К РАСЧЕТУ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН КРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СОМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ВНЕЦЕНТРЕННОГО СЖАТИЯ И ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА

Давиденко А.А. *Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины*

Аннотация

В статье приведены деформационный метод расчета колонн кругового сечения по сечениям наклонным к продольной оси элемента и результаты экспериментальных исследований железобетонных колонн круглого сечения на поперечный изгиб с предварительным обжатием и без предварительного обжатия, выявлено увеличение несущей способности колонн с предварительным обжатием на 43,7 %.

Исследования на колоннах прямоугольного сечения [1, 2] показали, что приложение продольной сжимающей силы с эксцентриситетом относительно геометрической оси колонны, направленной в сторону поперечного изгиба или в обратную сторону, при совпадении или несовпадении продольного и поперечного изгиба, количества поперечного армирования оказывает существенное влияние на прочность и трещиностойкость наклонных сечений. В отношении колонн кругового сечения подобные исследования не проводились, а расчет наклонных сечений на поперечную силу, согласно нормам, выполняется как для изгибаемых элементов, без учета влияния продольного усилия сжатия. Вместе с тем, железобетонные элементы кругового сечения широко применяются для колонн каркасных зданий, элементов рам, эксплуатируемых в сейсмоопасных зонах, буронабивных свай подпорных стен, противооползневых сооружений.

Расчет прочности железобетонных элементов по наклонным сечениями выполняется по эмпирическим или полуэмпирическим зависимостями, в отличие от деформационного метода расчета прочности нормальных сечений, принятого в ДБН.2.6-98 [3]. В нормах проектирования [4] расчет прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил ведут отдельно на сжатие по полосе бетона между наклонными трещинами, на действие поперечной силы и на действие изгибающего момента. Вместе с тем, разрушение изгибаемых элементов по наклонным сечениями - это следствие совместного действия изгибающего момента и поперечной силы, а при

внецентренном сжатии необходимо учитывать и действие продольной сжимающей силы.

Ниже приведена деформационная методика оценки напряженно-деформированного состояния внецентренносжатых железобетонных элементов кругового сечения при поперечном изгибе. Метод оценки прочности круговых сечений, наклонных к продольной оси элемента основан на совместном решении системы уравнений равновесия моментов, поперечных и продольных сил в наклонном сечении:

Основные предпосылки метода расчета: расчетная схема приведена на рис. 1; зависимость между напряжениями и продольными деформациями бетона, зависимость между напряжениями и деформациями арматурной стали принята согласно ДБН.2.6-98 [3]; для средних деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры на участках между двумя ближайшими к сечению I-1 трещинами принята гипотеза плоских сечений; эпюра касательных напряжений в бетоне сжатой зоны сечения I-1 принята в виде квадратной параболы с максимальной ординатой на уровне вершины наклонной трещины; расчетная прочность бетона на сдвиг, армированного продольной арматурой V_{Rdc}, принята согласно ДБН.2.6-98 [3], напряжения в продольной растянутой арматуре в месте пересечения ее наклонной трещиной и в сечении I-1 приняты не более расчетного сопротивления f_{yd}; напряжения в поперечной арматуре, пересекаемой наклонной трещиной, принимают равным $f_{sw.inc}$ и не более расчетного сопротивления f_{wd}; в расчете учитывается поперечное усилие в продольной растянутой арматуре в месте пересечения ее наклонной трещиной (нагельный эффект); прочность элемента считают исчерпанной, если деформации бетона в сечении I-1 над наклонной трещиной по направлению главных растягивающих напряжений достигают предельных значений.

Вершины расчетных наклонных трещин, при действии распределенной и сосредоточенной нагрузки принимают расположенными на расстоянии $a = 0{,}25l$ от осей опор и с вершинами под силами соответственно [5].

Оценку напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатого элемента по наклонным сечениям выполняют деформационным методом. Система нелинейных алгебраических уравнений (1) решается подбором по параметрам деформаций в бетоне и кривизны в сечении. С помощью гипотезы плоских сечений определяют деформации и напряжения в бетоне, арматуре. Система (1) позволяет определить напряженно деформированное состояние и

несущую способность сечений железобетонного элемента при любом уровне нагружения.

