



УКРАИНСКИЙ ЦЕНТР
СТАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА

Расчет и проектирование сталежелезобетонных колонн. Рабочий пример

Докладчик :
Ассистент кафедры железобетонных и каменных конструкций
Постернак О.М.

Введение. Область применения. Преимущества

Сталежелезобетонные конструкции являются мощным инструментом повышения конкурентоспособности стальных каркасов в различных сегментах строительства, и особенно в многоэтажных коммерческих объектах. Подобная тенденция четко отслеживается на развитых рынках недвижимости Германии, США, Канады, Великобритании и т. д. Главными преимуществами сталежелезобетонных конструкций, позволяющими добиться такого эффекта, стали:

- **Высокая скорость строительства**
- **Снижение металлоемкости каркаса**
- **Большие пролеты при небольших габаритах**
- **Устойчивость каркаса**
- **Повышенная огнестойкость**
- **Снижение транспортных расходов**
- **Простота разводки инженерных сетей**

Сталежелезобетонные колонны. Типы.

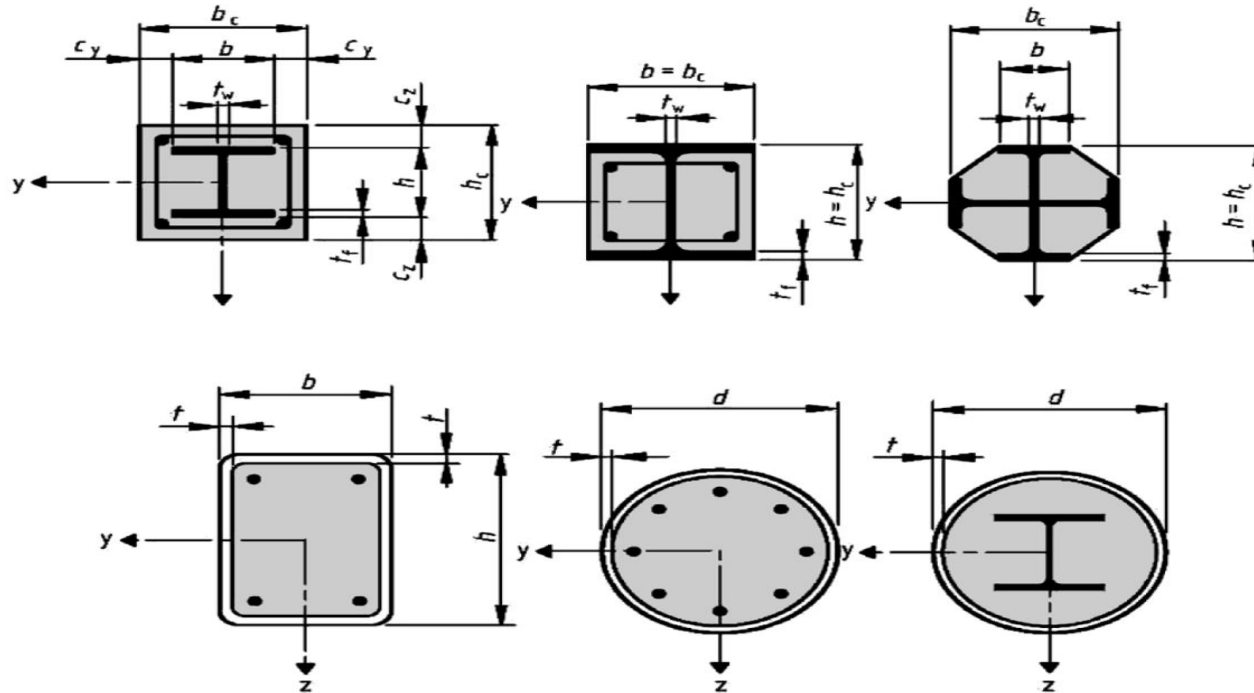


Рисунок 1. Наиболее распространенные типы сечений сталежелезобетонных колонн

Методы расчета

Соответственно с EN 1994-1-1 применяется два метода расчета:

- общий метод, область применения которого включает элементы с несимметричными или переменными по длине колонн поперечными сечениями;
- упрощенный метод для элементов с постоянным по длине и имеющими две оси симметрии поперечными сечениями.

При расчете сталежелезобетонных колонн или сжатых элементов любого поперечного сечения следует проверять:

- несущую способность элемента;
- местную устойчивость;
- передачу усилий в зоне приложения нагрузки;
- несущую способность на сдвиг вне зоны приложения нагрузки.

Упрощенный метод расчета

Классификация

Классификация сталежелезобетонных колонн определяется параметром коэффициента влияния стали δ , характеризующего долю усилия, воспринимаемого стальным сечением. Согласно ДСТУ-Н Б EN1994-1-1 колонна здания может считаться сталежелезобетонной, если коэффициент влияния стали δ удовлетворяет следующему критерию:

$$0,2 \leq \delta \leq 0,9$$

Соответственно при δ менее 0,2 колонну следует считать железобетонной и применять к ней положения Еврокода 2, а при δ более 0,9 рассматривать как стальную и руководствоваться Еврокодом 3.

