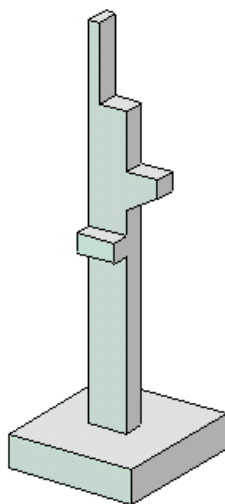


413 – Расчет железобетонной колонны



Программа предназначена для расчета статически неопределимой железобетонной колонны общего вида согласно СП 63.13330.2018 [1]. Предусмотрены два метода расчета колонны: 1) линейный расчет усилий по недеформированной схеме и определение расчетных моментов по методу условных критических сил; 2) нелинейный расчет усилий по деформированной схеме с учетом неупругих свойств бетона и арматуры, а также с учетом начальных несовершенств колонны и деформаций ползучести бетона.

1. Расчетная схема

Расчетная схема колонны представляет собой последовательность стержневых элементов (частей) произвольного сечения (рис.1). Разбиение колонны на части необходимо при наличии различных сечений. Части нумеруются в направлении снизу вверх. Возможно задание до 50 частей. При расчете колонны применяется глобальная система координат x, y, z , начало которой совпадает с центром тяжести нижнего сечения колонны. Ось x направлена снизу вверх. На каждой части колонны вводится локальная система координат, вертикальная ось которой совпадает с линией центров тяжести сечений данной части, а горизонтальные оси параллельны осям y, z . Учитывается смещение вертикальной оси части колонны по отношению к оси нижерасположенной части.

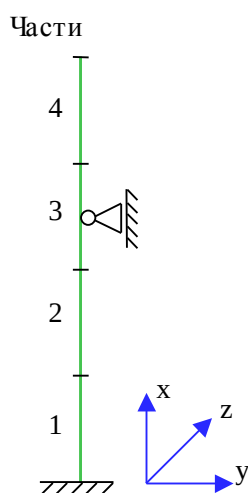


Рис. 1. Расчетная схема

Предполагается, что результирующая вертикальная сила воспринимается в нижней опоре. Условия упругого или абсолютно жесткого закрепления могут задаваться в произвольных точках. Они 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.6 даны формулы для определения коэффициентов жесткости упругих связей колонны с присоединенными к ней элементами конструкции. Возможен учет податливости основания при помощи коэффициентов жесткости закрепления нижнего края колонны относительно поворотов. Коэффициенты жесткости приближенно определяются по размерам фундаментной плиты и модулю деформации основания.

2. Сечения

На различных частях колонны могут задаваться различные сечения, отличающиеся по форме или по арматуре. Сечение может задаваться как стандартное сечение (прямоугольное, круговое или кольцевое сечение) или как произвольное полигональное сечение (рис.2).