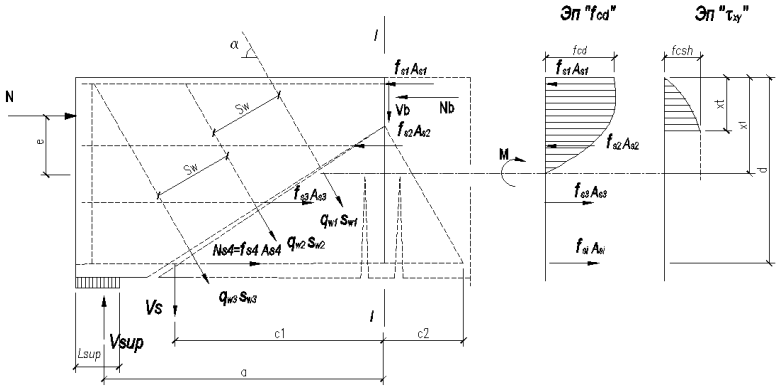

Рис. 1. Расчетная схема к расчету прочности железобетонных колонн кругового сечения по сечениям, наклонным к продольной оси элемента.

С точки зрения критерия исчерпания сопротивления материала данный метод практически полностью увязан с деформационным методом расчета прочности нормальных сечений.

$$\sum_{n=1}^{m}\frac{2f_{cd}x_1}{m}\sqrt{2r_1z_{cn}-z_{cn}^2}\sum_{k=1}^{5}a_k\left(\frac{\varepsilon_{cn}}{\varepsilon_{c1}}\right)^k+\sum_{i=1}^{n}f_{si}A_{si}+\sum_{i=1}^{n}N_{swi}\cdot\cos\alpha-N=0$$

$$\sum_{n=1}^{m}\frac{2f_{cd}(x_1-z_{cn})}{m}\sqrt{2r_1z_{cn}-z_{cn}^2}\sum_{k=1}^{5}a_k\left(\frac{\varepsilon_{cn}}{\varepsilon_{c1}}\right)^k+\sum_{i=1}^{n}f_{si}A_{si}(x_1-z_{si})+\sum_{i=1}^{n}N_{swi}\cdot z_{swi}\cdot\cos a\geq M_1$$

(1),

где

$$M_1=M+N(x_1-r_1+e)=0\ , \qquad (2)$$

M_1 – момент внешних сил, расположенных по одну сторону от сечения I-I, M – момент от поперечной загрузки,

$$z_{cn}=x_1[(n-1)+0{,}5]/m, \qquad (3)$$

расстояние от наиболее сжатой точки сечения до середины произвольного слоя, рис.2,

m – количество слоев разделения сжатой зоны; n – порядковый номер рассматриваемого слоя. Ширина и высота произвольного сжатого слоя определяются зависимостями [6]:

$$b_{cn} = 2\sqrt{2r_1 \times z_{cn} - z_{cn}^2}, h_{cn} = \frac{2r_1}{m}. \qquad (4)$$

Напряжения в середине каждого слоя определяются в соответствии с гипотезой плоских сечений:

$$\sigma_{cn} = f_{cd} \sum_{k=1}^{5} \left(\frac{\varepsilon_{cn}}{\varepsilon_{cR}} \right)^{\kappa}, \qquad (5)$$

где $\varepsilon_{cn} = \kappa(x_1 - z_{cn})$ - деформации середины слоя бетона

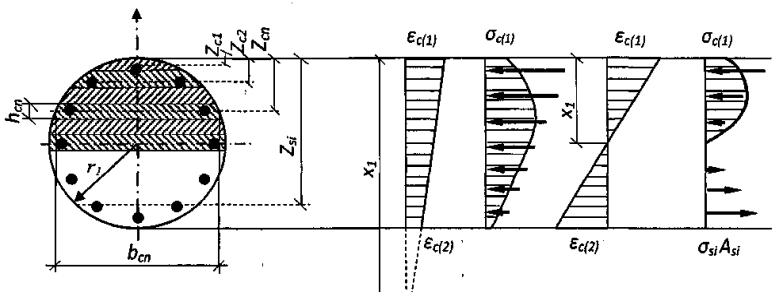

Рис. 2. Разбиение сжатой зоны железобетонного элемента кругового сечения на m слоев, перпендикулярных оси действия момента [6].

