

ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТОЙ СТОЙКИ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

ОПИСАНИЕ ПРИМЕРА

Рассматривается железобетонная консольная стойка кольцевого сечения с внутренним радиусом $r_1 = 150$ мм, наружным – $r_2 = 250$ мм. Высота стойки 6 м. Используется тяжёлый бетон класса В25 и арматура класса А400. Арматура располагается по среднему радиусу кольца, площадь её сечения $A_{s,tot} = 2\,011$ мм² (10Ø16).

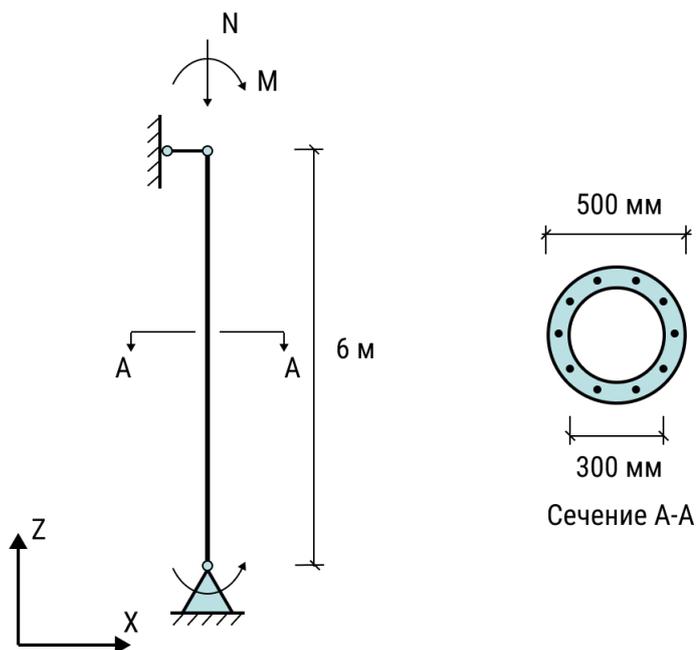
Продольные силы и моменты в заделке от нагрузок:

- вертикальных постоянных и длительных: $N_l = 120$ кН, $M_l = 40$ кН · м;
- от ветровых: $M_h = 70$ кН · м;
- кратковременные вертикальные нагрузки отсутствуют.

Определяется коэффициент использования стойки по прочности при внецентренном сжатии. Коэффициент расчётной длины стойки $\mu_x = 2.0$. Конструкция статически неопределимая.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для получения требуемых усилий в сечении стойки условия опирания и приложение нагрузок моделируются упрощённо.



Свойства сечения

$r_1 = 250$ мм	– наружный радиус сечения
$r_2 = 150$ мм	– внутренний радиус сечения
$A_{s,tot} = 2\,011$ мм ²	– общая площадь сечения продольной арматуры

Свойства материалов

Бетон В25

$E_b = 30\,000\,000 \text{ кН/м}^2$	– модуль упругости
$R_{bn} = 18\,500 \text{ кН/м}^2$	– нормативное сопротивление сжатию

Арматура А400 – продольная

$E_s = 200\,000\,000 \text{ кН/м}^2$	– модуль упругости
$R_{sn} = 400\,000 \text{ кН/м}^2$	– нормативное сопротивление

Коэффициенты

$\gamma_b = 1.3$	– коэффициент надёжности по бетону при сжатии
$\gamma_{b1} = 1.0$	– коэффициенты условий работы бетона
$\gamma_{b2} = 1.0$	
$\gamma_{b3} = 1.0$	
$\gamma_{b4} = 1.0$	
$\gamma_{b5} = 1.0$	
$\gamma_s = 1.15$	– коэффициент надёжности по арматуре

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

Расчёт производится с использованием формул раздела 8 [1].

Согласно формуле 6.1 и положениям п. 6.1.12 [1] определяем расчётное сопротивление бетона осевому сжатию:

$$R_b = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} \cdot \gamma_{b1} \cdot \gamma_{b2} \cdot \gamma_{b3} \cdot \gamma_{b4} \cdot \gamma_{b5} = \frac{18\,500}{1.3} \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 = 14\,231 \text{ кПа.}$$

Согласно формуле 6.10 и положениям п. 6.2.8 [1] определяем расчётное сопротивление продольной арматуры класса А400 на растяжение и сжатие:

$$R_s = \frac{R_{sn}}{\gamma_s} = \frac{400\,000}{1.15} = 347\,826 \text{ кПа;}$$

$$R_{sc} = R_s = 347\,826 \text{ кПа} < 400\,000 \text{ кПа.}$$

Максимальные усилия в элементе:

$$N = N_l + N_h = 120 + 0 = 120 \text{ кН;}$$

$$M = M_l + M_h = 40 + 70 = 110 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Согласно п. 8.1.7 [1] находим эксцентриситеты для статически неопределимой конструкции:

$$e_a = \max\left(\frac{1}{600} \cdot l; \frac{1}{30} \cdot h; 10 \text{ мм}\right) = \max(0.01; 0.0167; 0.01) = 0.0167 \text{ м};$$

$$e_{st} = \frac{M}{N} = \frac{110}{120} = 0.9167 \text{ м};$$

$$e_0 = e_{st} = 0.9167 > e_a.$$

Находим коэффициент использования стойки по прочности при внецентренном сжатии.

