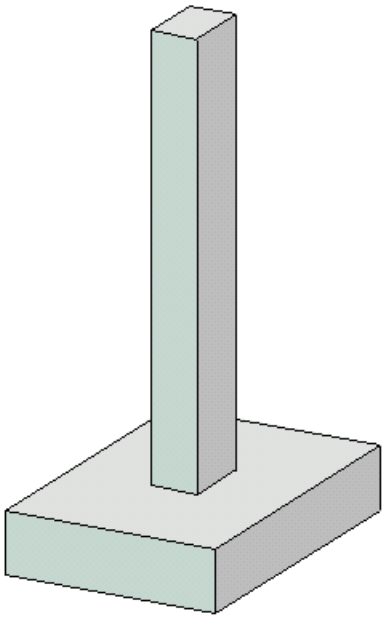
414 – Сталежелезобетонная колонна (составная жесткая арматура)



Программа предназначена для расчета одноярусной или многоярусной сталежелезобетонной колонны согласно СП 266.1325800 [1], СП 63.13330 [2], СП 16.13330 [3] и СП 20.13330 [4]. Предусмотрены два метода расчета колонны. По первому методу усилия в колонне определяются по деформированной схеме с учетом нелинейных свойств материалов, а также с учетом несовершенств колонны. По второму методу усилия в колонне определяются при помощи линейного расчета по недеформированной схеме, а влияние прогиба учитывается по методу условных критических сил.

1. Расчетная схема

Расчетная схема одноярусной колонны представляет собой стержневой элемент, имеющий упругие или абсолютно жесткие закрепления на одном или обоих краях. Расчетная схема многоярусной колонны представляет собой последовательность стержневых элементов (частей). Части колонны нумеруются в направлении снизу вверх (рис.1).

При расчете колонны применяется система координат *xyz*, начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось *x* направлена снизу вверх.

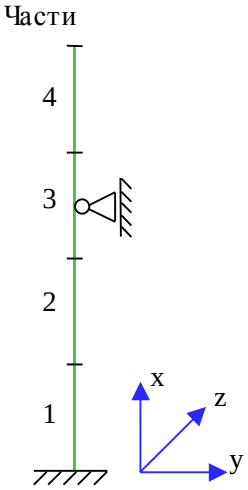


Рис. 1. Расчетная схема

Предполагается, что результирующая вертикальная сила воспринимается в нижней опоре. Условия упругого или абсолютно жесткого закрепления формулируются для горизонтального перемещения и поворота сечения вокруг горизонтальной оси. Возможен выбор частных расчетных схем, для которых не требуется явно задавать условия закрепления. На рис.2 даны формулы для определения коэффициентов жесткости упругих связей колонны с присоединенными к ней элементами конструкции.