В качестве расчетной принимается трещина, ближайшая к опоре. Длину проекции наклонной трещины на продольную ось элемента определяют в зависимости от места расположения вершины трещины по лине элемента. При расположении вершины трещины на расстоянии от оси опоры, равном *0,25l*,

$$c_1 = 2a\sqrt{1 - 0{,}75\frac{(M_{crc} - Ne)}{(M_{u1} - Ne)}} - 0{,}5, \qquad (6)$$

В случае расположения вершины трещины под силой –

$$c_1 = a\frac{M_{u1} - M_{crc}}{M_{u1} - Ne}, \qquad (7)$$

В первом и втором случае должно выполнятся условие:

$$h_0 \le c_1 \le 2h_0, \qquad (8)$$

При невыполнении данного условия слева, величину c_1 принимают равной h_0, в случае невыполнения условия справа – $2h_0$.

Усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения ее наклонной трещиной вычисляют по формуле:

$$V_s = M_u\frac{1-K}{c_1} - q_{sw.inc}(c_1 + c_2)\sin^2\theta - \nu_{Rdc}S_{segm}\cdot, \qquad (9)$$

где значение (K) вычисляют при совместном действии сосредоточенных сил и равномерно-распределенной нагрузки и при действии сосредоточенных сил по формулам (10, 11) соответственно:

$$K = 1 - \frac{c_1}{a} + \frac{c_1}{\frac{2V_{\sup}}{q} - a}, \qquad (10)$$

$$K = 1 - \frac{c_1}{a}, \qquad (11)$$

$$\nu_{Rdc} = C_{Rd.c}\cdot k(100\rho_1\cdot f_{ck})^{1/3} + k\cdot\sigma_{cp}, \qquad (12)$$

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \le 2{,}0, \quad \rho_1 = A_s/\pi R^2, \qquad (13)$$

$$S_{segm} = 0{,}5R^2(\alpha - \sin\alpha), \qquad (14)$$

$$\sin\alpha = c/2R), \qquad (15)$$

$$c = \sqrt{2x_1R - x_1^{\,2}}, \qquad (16)$$

Усилия в продольной арматуре:

$$N_s = N_b - 0{,}5q_{sw.inc}(c_1 + c_2)\sin 2\theta \pm N, \qquad (17)$$

$$N_s \le f_{yd}A_s, \qquad (18)$$

При этом должно выполняться условие:

$$V_s \approx M_{u1} \frac{1-K}{5c_1}, \qquad (19)$$

Порядок расчета:

- определение предельного изгибающего момента при заданных величинах деформаций и предварительном обжатия от осевого усилия N выполняют по приложению А [6]; величина M_{u1}, соответствующая максимуму на диаграмме состояния сечения $M - \varepsilon_{c(1)}$ соответствует величине несущей способности железобетонного кругового сечения;

- выполняем проверку $M_{u1} \geq M$;

- по формулам (6, 7) вычисляем значение c_1 и проверяем выполнение условия $h_0 \leq c_1 \leq 2h_0$;

- определяем усилия в продольной растянутой арматуре в месте пересечения ее наклонной трещиной (нагельный эффект) по формулам (12-16);

- проверяем выполнение условий (18, 19);

- если условие (19) не выполняется, необходимо увеличить интенсивность поперечного армирования;

- интенсивность поперечного армирования, удовлетворяющую условию (19) вычисляют по формуле:

$$q^*_{sw.inc} = (V_s - M_{u1} \frac{1-K}{5c_1}) / c_1, \qquad (20)$$

- расчетный шаг хомутов при заданной площади $A_{sw.inc}$ вычисляют по формуле:

$$s_{sw.inc} = f_{sw.inc} \cdot A_{sw.inc} / q^*_{sw.inc} \qquad (21)$$

С целью экспериментального подтверждения приведенной методики расчета были проведены исследования оценки влияния внецентренно приложенного продольного усилия обжатия, догружающего сжатую зону, на несущую способность элементов круглого сечения при действии поперечных сил.

Исследования проводили на колоннах круглого сечения, изготовленных из бетона класса С 25/30, диаметром 190 мм с продольным армированием в виде шести стержней арматуры Ø 10

А240С и поперечным спиральным армированием из арматурной проволоки Ø 4ВI, установленной с шагом 100 мм, Пролет среза при испытании колонны был равен двум диаметрам колонны за вычетом защитного слоя бетона 30 мм. Длина образцов колонн составляла 1000 мм. Было испытано по три образца каждой серии, с уровнем поперечного обжатия не более $0.25P_{разр.}$ при сжатии. Величина эксцентриситета составляла 4 см. Величина усилия обжатия составляла 150 кН. Продольный изгиб от предварительного обжатия колонн осуществляли в ту же сторону, что и последующий поперечный изгиб от прикладываемой поперечной силы.