Согласно упрощенному методу расчета сталежелезобетонных колонн коэффициент влияния стали δ определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}}$$

Упрощенный метод расчета

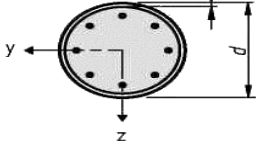
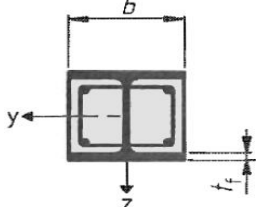
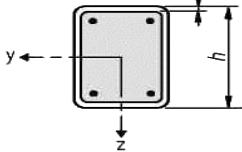
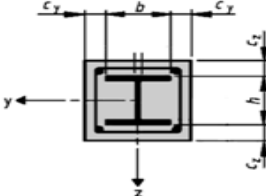
Основные ограничения параметров сечения, включают следующие требования:

- применяемый стальной профиль является катанным, холодноформованным (подразумеваются трубы) либо сварным;
- сечение является цельным и не состоит из двух или более несвязанных профилей;
- сечение имеет две оси симметрии;
- элемент имеет постоянное по длине сечение;
- отношение высоты сечения к его ширине находится в пределах от 0,2 до 5,0;
- максимальные значения защитных слоев принятые расчетом для полностью обетонированных сечений не превышают: $\max c_z = 0,3h$ и $\max c_y = 0,4b$;
- отношение площади принятого расчетом продольного армирования A_s к площади бетонного заполнения A_c не превышает 6%
- Условная гибкость колонны должна удовлетворять следующему условию: $\bar{\lambda} \leq 2,0$

Местная потеря устойчивости

Не учитывать расчетом эффекты от местной потери стальным сечением устойчивости допускается при выполнении конструктивных требований, указанных в Таблице 1.

Таблица 1. Конструктивные требования для исключения местной потери устойчивости

Поперечное сечение	Условие	Поперечное сечение	Условие
<p>Круглая труба</p> 	$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \frac{235}{f_y}$	<p>Двутавр с частичным обетонированием</p> 	$\frac{b}{t_f} \leq 44 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
<p>Прямоугольная труба</p> 	$\frac{h}{t} \leq 52 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	<p>Двутавр с полным обетонированием</p> 	$c_z \geq 40 \text{ мм}$ <p>и</p> $c_z \geq \frac{b}{6}$

Несущая способность по прочности сечения на сжатие

Несущую способность сталежелезобетонного поперечного сечения на сжатие в пластической стадии

$N_{pl,Rd}$ следует :

- для полностью либо частично обетонированных сечений

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yk} + 0,85 \cdot A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_{sk}$$

- для замкнутых сечений, заполненных бетоном

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yk} + A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_{sk}$$

При расчете заполненных бетоном труб круглого сечения может быть учтено упрочнение бетона

вследствие его обжатия стальной трубой при условии, что гибкость $\bar{\lambda}$ не превышает 0,5 и $\frac{e}{d} < 0,1$

Несущая способность по прочности сечения на сжатие

Несущую способность на сжатие в пластической стадии можно определить по следующей формуле:

$$N_{pl,Rd} = \eta_a \cdot A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}} \right) + A_s \cdot f_{sd}$$

где:

- при отсутствии эксцентриситета ($e = 0$)

$$\begin{aligned} \eta_a &= \eta_{a0} = 0,75 + 0,5 \cdot \bar{\lambda}, \text{ но не более } 1,0 \\ \eta_c &= \eta_{c0} = 4,9 - 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2, \text{ но не менее } 0 \end{aligned}$$

- при совместном действии сжатия с изгибом ($0 < e/d \leq 0,1$)

$$\begin{aligned} \eta_a &= \eta_{a0} + 10 \cdot (1 - \eta_{a0}) \cdot \frac{e}{d} \\ \eta_c &= \eta_{c0} \cdot \left(1 - 10 \cdot \frac{e}{d} \right) \end{aligned}$$

- при $e/d > 0,1$

$$\eta_a = 1,0; \eta_c = 0.$$

Несущая способность по прочности сечения на сжатие

Для напряжений в бетоне более $0,8 \cdot f_{ck}$ его коэффициент Пуассона, выше, чем у стали. В результате бетон пытается распереть трубу, но она удерживает его, начиная работать, как растянутое кольцо. Возникающему сложному напряженному состоянию стального сечения соответствует условие прочности, выражаемое через эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{a,Rd}^2 + \sigma_{a,\varphi}^2 - \sigma_{a,Rd} \cdot \sigma_{a,\varphi} = f_{yd}^2$$