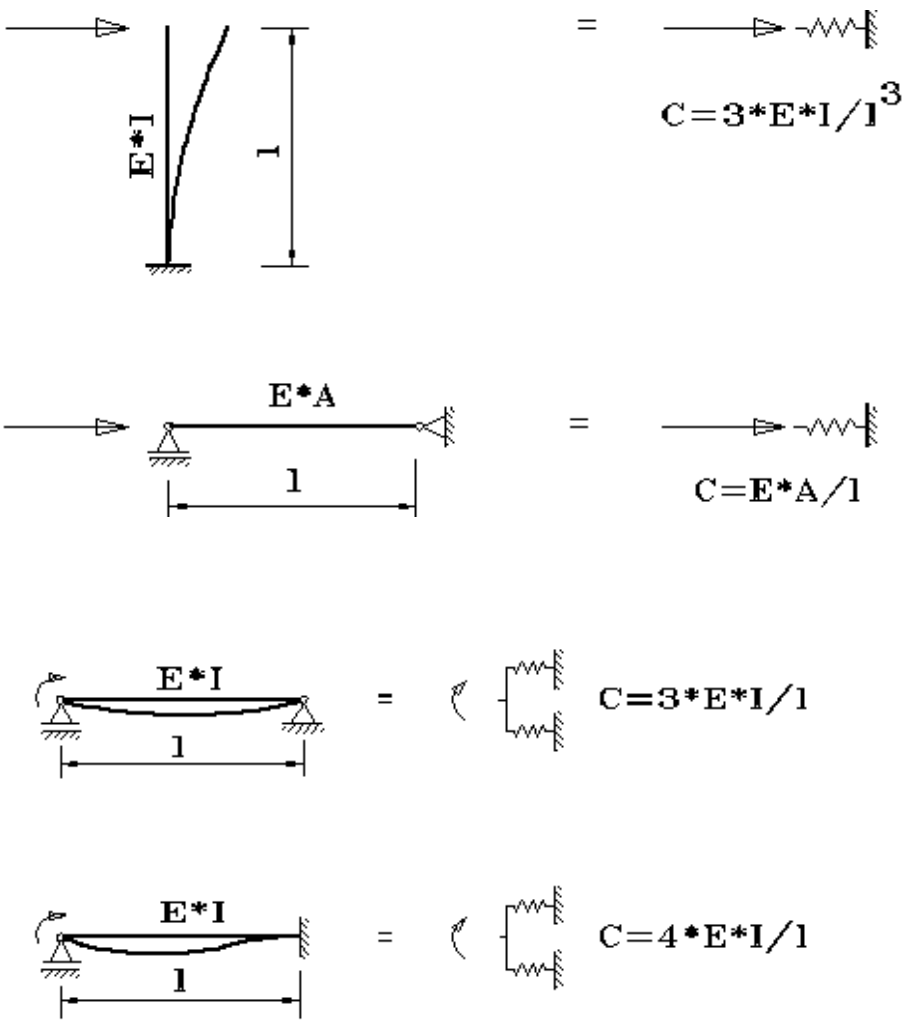


Рис. 2. Коэффициенты жесткости упругих связей

2. Сечение

Рассматривается прямоугольное бетонное сечение с жесткой и гибкой арматурой. Жесткая арматура может быть образована из тавров, швеллеров, уголков (рис.3 - 5) (см. также [1], рис.4.3). При расчете учитывается вытеснение бетона жесткой и гибкой арматурой. Площадь сечения жесткой арматуры может быть соизмеримой с площадью бетонного сечения. Жесткая арматура не учитывается, если толщина её элементов задана равной нулю.

Гибкая арматура равномерно размещается вдоль контура сечения. Гибкая арматура не учитывается, если её диаметр задан равным нулю.

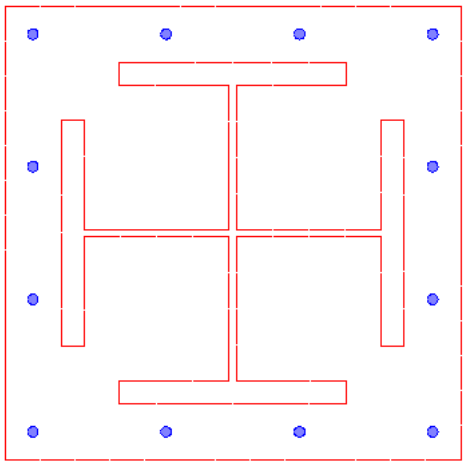


Рис. 3. Сечение с жесткой арматурой, образованной из тавров

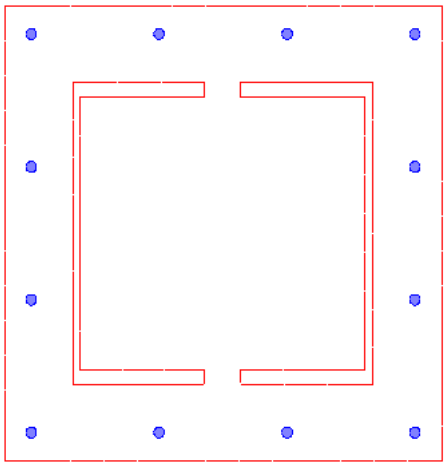


Рис. 4. Сечение с жесткой арматурой, образованной из швеллеров

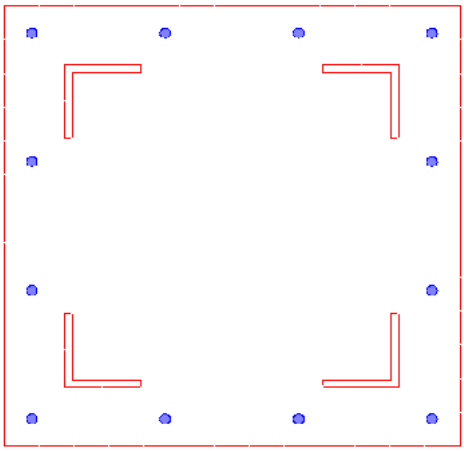


Рис. 5.Сечение с жесткой арматурой, образованной из уголков

3. Нагрузки

Возможны следующие нагрузки: сосредоточенные вертикальные и горизонтальные силы, сосредоточенные моменты, распределенные горизонтальные и вертикальные нагрузки, смещения и повороты жестких опор. Положительные направления нагрузок показаны на рис.6. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

