$

где f_{i-1} и f_i - прогибы железобетонного элемента на этапах вычислений.

Принимая во внимание возможное отличие между расчетными длинами кососжимаемого элемента в плоскостях \tilde{O}_i и \hat{O}_i , в практических расчетах его прогибы рекомендуется рассчитывать упрощенным способом. Используя функцию кривизны (4), за выражениями (1) или (2) определяются максимально возможные значения эксплуатационных прогибов железобетонного элемента f_{3x} и f_{3y} при углах наклона силовой плоскости 0° и 90° . Результирующую величину эксплуатационного прогиба и значение угла наклона действительной линии прогибов к вертикали следует вычислять по формулам

$$f_i = \sqrt{f_{xi}^2 + f_{yi}^2}; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \theta_s = (1/r_{\hat{o}i}) / (1/r_{\tilde{o}i}) = f_{\tilde{o}i} / f_{\hat{o}i}, \quad (9)$$

где составляющие указанного прогиба кососжимаемого железобетонного элемента f_{xi} и f_{yi} определяются из общего решения уравнений (8) и (9) при угле наклона действительной линии прогибов к вертикали (нейтральной оси к горизонтали) в первом приближении

$$\operatorname{tg} \theta = (1/r_{\hat{o}}) / (1/r_{\tilde{o}}) \approx \frac{\hat{A}_{\tilde{n}} \cdot I_{x,red} - s_x \cdot l_{ox}^2 \cdot N}{\hat{A}_{\tilde{n}} \cdot I_{y,red} - s_y \cdot l_{oy}^2 \cdot N} \cdot \operatorname{tg} \beta_o, \quad (10)$$

где $I_{x,red}$, $I_{y,red}$ - приведенные моменты инерции сечения элемента в направлении сей $X_{\hat{i}}$ и $\hat{O}_{\hat{i}}$, соответственно;

l_{ox} , l_{oy} - расчетная длина элемента в плоскости того же направления;

s_x , s_y - коэффициенты, зависящие от схемы загрузки и

закрепления элемента в направления тех же плоскостей.

Заключение и выводы. Благодаря результатам выполненных исследований можно констатировать, что:

- кривизну железобетонного элемента целесообразно рассчитывать за диаграммой его состояния до неоспоримого выполнения классических уравнений равновесия;
- прогибы и перемещения железобетонных элементов и конструкций следует вычислять по общим правилам строительной механики в зависимости от их основных деформационных параметров в характерных сечениях вдоль оси.

Литература

1. Березин И.С. Методы вычислений. Том 1 / И.С. Березин, Н.П. Жидков. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 1962. – 464 с.
2. Бидный Г.Р. Расчет прогиба железобетонных балок с учетом влияния поперечной силы / Г.Р. Бидный, И.М. Чупак // Бетон и железобетон. – 1973. – №11. – С.36-38.
3. Гольшев А.Б. Проектирование железобетонных конструкций: справоч. пособие / А.Б. Гольшев, В.Я. Бачинский, В.П. Полищук и др.; под ред. А.Б. Гольшева. – К.: Будівельник, 1985. – 496 с.
4. Залесов А.С. Практический метод расчета железобетонных конструкций по деформациям / А.С. Залесов, В.В. Фигаровский. – М.: Стройиздат, 1976. – 101 с.
5. Кочкаръов Д.В. Робота та несуча здатність залізобетонних елементів за дії осьової стискуючої сили та згину в двох площинах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Кочкаръов Дмитро Вікторович. – Рівне, 2002. – 190 с.
6. Ромашко В.Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций / В.Н. Ромашко // Международный научный журнал (*International Scientific Journal*). – 2016. – №3, – С. 84-86.
7. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов / С.П. Фесик – К.: Будівельник, 1982. – 280 с.
8. Шкурупий А.А. Расчет железобетонных элементов с переменной жесткостью при косом сжатии методом начальных параметров / А.А. Шкурупий // Бетон и железобетон в Украине. – 2000. – № 1. – С. 17-21.