Дополнительные кольцевые напряжения снижают предельные продольные напряжения в сечении трубы:

$$\sigma_{a,Rd} = \eta_a \cdot f_{yd}$$

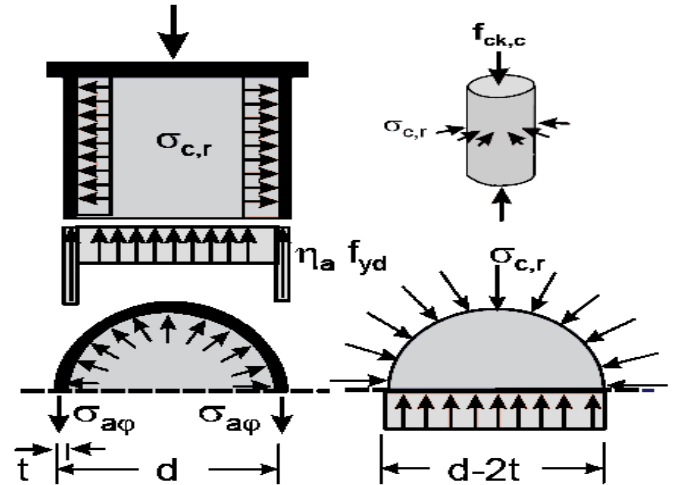


Рисунок 2. Иллюстрация эффекта от обжатия бетона в заполненных бетоном круглых трубах

Несущая способность по устойчивости при центральном сжатии

Расчет центрально-сжатых сталежелезобетонных элементов согласно EN 1994-1-1 при условии:

$$\alpha_{cr} < 10 \text{ и } \bar{\lambda} > 0,5 \cdot \sqrt{N_{pl,Rk}/N_{Ed}}$$

потребуется учета локальных несовершенств элемента, что может быть реализовано одним из двух подходов:

1. введение эквивалентного геометрического несовершенства;
2. проверка с применением кривых потери устойчивости, которая автоматически учитывает локальные несовершенства элемента.

В общем случае для центрально-сжатых элементов рекомендован второй метод учета локальных несовершенств. При условии, что элемент классифицируется как сталежелезобетонный и выполняет требования упрощенного метода, это позволяет вести вычисления по упрощенной условно центрально-сжатой расчетной схеме с проверкой устойчивости стержня по формуле:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0$$

Несущая способность по устойчивости при центральном сжатии

χ — понижающий коэффициент для соответствующей формы потери устойчивости согласно Разделу 6.3.1.2. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1.

Указанный раздел определяет χ в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ по соответствующей кривой потери устойчивости, которая численно описывается формулой:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ но } \chi \leq 1,0$$

где:

$$\phi = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$\bar{\lambda}$ — условная гибкость, определяемая для жесткости $(EI)_{eff}$ на этапе проверки соответствия сжатого элемента упрощенному методу расчета

α — коэффициент, учитывающий начальные несовершенства

Несущая способность по устойчивости при центральном сжатии

Согласно разделу 6.3.1.2. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1 χ определяется в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ по соответствующей кривой потери устойчивости, которая численно описывается формулой:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ но } \chi \leq 1,0$$

где:

$$\phi = 0,5[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

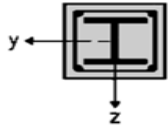
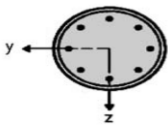
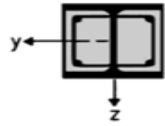
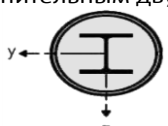
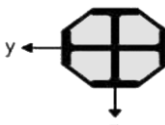
Таблица 2. Значения коэффициента начальных несовершенств в зависимости от кривой потери устойчивости при центральном сжатии

Кривая потери устойчивости	a	b	c
Коэффициент начальных несовершенств α	0,21	0,34	0,49