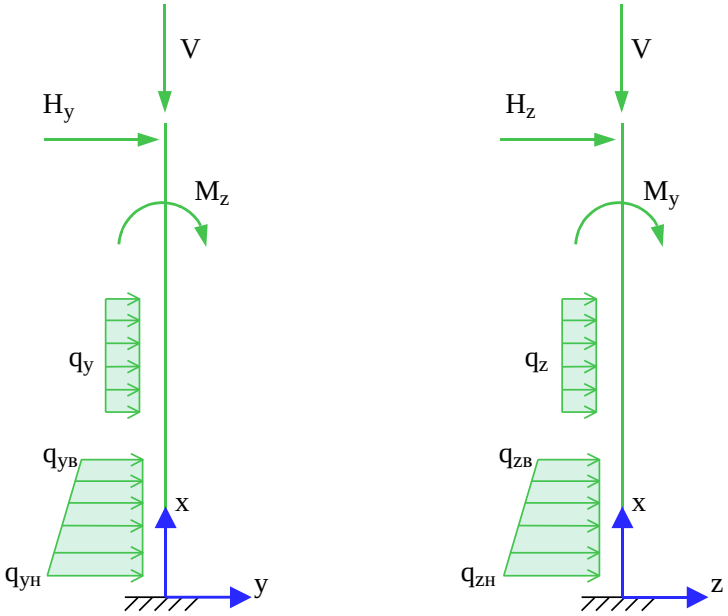


Рис. 6. Положительные направления нагрузок

Классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно [4]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные, особые и сейсмические. При наличии особых и/или сейсмических нагрузок наряду с основными комбинациями генерируются также особые комбинации.

Для сокращения вычислений и объема выходного документа программы предусмотрен выбор комбинаций нагрузок. При помощи статического расчета для всех возможных комбинаций нагрузок выбираются такие комбинации, для которых усилия или прогибы принимают наибольшие значения.

4. Расчет по деформированной схеме

Проводятся два расчета усилий по деформированной схеме: линейный расчет и нелинейный расчет. Линейный расчет основан на модели линейного деформирования бетона и арматуры. В этом случае кривизна (угловой коэффициент эпюры деформаций) в каждой плоскости изгиба выражается по формуле $\kappa = M / EI$. Система уравнений продольно-поперечного изгиба является линейной.

В нелинейном расчете кривизны κ_y и κ_z определяются через усилия на основе диаграмм деформирования сжатого бетона, гибкой арматуры и конструкционной стали. Для сжатого

бетона применяется одна из двух расчетных диаграмм согласно [2], 6.1.20, 6.1.21. Для гибкой арматуры в зависимости от ее класса применяется двухлинейная или трехлинейная диаграмма согласно [2], 6.2.14, 6.2.15. Для конструкционной стали применяется диаграмма типа Прандтля. Если не допускается пластическая деформация конструкционной стали, то предельная деформация принимается равной $\gamma_c R_y / E$. В противном случае предельная деформация конструкционной стали может быть задана любым значением, не превышающим 25 промилле.

Из-за нелинейного характера зависимости кривизны от усилий система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов, прогибов становятся менее 1%. Для контроля точности результатов нелинейного расчета выводится итерационная ошибка.