Проведение испытаний проводили на специальной установке, рис. 3.

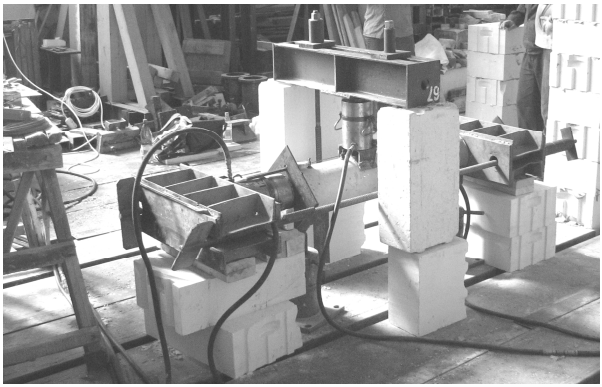

Рис. 3. Установка для проведення испытаний колон с предварительным обжатием.

Для создания усилия предварительного обжатия колонн использовали довольно жесткую раму, состоящую из двух траверс, двух направляющих, шарнирного устройства для установки эксцентриситета приложения нагрузки, домкрата. Для создания поперечного усилия в вертикальном направлении использовали жесткую траверсу, две направляющие, которые закрепляли с одной стороны в ручьях силового пола, а с другой стороны направляющие крепили гайками за траверсой. Железобетонный элемент кругового сечения устанавливали на специальные шарнирные опоры, изготовленные из половин стальных труб по диаметру колонны, с опиранием на 2 опорные винтовые стойки, с регулировкой по высоте. Второй гидравлический домкрат устанавливали вертикально между траверсой и колонной. Нагружение как в горизонтальном, так и вертикальном направлении осуществляли с помощью специальной

насосной станции. Исследование деформаций бетона в зоне поперечного изгиба выполняли с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 10^{-3} мм. Прогиб измеряли индикатором часового типа с ценой деления 10^{-2} мм.

Результаты испытаний показали, что при нагрузке от обжатия деформации не превышали упругих значений. При дальнейшем, после предварительного обжатия колонны, поперечном изгибе первыми появлялись нормальные трещины в растянутой зоне в месте приложения усилия при нагрузке, примерно, 0,42 $P_{разр}$, и деформации в сжатой зоне $\varepsilon_в$= 152x10^{-5}, что, примерно, в два раза превышало деформации в сжатой зоне элементов без предварительного обжатия в момент появления нормальных трещин.

Далее с раскрытием нормальной трещины в месте приложения поперечной силы происходило уменьшение высоты сжатой зоны над этой трещиной и образование наклонной трещины. Процесс разрушения происходил по наклонному сечению, со сдвигом от предварительного обжатия, рис. 4.

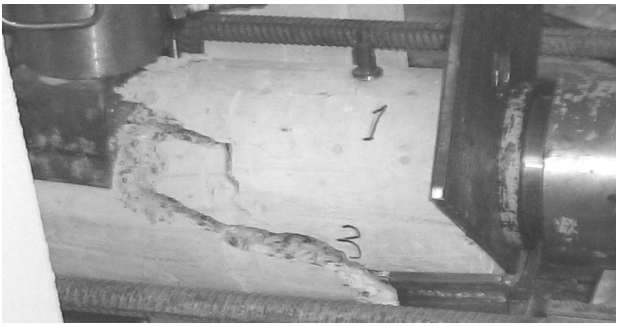

Рис. 4. Разрушение колонны с предварительным обжатием по наклонному сечению.

Процесс деформирования колонн при поперечном изгибе до момента образования наклонной трещины подобен процессу деформирования при изгибе. Как следует из опытов, наклонная трещина появляется после значительного уменьшения высоты сжатой зоны, перед моментом разрушения элемента. Предварительное обжатие с одной стороны догружает сжатую зону колонны и, тем самым, увеличивает деформации сжатия, а с другой стороны сдерживает раскрытие наклонной трещины, препятствуя повороту одной части сечения относительно другой, как это происходит при

обычном поперечном изгибе (до момента достижения предельных деформаций в сжатой зоне). В результате разрушение колонн с предварительным обжатием происходит по наклонному сечения с продольным раскалыванием бетона сжатой зоны.