Несущая способность по устойчивости при центральном сжатии

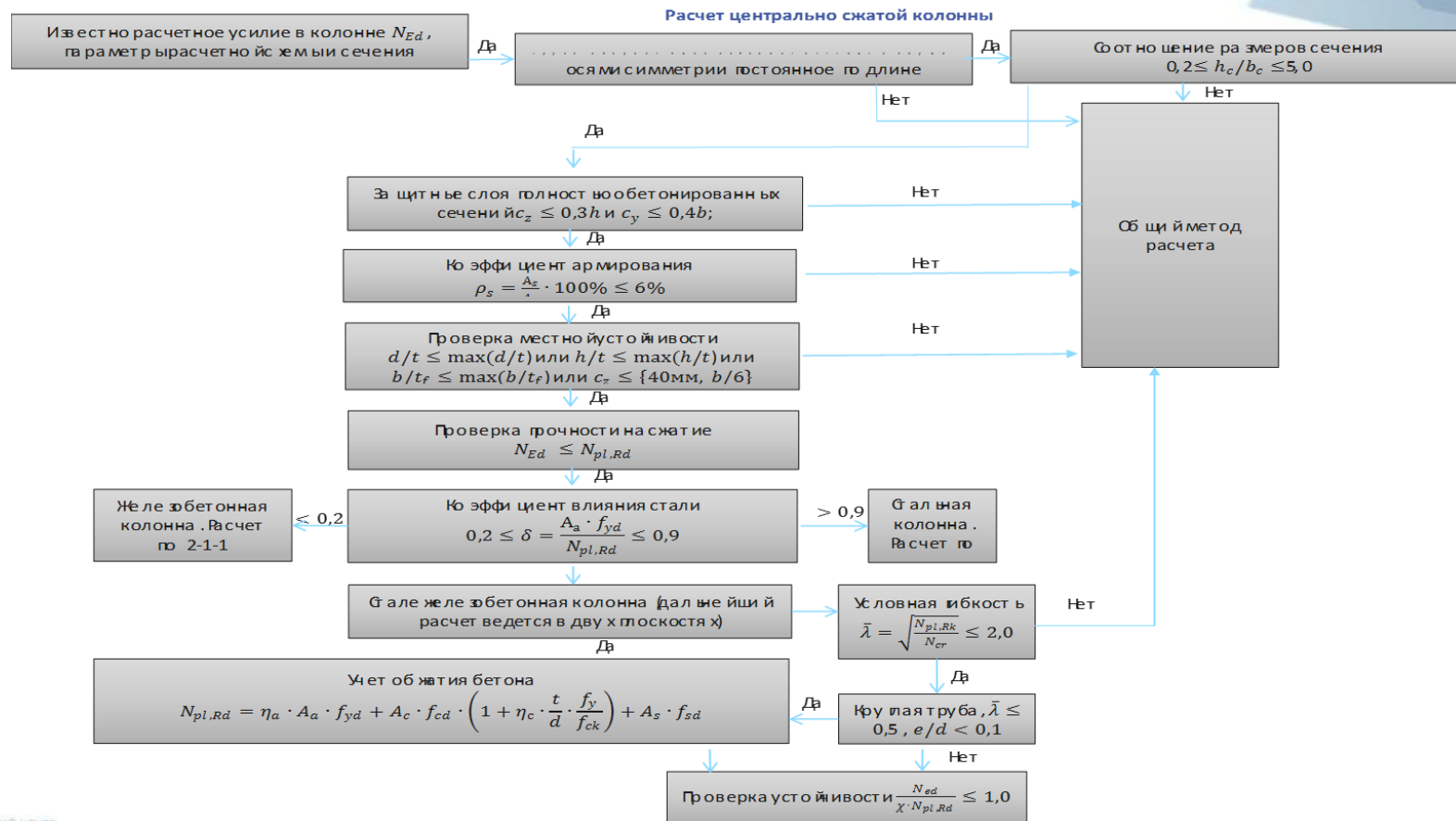
Хотя методика расчета понижающего коэффициента χ взята из Еврокода 3 (ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1), выбор кривых потери устойчивости сталежелезобетонных сжатых элементов определяется Еврокодом 4 (ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1), согласно указаниям в Таблице 3.

Таблица 3. Кривые потери устойчивости для сталежелезобетонных колонн

Поперечное сечение	Пределы	оси	Кривая	Поперечное сечение	Пределы	оси	Кривая
Полностью обетонированное сечение 	-	$y - y$	b	Круглое либо прямоугольное трубобетонное сечение 	$\rho_s \leq 3\%$	Любая	a
		$z - z$	c		$3\% < \rho_s \leq 6\%$	Любая	b
Частично обетонированное сечение 	-	$y - y$	b	Круглое трубобетонное сечение с дополнительным двутавром 	-	Любая	b
		$z - z$	c				
Частично обетонированное крестообразное сечение из двутавров 	-	Любая	b				

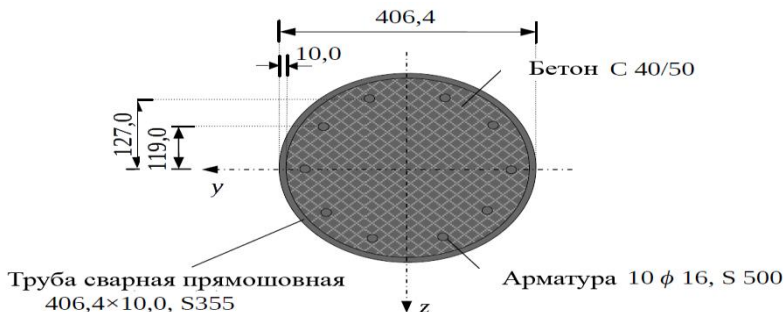
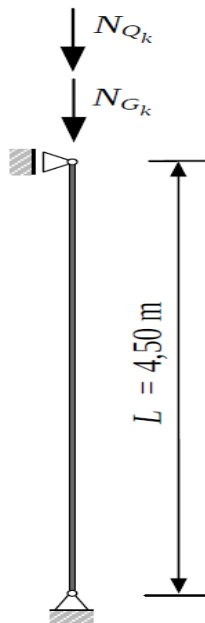
ρ_s — отношение A_s/A_c площади продольного армирования к площади бетонного заполнения

АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ



Рабочий пример

Центрально сжатая сталежелезобетонная колонна с сечением из круглого замкнутого профиля, заполненного бетоном



Бетон:

Класс бетона - C40/50

$$f_{ck} = 40 \text{ Н/мм}^2$$
$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{40}{1,5} = 26,7 \text{ Н/мм}^2$$
$$E_{cm} = 35000 \text{ Н/мм}^2$$

Стальная арматура:

Класс вязкости - В или С

$$f_{sk} = 500 \text{ Н/мм}^2$$
$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ Н/мм}^2$$