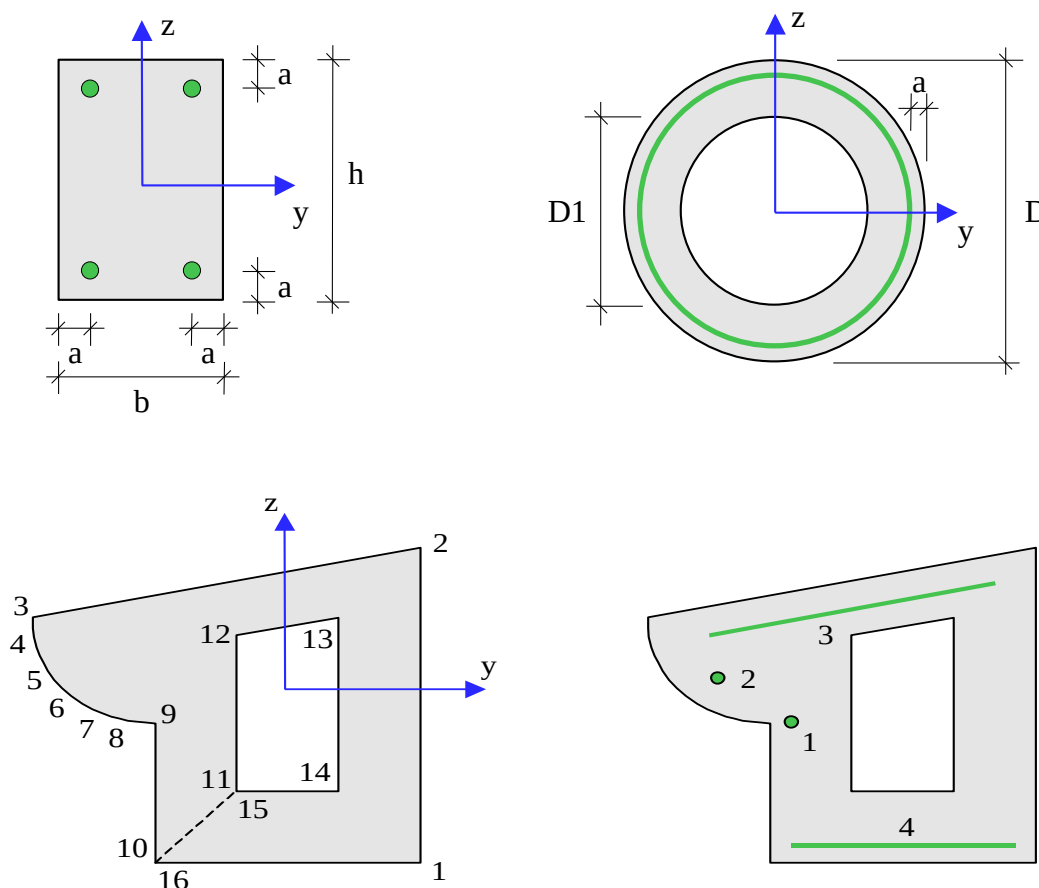


Рис. 2. Сечения

Для прямоугольного сечения возможны следующие схемы армирования A (рис.3): схема с равными площадями арматуры вблизи вершин сечения ($A = 0$), схема с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения ($A = 1$), схема с равными площадями арматуры вблизи верхней и нижней сторон сечения ($A = 2$), схема с равными площадями арматуры вблизи левой и правой сторон сечения ($A = 3$).

Для кругового и кольцевого сечений рассматривается схема армирования с равномерным распределением площади арматуры вдоль контура сечения.

Задание произвольного полигонального сечения осуществляется путем ввода координат его вершин. Возможен ввод до 50 вершин. Выбор координатных осей декартовой системы может быть произвольным. Вершины задаются в последовательности, которая соответствует обходу полигона по контуру в определенном направлении. При этом полигональная область должна оставаться по одну сторону (например, слева) от направления обхода. При наличии внутренних полостей в сечении требуется произвести разрезы, позволяющие обойти граничные контуры (внешний и внутренние) так, чтобы область оставалась по одну сторону от направления обхода.