При расчете по деформированной схеме для учета влияния таких несовершенств колонны, как непрямолинейность и невертикальность, предусмотрено задание начальных прогибов по формам потери устойчивости или задание отклонений оси колонны от вертикали. Выбор в качестве формы несовершенства колонны формы потери устойчивости объясняется высокой степенью влияния этой формы при больших вертикальных нагрузках. Для каждой координатной плоскости форма потери устойчивости определяется в рамках теории упругой устойчивости для заданного распределения вертикальных нагрузок. По умолчанию наибольшее значение начального прогиба в каждой плоскости принимается равным случайному эксцентриситету e_a. Возможен ввод наибольшего значения начального прогиба. Выбор наиболее неблагоприятной ориентации начального прогиба (выбор знака наибольшего значения) осуществляется для каждой комбинации нагрузок по отдельности. Если задается значение начального прогиба в конкретной точке, то знак заданного значения учитывается.

Отклонение оси колонны от вертикали представляет собой поворот оси вокруг нижней точки. По умолчанию угол отклонения в каждой координатной плоскости принимается равным 1/600. Возможен ввод угла отклонения. Выбор наиболее неблагоприятного направления отклонения от вертикали (в направлении координатной оси или в противоположном направлении) осуществляется для каждой комбинации нагрузок по отдельности.

5. Расчет по недеформированной схеме

Расчет усилий проводится в предположении линейного деформирования бетона, гибкой арматуры и конструкционной стали. Жесткость сталежелезобетонного сечения определяется с учетом арматуры.

В каждой координатной плоскости влияние прогиба на величину расчетного момента учитывается путем умножения изгибающего момента M на повышающий коэффициент η. Коэффициент η вычисляется по формуле [1], (7.6)

$$\eta = \frac{1}{1 - \dfrac{N}{N_{cr}}}$$

где N - продольная сила, N_{cr} - критическая сила, которая определяется согласно [1], (7.7)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2}$$

где D - жесткость колонны, l_0 - расчетная длина колонны. Жесткость вычисляется согласно [1], Приложение Г по формуле

$$D = \frac{0.15 E_{b1} I_b}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} + 0.7(E_s I_s + E I_{st})$$

Здесь $E_{b1} = k_1 E_b$; k_1 - коэффициент понижения модуля упругости бетона, E_b, E_s, E - модули упругости бетона, арматуры и конструкционной стали; I_b, I_s, I_{st} - моменты инерции площади бетонного сечения, площади сечения гибкой арматуры и площади сечения стального профиля относительно центральной оси приведенного сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы, h - высота сечения в плоскости изгиба, $\varphi_l = 1 + M_{l1} / M_1$ - параметр, учитывающий длительное действие нагрузки. При непродолжительном действии нагрузки $k_1 = 0.85$, при продолжительном действии нагрузки $k_1 = 1/(1 + \varphi_{b,cr})$.

Эксцентриситет e_0 определяется относительно центра тяжести приведенного сечения. При определении e_0 учитывается случайный эксцентриситет e_a [1], 7.1.1.5. При расчете колонны, являющейся элементом статически определимой конструкции, эксцентриситет e_0 принимается равным $\frac{M}{N} + e_a$, а при расчете колонны, являющейся элементом статически неопределимой конструкции, – равным $\frac{M}{N}$, если $\frac{M}{N} \geq e_a$, и равным e_a, если $\frac{M}{N} < e_a$.

Моменты M_1, M_{l1} вычисляются относительно оси тяжести наиболее растянутой (или наименее сжатой) арматуры по усилиям N, M от полной нагрузки и по усилиям N_l, M_l от длительно действующей части нагрузки. При определении N_l, M_l в расчет ставятся постоянные и длительные нагрузки, входящие в рассматриваемую комбинацию, а также длительные части кратковременных нагрузок, вычисляемые по заданным при вводе коэффициентам k_l.

Расчетная длина l_0 в каждой координатной плоскости определяется по формуле $l_0 = \pi [EI / (\eta_* N)]^{1/2}$, где η_* – коэффициент критической нагрузки, равный отношению продольной силы при достижении критического состояния к действующей продольной силе, EI - изгибная жесткость сечения. Коэффициент η_* отыскивается путем решения задачи об упругой устойчивости колонны при заданных краевых условиях и заданных вертикальных силах. Коэффициент η_* является системной характеристикой колонны. При действии распределенной вертикальной нагрузки или при действии сосредоточенной вертикальной нагрузки в промежуточных сечениях колонны расчетная длина является переменной величиной. В программе предусмотрена возможность ввода l_0.

Литература

1. СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования»
2. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции.Основные положения»
3. СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции»
4. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»