Стальной профиль:

Сталь - S355

$$f_{yk} = 355 \text{ Н/мм}^2$$
$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{355}{1,0} = 355 \text{ Н/мм}^2$$
$$E_a = 210000 \text{ Н/мм}^2$$

Рабочий пример

Определение расчетных усилий выполним упрощенно, приняв для переменной нагрузки коэффициент сочетаний $\psi_0 = 1,0$. Тогда наиболее неблагоприятной становится комбинация по формуле 6.10а ДСТУ-Н Б EN1990:

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_G + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot N_Q$$

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot 3000 + 1.50 \cdot 1,0 \cdot 1300 = 6000 \text{ кН}$$

Геометрические характеристики сечения

Принято, что колонна работает исключительно на центральное сжатие и требуемый предел огнестойкости составляет R15. В таком случае мероприятия по повышению огнестойкости элемента не требуются.

В качестве стального профиля принята сварная прямошовная труба диаметром 406,4мм. Согласно ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1 для круглого трубобетонного сечения минимально требуемую толщину профиля можно определить из условия потери местной устойчивости:

$$\max\left(\frac{d}{t}\right) = 90 \cdot \frac{235}{f_y}$$

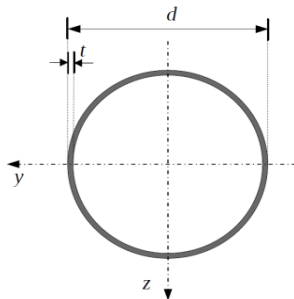
$$\max\left(\frac{d}{t}\right) = 90 \cdot \frac{235}{355} = 59.6$$

Отсюда можно получить минимально требуемую толщину стенки:

$$t_{min} = \frac{d}{59,6} = \frac{406,4}{59,6} = 6.82$$

Рабочий пример

Следовательно, минимальная толщина профиля составляет 7,0. Принимаем сварную прямошовную трубу 406,4x10,0. Сечение принятой трубы показано на рисунке ниже:



$$d = 406,4 \text{ мм}$$

$$t = 10 \text{ мм}$$

$$A_a = 124,5 \text{ см}^2$$

$$I_a = 24476 \text{ см}^4$$

$$W_{pl,a} = 1572 \text{ см}^3$$

Данным примером принято продольное армирование из 10-ти стержней диаметром 16мм.

Площадь стального сечения трубы составляет: $A_a = 124,5 \text{ см}^2$

Общая площадь продольного армирования: $d_{bar} = 16 \text{ мм}$; $A_{bar} = 10 \cdot A_{bar} = 10 \cdot 2,01 = 20,1 \text{ см}^2$

Общая площадь бетонной части сечения: $A_c = \pi \cdot (d - 2 \cdot t)^2 \cdot \frac{1}{4} - A_s$

$$A_c = 3,14 \cdot (40,64 - 2 \cdot 1,00)^2 \cdot \frac{1}{4} - 20,10 = 1153 \text{ см}^2$$

Коэффициент армирования железобетонной части сечения составляет:

$$\rho_s = \frac{A_s}{A_c} = \frac{20,1}{1153} = 0,017$$

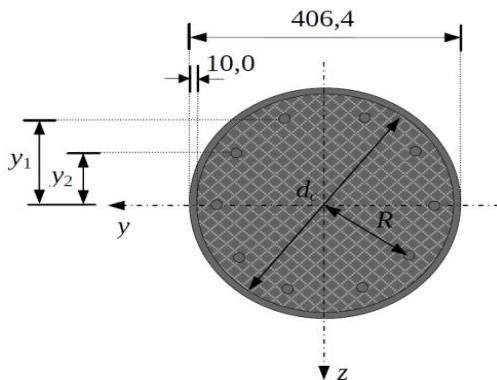
$$\rho_s = 1,7\% < 6\%$$

Предел 6%, установленный для упрощенного метода расчета ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1, соблюден.

Рабочий пример

Определение моментов инерции сечения

Момент инерции стального сечения : $I_a = 24476 \text{ см}^4$



Бетонная часть сечения:

$$I_c = \frac{\pi \cdot (d - 2 \cdot t)^4}{64} - I_s$$

$$I_c = \frac{3,14 \cdot (40,64 - 2 \cdot 1,0)^4}{64} - 1591 = 107834 \text{ см}^4$$

$$d_c = d - 2 \cdot t = 406,4 - 2 \cdot 10 = 386,4 \text{ мм}$$

$$R = \frac{d_c}{2} - 50 - \frac{d_{bar}}{2} - 8$$

$$R = \frac{386,4}{2} - 50 - \frac{16}{2} - 8 = 127 \text{ мм}$$

$$y_1 = R - \frac{d_{bar}}{2} = 127 - \frac{16}{2} = 119 \text{ мм}$$

$$y_2 = R \cdot \sin \frac{360^\circ}{10} = 127 \cdot \sin 36^\circ = 75 \text{ мм}$$

$$I_s = 4 \cdot A_{bar} \cdot y_1^2 + 4 \cdot A_{bar} \cdot y_2^2$$

$$I_s = 4 \cdot 2,01 \cdot 11,9^2 + 4 \cdot 2,01 \cdot 7,5^2 = 1591 \text{ см}^4$$