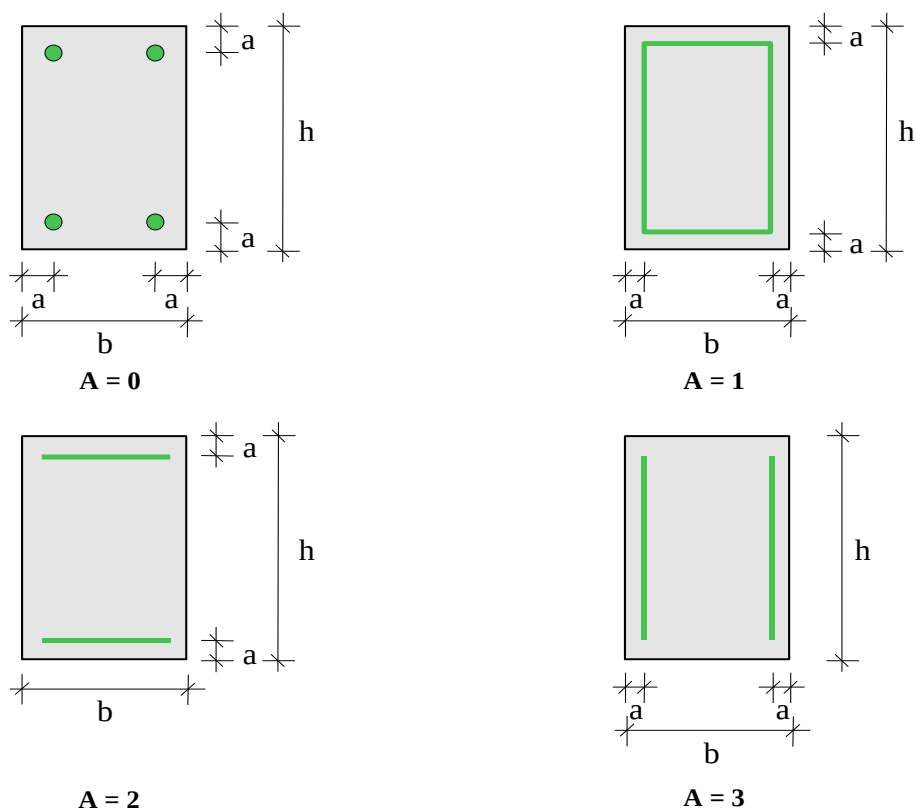


Рис. 3. Схемы армирования прямоугольного сечения

Для полигонального сечения задаются отрезки (арматурные слои), на которых размещается арматура. Возможен ввод до 50 арматурных слоев. Слои могут иметь произвольную длину и ориентацию.

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.4. Положительные направления смещений жестких опор совпадают с направлениями координатных осей. Положительные направления поворотов жестких опор совпадают с положительными направлениями моментов.

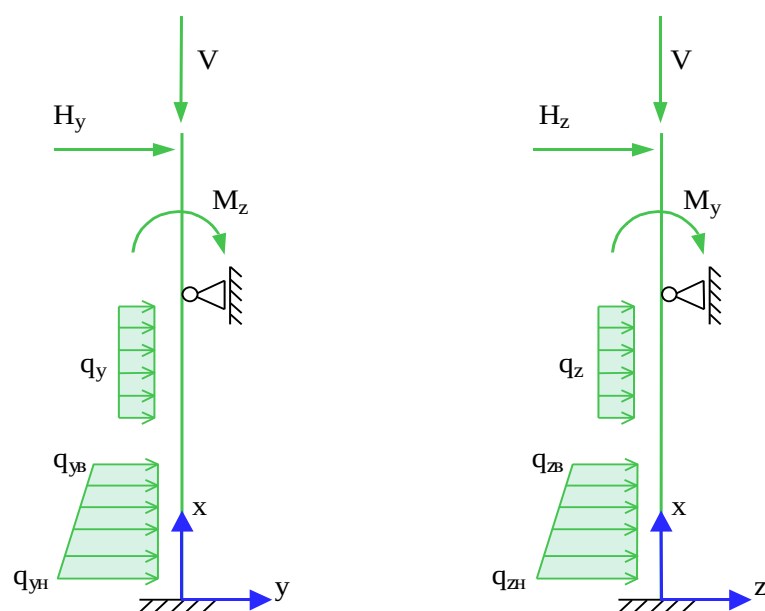


Рис. 4. Положительные направления нагрузок

При расчете классификация и комбинирование нагрузок принимаются согласно СП 20.13330 [2]. Нагрузки подразделяются на постоянные, длительные, кратковременные и особые. Комбинирование нагрузок представляет собой генерацию множества возможных комбинаций нагрузок с учетом коэффициентов надежности по нагрузке γ_f и коэффициентов, связанных с одновременным учетом двух и более временных нагрузок. При наличии особых нагрузок наряду с основными комбинациями генерируются также особые комбинации. При учете деформаций ползучести бетона для каждой расчетной комбинации определяется соответствующая комбинация длительно действующих нормативных нагрузок. При этом постоянные и длительные нагрузки входят с полным значением, а кратковременные нагрузки учитываются с коэффициентом длительной части K_l .

Возможен ввод несочетаемых нагрузок. Такие нагрузки включаются в группу несочетаемых нагрузок. В комбинацию может войти только одна нагрузка из каждой группы. Нумерация групп начинается с единицы. Группы могут применяться, в частности, при учете ветровых нагрузок (при рассмотрении действия ветра по различным направлениям) и крановых нагрузок (при рассмотрении различных положений крана).

Возможен ввод знакопеременных нагрузок. В этом случае в расчете учитывается как заданная нагрузка, так и нагрузка противоположного знака.

Для сокращения вычислений и объема выходного документа программы предусмотрен выбор комбинаций нагрузок. Выбираются такие комбинации нагрузок, для которых усилия и прогибы, полученные в линейной задаче, принимают наибольшие положительные значения (*max*-значения) или наибольшие по модулю отрицательные значения (*min*-значения).