Допускается производить расчёт конструкций по недеформированной схеме, учитывая влияние прогиба элемента на его прочность $e_0 \cdot \eta$. При этом должно выполняться условие:

$$\frac{l_0}{i} = \frac{12}{0.146} = 82.32 > 14,$$

где

$$l_0 = 2 \cdot l = 2 \cdot 6 = 12 \text{ м} - \text{расчётная длина элемента};$$

$$i = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{0.002670}{0.12567}} = 0.146 \text{ м} - \text{радиус инерции}.$$

Коэффициент η рассчитывается согласно формуле 8.14 и положениям п. 8.1.15 [1]:

$$r_s = 0.2 \text{ м} - \text{радиус окружности, проходящей через центры тяжести стержней продольной арматуры};$$

$$M_1 = M + N \cdot r_s = 110 + 120 \cdot 0.2 = 134 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_{l1} = M_l + N_l \cdot r_s = 40 + 120 \cdot 0.2 = 64 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$\varphi_l = 1 + \frac{M_{l1}}{M_1} = 1 + \frac{64}{134} = 1.478;$$

$$0.15 < \delta_e = \frac{e_0}{h} = \frac{0.9167}{0.5} = 1.833 > 1.5, \text{ тогда } \delta_e = 1.5;$$

$$k_s = 0.7;$$

$$k_b = \frac{0.15}{\varphi_l \cdot (0.3 + \delta_e)} = \frac{0.15}{1.478 \cdot (0.3 + 1.5)} = 0.056;$$

$$I_b = \frac{\pi r_1^4}{4} \left(1 - \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^4\right) = \frac{3.14 \cdot 0.25^4}{4} \left(1 - \left(\frac{0.15}{0.25}\right)^4\right) = 0.002670 \text{ м}^4;$$

$$I_s = \frac{A_{s,tot} \cdot \left(\frac{r_1 + r_2}{2}\right)^2}{2} = \frac{0.002011 \cdot \left(\frac{0.25 + 0.15}{2}\right)^2}{2} = 0.000040 \text{ м}^4;$$

$$D = k_b \cdot E_b \cdot I_b + k_s \cdot E_s \cdot I_s = 0.056 \cdot 30\,000\,000 \cdot 0.002670 + 0.7 \cdot 200\,000\,000 \cdot 0.000040 =$$

$$= 10\,149 \text{ кН} \cdot \text{м}^2;$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot D}{l_0^2} = \frac{3.14^2 \cdot 10\,149}{12^2} = 696 \text{ кН};$$

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} = \frac{1}{1 - \frac{120}{696}} = 1.208.$$

Вычисляем относительную высоту сжатой зоны бетона согласно формуле Д.1 Приложения Д [1]:

$$\xi_{cir} = \frac{N + R_s \cdot A_{s,tot}}{R_b \cdot A + (R_{sc} + 1.7 \cdot R_s) \cdot A_{s,tot}} = \frac{120 + 347\,826 \cdot 0.002011}{14\,231 \cdot 0.12567 + 2.7 \cdot 347\,826 \cdot 0.002011} = 0.223.$$

Так как $0.15 < \xi_{cir} < 0.6$, тогда коэффициент использования стойки по прочности находим по формуле Д.2 Приложения Д [1]:

$$K_{исп} = \frac{M \cdot \eta}{(R_b \cdot A \cdot r_m + R_{sc} \cdot A_{s,tot} \cdot r_s) \cdot \frac{\sin \pi \xi_{cir}}{\pi} + R_s \cdot A_{s,tot} \cdot r_s \cdot (1 - 1.7 \cdot \xi_{cir})(0.2 + 1.3 \cdot \xi_{cir})} =$$

$$= \frac{110 \cdot 1.208}{(14\,231 \cdot 0.12567 \cdot 0.2 + 347\,826 \cdot 0.002011 \cdot 0.2) \cdot \frac{\sin(3.14 \cdot 0.223)}{3.14} + 347\,826 \cdot 0.002011 \cdot 0.2 \cdot (1 - 1.7 \cdot 0.223)(0.2 + 1.3 \cdot 0.223)}$$

$$= 0.919,$$

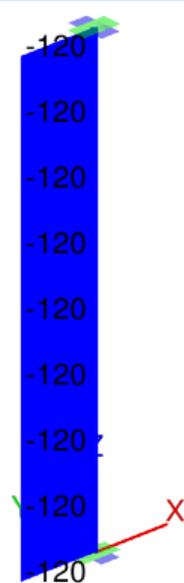
где

$$r_m = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{0.25 + 0.15}{2} = 0.2 \text{ м.}$$

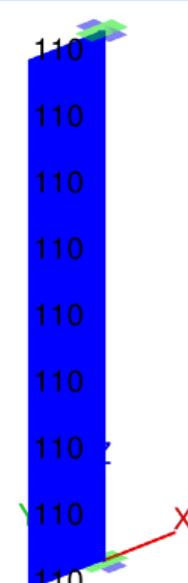
РАСЧЁТ В ПЛАГИНЕ



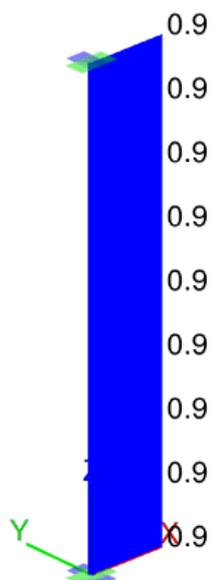
Общий вид модели



Продольные усилия, кН



Изгибающие моменты, кН·м



Коэффициенты использования стойки по прочности при внецентренном сжатии

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметр для сравнения	SV Plugins	Аналитический расчёт	Отн. погрешность, %
Максимальный коэффициент использования стойки по прочности при внецентренном сжатии	0.900	0.919	2.1

ССЫЛКИ

1. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (с Изменением N 1). Москва, 2019.