Рабочий пример

Определение моментов сопротивления сечения в пластической стадии

Стальная часть сечения:

$$W_{pl,a} = \frac{d^3}{6} - \frac{d_c^3}{6}$$
$$W_{pl,a} = \frac{40,64^3}{6} - \frac{38,64^3}{6} = 1572 \text{ см}^3$$

Продольная арматура:

$$W_{pl,s} = 4 \cdot y_1 \cdot A_{bar} + 4 \cdot y_2 \cdot A_{bar}$$
$$W_{pl,s} = 4 \cdot 11,9 \cdot 2,01 + 4 \cdot 7,5 \cdot 2,01 = 156 \text{ см}^3$$

Бетонная часть сечения:

$$W_{pl,c} = \frac{d_c^3}{6} - W_{pl,s}$$
$$W_{pl,c} = \frac{38,64^3}{6} - 156 = 9459 \text{ см}^3$$

Рабочий пример

Коэффициент влияния стали

Согласно ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1, коэффициент влияния стальной части сечения определяется выражением:

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}}$$

Физическим смыслом выражения $A_a \cdot f_{yd}$ является вклад стальной части в несущую способность сечения на сжатие в пластической стадии работы:

$$A_a \cdot f_{yd} = 124,5 \cdot 35,5 = 4420 \text{ кН}$$

Несущая способность всего сечения по прочности в пластической стадии из условия заполненного бетоном замкнутого стального профиля:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}$$

$$N_{pl,Rd} = 124,5 \cdot 35,5 + 1153 \cdot 2,67 + 20,1 \cdot 43,5 = 8373 \text{ кН}$$

Рабочий пример

Согласно ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1 коэффициент влияния стальной части сечения δ должен находиться в следующем диапазоне:

$$0,2 \leq \delta \leq 0,9$$

Коэффициент вклада стального профиля составляет:

$$\delta = \frac{A_a \cdot f_{yd}}{N_{pl,Rd}} = \frac{4420}{8373} = 0,528$$

Поскольку условие $0,2 < \delta = 0,528 < 0,9$ выполняется, колонна может быть классифицирована, как сталежелезобетонная и рассчитываться согласно ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1.

Рабочий пример

Проверка местной устойчивости стального профиля

Согласно ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1 для заполненных бетоном круглых замкнутых профилей местной потерей устойчивости можно пренебречь, если выполняется следующее условие:

$$\max\left(\frac{d}{t}\right) = 90 \cdot \frac{235}{f_y}$$

Для данного сечения указанная гибкость составляет:

$$\left(\frac{d}{t}\right) = \frac{406,4}{10,0} = 40,64$$

Предельное значение равно:

$$90 \cdot \frac{235}{f_y} = 90 \cdot \frac{235}{355} = 59,6$$

Поскольку $40,64 < 59,6$, условие выполняется. Местная потеря устойчивости может не учитываться. Это условие было учтено при изначальном подборе стального профиля и дублируется для соблюдения алгоритма в обучающих целях.

Рабочий пример

Эффективный модуль упругости бетона

Для длительного нагружения колонн ползучесть и усадка учитываются снижением изгибной жесткости сталежелезобетонного сечения. Учет влияния ползучести на изгибную жесткость колонны следует выполнять понижением модуля упругости бетона с E_{cm} до эффективного значения $E_{c,eff}$ согласно следующему выражению:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right) \cdot \varphi_t}$$

Для определения коэффициента ползучести $\varphi(t, t_0)$ следует рассчитать ряд значений:

- периметр условного контура бетонной части, подверженного высыханию

$$u = \pi \cdot d$$

$$u = 3,14 \cdot 40,64 = 127,7 \text{ см}$$

- условный размер сечения

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 1153}{127,7} = 18,1 \text{ см} = 181 \text{ мм}$$