4. Расчет по недеформированной схеме

В каждой координатной плоскости влияние прогиба на величину расчетного момента учитывается путем умножения изгибающего момента M на повышающий коэффициент η , который вычисляется по формуле

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

где N - продольная сила, N_{cr} - критическая сила, которая определяется согласно [1], 8.1.15. Формула для критической силы может быть записана в виде

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

где D - жесткость колонны, l_0 - расчетная длина. При определении D по формулам, приведенным в нормах, приближенно учитываются неупругие свойства бетона, наличие трещин и ползучесть бетона при длительном действии нагрузки.

Формула для жесткости имеет вид

$$D = \frac{0.15 E_b I_b}{\varphi_l (0.3 + \delta_e)} + 0.7 E_s I_s$$

Здесь E_b, E_s - модули упругости бетона и арматуры; I_b, I_s - моменты инерции бетонного сечения и площади сечения арматуры относительно центральной оси сечения, $\delta_e = e_0 / h$ - относительный эксцентриситет продольной силы (h - высота сечения в плоскости изгиба), $\varphi_l = 1 + \beta \cdot M_{l1} / M_1$ - параметр, учитывающий длительное действие нагрузки ($\beta = const$). Эксцентриситет e_0 определяется относительно центра тяжести приведенного сечения (при несимметричном армировании центры тяжести бетонного и приведенного сечений не совпадают). При определении e_0 учитывается случайный эксцентриситет e_a ([1], 8.1.7. 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 расчете 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 .

При расчете колонны предельные усилия определяются на основе нелинейной деформационной модели. Применяется трехлинейная диаграмма состояния сжатого бетона.

Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Прочность сечения обеспечена при $\gamma_u \geq 1$.

5. Расчет по деформированной схеме

В нелинейном расчете кривизны κ_y и κ_z определяются через усилия на основе диаграмм деформирования сжатого бетона и арматуры. При расчете согласно [1] применяется трехлинейная диаграмма состояния бетона. Из-за нелинейного характера зависимости кривизн от усилий система уравнений продольно-поперечного изгиба является нелинейной. Нелинейный расчет проводится при помощи метода итераций. Итерационный процесс оканчивается тогда, когда относительные приращения моментов и прогибов становятся менее 1%. Для контроля точности результатов нелинейного расчета усилий выводится итерационная ошибка.

Предельные усилия выражаются через действующие усилия по формулам

$$N_u = \gamma_u \cdot N, M_{yu} = \gamma_u \cdot M_y, M_{zu} = \gamma_u \cdot M_z$$

Прочность сечения обеспечена при $\gamma_u \geq 1$.

6. Учет несовершенств

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.

Возможен ввод начальных прогибов произвольной формы. В этом случае по заданным значениям начального прогиба строится гладкая интерполяционная сплайн-функция.

7. Учет деформаций ползучести

Деформации ползучести бетона рассчитываются в рамках линейной теории ползучести [3]. Расчет согласно [1] проводится для комбинации длительно действующих нормативных нагрузок при коэффициенте ползучести $\varphi_{b,cr}$, соответствующем классу бетона по прочности и заданной влажности воздуха окружающей среды. Сначала проводится линейный расчет по деформированной схеме с модулем деформации бетона $E_{b,\tau} = E_b / (1 + \varphi_{b,cr})$, отвечающим продолжительному действию нагрузок, а затем проводится аналогичный расчет с начальным модулем упругости E_b . В этих расчетах учитываются несовершенства колонны по формам потери устойчивости, рассчитанным для модуля деформации $E_{b,\tau}$. Прогибы, вызванные ползучестью бетона, определяются как разность прогибов, полученных в двух указанных расчетах: $w_n = w(E_{b,\tau}) - w(E_b)$. Прогибы w_n учитываются в основном расчете колонны как начальные прогибы.

8. Учет второстепенных колонн

Под второстепенными колоннами понимаются шарнирно опертые колонны, воспринимающие вертикальную нагрузку, но не сопротивляющиеся горизонтальной нагрузке. Дополнительная нагрузка на основную колонну, обусловленная нагружением присоединенных к ней второстепенных колонн, пропорциональна прогибу основной колонны (рис.5). Она может быть учтена путем введения пружины отрицательной жесткости. Дополнительная нагрузка действует в направлении прогиба основной колонны. При задании вертикальной нагрузки P необходимо учитывать коэффициент надежности по нагрузке.