Сопоставление зависимостей «момент-кривизна» для колонн с поперечным обжатием и без поперечного обжатия, полученных по результатам испытаний, приведены на рис.5.

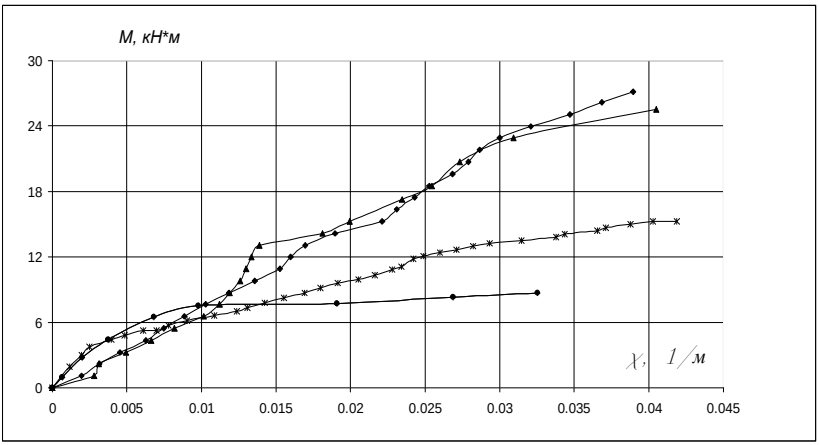

Рис. 5. Сопоставление зависимостей «момент-кривизна» для колонн при поперечном изгибе и пролете среза, $a = 2h_0$.

, - колонны с пердварительным обжатием;

- колонны без предварительного обжатиия с поперечной арматурой;

- колонны без без предварительного обжатиия и без поперечной арматуры.

Как видно из рис. 5, предварительное обжатие увеличивает несущую способность колонн кругового сечения по сравнению с колоннами, испытанными при поперечном изгибе без предварительного обжатия при том же пролете среза ($a=2h_0$) и идентичном поперечном и продольном армировании - на 43,7 %. Сопоставление колонн круглого сечения, испытанных при поперечном изгибе без предварительного обжатия показало, что несущая способность колонн без поперечного армирования оказалась на 43,3 % ниже, чем для колонн с поперечным армированием.

Выводы.

Приведенные выше зависимости позволяют определить напряженно деформированное состояние и несущую способность наклонных сечений железобетонного элемента при любом уровне нагружения, а данный метод, с точки зрения критерия исчерпания сопротивления материала, практически полностью увязан с деформационным методом расчета прочности нормальных сечений.

Испытания колонн с предварительным обжатием соответствует реальной расчетной схеме зданий, загруженных вертикальными и горизонтальными усилиями. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают сформулированные расчетные предпосылки предложенного метода расчета сжато-изогнутых элементов кругового сечения при поперечном изгибе.

Литература.

1. Шеина С.Г., Сибиль В.Г., Лиджиев М.Д., Сосоржавын Э., Толокнова Н.Н.// Методика испытания железобетонных элементовна внецентренное сжатие с поперечной силой. В кн.: Вопросы расчета железобетона. Ростов н/Д, 1982, с. 139-142.

2. Шеина С.Г. Сопротивление поперечной силе наклонных сечений внецентренно сжатых железобетонных элементов// В кн.: Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона. - Ростов н/Д, 1980, с. 160-163.

3. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. А. Бамбура, А. Барашиков, О. Давиденко, О. Голишев, Кривошеєв П. – Київ. – Мінрегіонбуд. – 2009. – 97 с.

4. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного преднапряжения арматуры. — М. : ФГУП ЦПП, 2004. — 53 с.

5. Проектирование железобетонных конструкций: Справочное пособие / А.Б. Голышев, В.Я. Бачинский, В.П. Полищук, А.В. Харченко, И.П. Руденко / Под ред. А.Б. Голышева. - 2-е изд. перераб. и доп. – К.: Будивэльник, 1990. – 544 с.: ил. – (Б-ка проектировщика).

6. ДСТУ Б В.2.6-156:2010, Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. А. Бамбура, М. Безбожна, О. Гурківський, О. Дорогова, Т. Мірошник, П. Кривошеєв. – Київ. – Мінрегіонбуд. – 2010. – 118 с.