- время приложения нагрузки $t_0 = 28$ дней

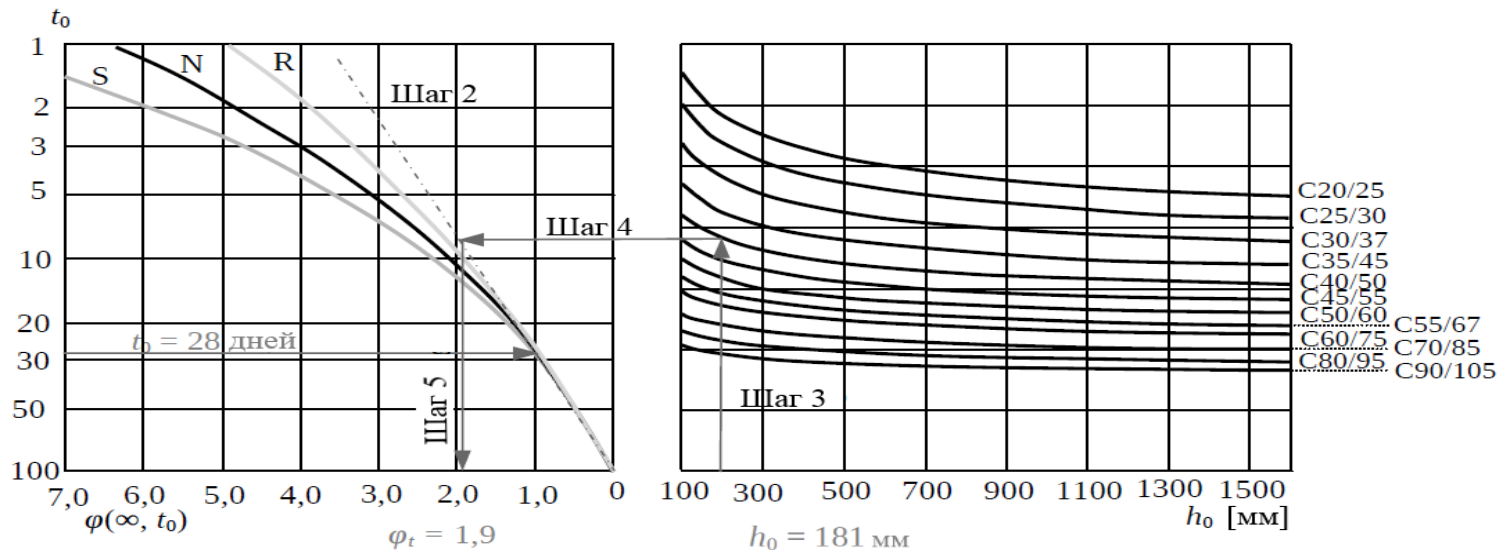
- относительная влажность среды принята RH 50%

- класс прочности бетона согласно исходным данным C40/50

- класс цемента по набору прочности N (normal, нормальный)

Рабочий пример

Окончательное значение коэффициента ползучести $\varphi_t = \varphi(\infty, t_0)$ с учетом данных параметров определяется согласно номограммам ниже:



Согласно рисункам окончательный коэффициент усадки $\varphi_t = \varphi(\infty, t_0)$ составляет:

$$\varphi_t = \varphi(\infty, t_0 = 28 \text{ дней}) = 1.9$$

Рабочий пример

Постоянная составляющая $N_{G,Ed}$ и полная расчетная нагрузка N_{Ed} равны соответственно:

$$N_{G,Ed} = \gamma_G \cdot N_{Gk}$$

$$N_{G,Ed} = 1,35 \cdot 3000 = 4050 \text{ кН}$$

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot N_{Gk} + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot N_{Qk}$$

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot 3000 + 1.50 \cdot 1,0 \cdot 1300 = 6000 \text{ кН}$$

Подстановка полученных значений позволяет определить $E_{c,eff}$:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \left(\frac{N_{G,Ed}}{N_{Ed}} \right) \cdot \varphi_t} = \frac{3500}{1 + \left(\frac{4050}{6000} \right) \cdot 1,9} = 1533 \text{ кН/см}^2$$

Для дальнейших расчетов используется значение эффективного модуля упругости бетона $E_{c,eff} = 1533 \text{ кН/см}^2$.

Рабочий пример

Несущая способность сечения по прочности на сжатие

Несущая способность сечения на сжатие без учета упрочнения в результате обжатия

Расчетная несущая способность сталежелезобетонного сечения по критерию прочности на сжатие $N_{pl,Rd}$ определяется суммой соответствующих составляющих для его компонентов по следующей формуле:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + 0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}$$

Для замкнутых сечений, заполненных бетоном, благодаря улучшенным условиям твердения бетонного заполнения коэффициент 0,85 может заменяться на 1,0. Следовательно, в данном случае, несущая способность на сжатие в пластической стадии $N_{pl,Rd}$ равна:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot f_{sd}$$
$$N_{pl,Rd} = 124,5 \cdot 35,5 + 1153 \cdot 2,67 + 20,1 \cdot 43,5 = 8373 \text{ кН}$$

Характеристическое значение несущей способности по критерию прочности на сжатие $N_{pl,Rk}$ составляет:

$$N_{pl,Rk} = A_a \cdot f_{yk} + A_c \cdot f_{ck} + A_s \cdot f_{sk}$$
$$N_{pl,Rk} = 124,5 \cdot 35,5 + 1153 \cdot 4,00 + 20,1 \cdot 50,0 = 10037 \text{ кН}$$

Рабочий пример

Учет обжатия бетона

Для бетонного заполнения замкнутых сечений присуще повышение прочности благодаря эффекту обжатия, что учитывается согласно Разделу 6.7.3.2 ДСТУ-Н Б EN1994-1-1.

Повышение прочности бетона допускается учитывать в случае, когда условная гибкость $\bar{\lambda}$ не превышает 0,5, а отношение $e/d < 0.1$. Эксцентриситет приложения нагрузки равен M_{Ed}/N_{Ed} , а d – это внешний диаметр колонны. В рассматриваемом случае $\bar{\lambda} = 0,564$, что рассчитано далее.