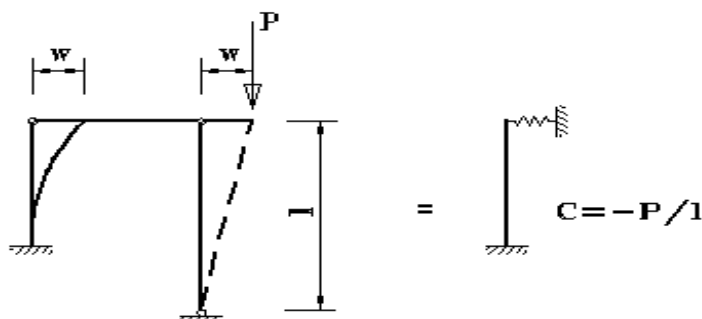


Рис. 5. Учет второстепенной колонны

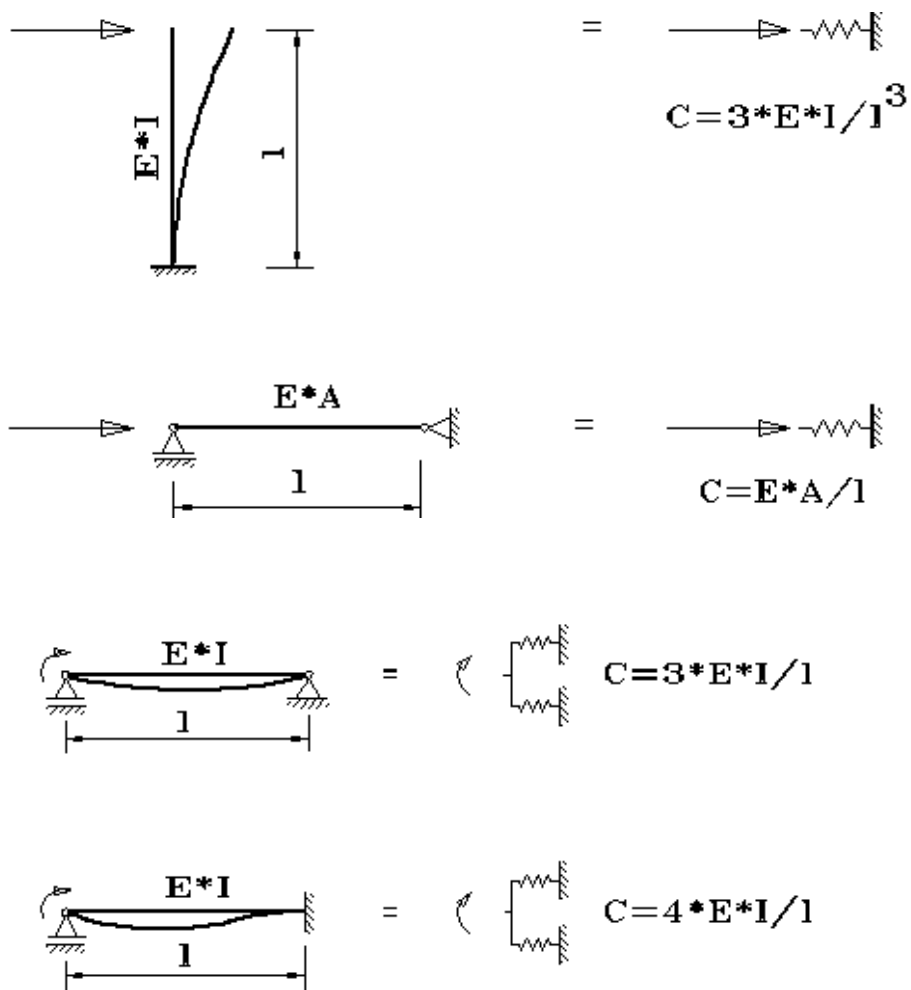


Рис. 6. Коэффициенты жесткости упругих связей

Литература

1. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции»
2. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»
3. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – М.:Стройиздат, 1988. – 120 с.