При $\bar{\lambda} = 0,564 > 0,5$ условие не выполняется, и учитывать упрочнение в результате обжатия не следует.

Дальнейший расчет выполнен на основании значения несущей способности по критерию прочности сечения в пластической стадии $N_{pl,Rd} = 8373 \text{ кН}$.

Рабочий пример

Определение несущей способности на сжатие по критерию устойчивости с использованием кривых устойчивости

Базовые требования для использования упрощенного метода заключаются в том, что сечение сталежелезобетонной колонны должно иметь две оси симметрии и постоянное по длине сечение.

Данные критерии соблюдены.

Условная гибкость

Использовать упрощенный метод расчета допускается только при выполнении следующего условия:

$$\bar{\lambda} \leq 2.0$$

Условная гибкость $\bar{\lambda}$ определяется по формуле:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$$

Для определения условной гибкости $\bar{\lambda}$ требуется рассчитать критическое усилие потери устойчивости в упругой стадии N_{cr} с использованием эффективной изгибной жесткости сечения сталежелезобетонной колонны $(EI)_{eff}$ согласно выражению:

$$(EI)_{eff} = E_a \cdot I_a + E_s \cdot I_s + K_e \cdot E_{c,eff} \cdot I_c$$

Рабочий пример

Для шарнирно-опертой колонны расчетная длина равна геометрической и критическое усилие составляет:

$$N_{cr} = \frac{(EI)_{eff} \cdot \pi^2}{L^2}$$
$$N_{cr} = \frac{646,59 \cdot 10^6 \cdot 3,14^2}{450^2} = 31514 \text{ кН}$$
$$N_{pl,Rk} = 10037 \text{ кН}$$

Условная гибкость $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{10037}{31514}} = 0,564$$

Соответственно условие $\bar{\lambda} = 0,564 < 2,0$ выполнено.

Кроме этого максимальное продольное армирование $A_{s,max}$ не должно превышать 6% площади бетона. Проверка данного условия выполнена ранее.

Соотношение высоты к ширине сечения должно находиться в пределах от 0,2 до 5,0. В данном случае сечение круглое, а следовательно соотношение сторон равно 1,0 и находится в заданных пределах.

Таким образом, все требования Раздела 6.7.3.1 ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1 для применения упрощенного метода расчета сталежелезобетонных колонн выполнены.

Рабочий пример

Проверка устойчивости колонны

Устойчивость центрально-сжатых элементов может проверяться по теории второго порядка с учетом их несовершенств. Кривые потери устойчивости упрощают расчет, поскольку автоматически учитывают локальные несовершенства элемента. Согласно проверке с использованием кривых устойчивости N_{Ed} должно удовлетворять условию:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} \leq 1,0$$

Понижающий коэффициент определяется выражением:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ но } \chi \leq 1,0$$

и

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

Выбор соответствующей кривой потери устойчивости осуществляется согласно Таблице 6.5, ДСТУ-Н Б EN 1994-1-1. В случае круглой трубобетонной колонны с коэффициентом армирования до 3% расчет ведется по кривой a , которой соответствует коэффициент несовершенства $\alpha = 0,21$. При армировании от 3% до 6% расчет должен вестись по кривой b и $\alpha = 0,34$.

Рабочий пример

В данном случае армирование составляет $\rho_s = 1,7\%$. Следовательно расчетом принимается кривая устойчивости α .

Тогда:

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,564 - 0,2) + 0,564^2] = 0,697$$

Понижающий коэффициент:

$$\chi = \frac{1}{0,697 + \sqrt{0,697^2 - 0,564^2}} = 0,90 \leq 1,0$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{ed}}{\chi \cdot N_{pl,Rd}} = \frac{6000}{0,90 \cdot 8373} = 0,80 \leq 1,0$$

Таким образом проверка сжатой колонны по упрощенной методике с использованием кривых потери устойчивости удовлетворяет условиям.

Выводы

Как и ожидалось, определяющим критерием для рассматриваемой центрально сжатой сталежелезобетонной колонны стала несущая способность по потере устойчивости. Характер нагрузки и геометрия колонны позволили значительно упростить расчет. Главным образом это стало возможным благодаря тому, что колонна соответствовала требованиям упрощенного метода расчета сталежелезобетонных колонн. Отсутствие же изгибающих моментов от непосредственного приложения нагрузок позволило выбрать между менее точным, но простым расчетом по кривым устойчивости, и более точным, но трудоемким методом с непосредственным введением локальных несовершенств и расчетом элемента как сжато-изогнутого. Выбор был сделан в пользу наиболее простой схемы расчета по упрощенному методу с использованием кривых потери устойчивости.

При проектировании сталежелезобетонных колонн рационально изначально конструировать сечение с учетом требований упрощенного метода расчета, ограничений по местной потере устойчивости и дополнительных конструктивных правил. Поскольку одним из главных преимуществ сталежелезобетонных колонн является повышенная огнестойкость, на нее следует обращать особое внимание и включать в исходные данные для определения конфигурации сечения.

СПАСИБО!

www.uscc.com.ua | +38-044-590-01-56

