1.3. Расчеты по эксплуатационной пригодности (SLS)

В общем случае при расчетах по эксплуатационной пригодности учитываются возможные изменения величины предварительного натяжения. Определяются два характеристических значения усилия предварительного напряжения [5, формулы (5.47) и (5.48)]:

$$P_{k,sup} = r_{sup} P_{m,t}(x);$$

$$P_{k,inf} = r_{inf} P_{m,t}(x),$$

где $P_{k,sup}$ – верхнее характеристическое значение; $P_{k,inf}$ – нижнее характеристическое значение.

Значения коэффициентов r_{sup} и r_{inf} могут быть указаны в Национальном приложении. Для обычных предварительно напряженных элементов или для напрягающих элементов без сцепления с бетоном рекомендуемые значения: $r_{sup}=1{,}05$ и $r_{inf}=0{,}95$.

1.3.1. Расчет трещиностойкости

Методика расчета ширины раскрытия трещин приведена в [5, п. 7.3.4].

Предельное значение $w_{\max}$ для расчетной ширины раскрытия w_k должно быть установлено с учетом предполагаемого назначения и вида конструкции, а также расходов на ограничение трещинообразования [5, табл. 7.1N].

При частном сочетании нагрузок для класса эксплуатации конструкции XC1 $w_{\max}$ = 0,2 мм. Расчет выполняется на действие пониженной нормативной нагрузки.

Ширина раскрытия трещин

$$w_k = s_{r,\max}\left(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}\right),$$

где $s_{r,\max}$ – максимальное расстояние между трещинами; ε_{sm} – средние относительные деформации арматуры при определяющем сочетании воздействий, включая влияние вынужденных деформаций и учитывая работу бетона на растяжение; ε_{cm} – средние относительные деформации бетона между трещинами.

Значение $\left(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}\right)$ определяется по формуле

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \dfrac{f_{ct,eff}}{\rho_{s,eff}}\left(1 + \alpha\rho_{s,eff}\right)}{E_p} \geq 0,6\frac{\sigma_s}{E_p},$$

где σ_s – напряжение в арматуре сечения с трещиной. Для предварительно напряженных элементов σ_s может быть заменено на $\Delta\sigma_p$ – увеличение напряжения в предварительно напряженной арматуре,

$$\Delta\sigma_p = \frac{\alpha\varphi\left(t,t_0\right)\cdot\left(M_q + M_{сн}\right)y_p \cdot 10^3}{I_{red}} =$$

$$= \frac{6,06\cdot 2,07\left(835,54 + 104,17\right)560,9\cdot 10^3}{5,52\cdot 10^{10}} = 0,120\ \text{кН/мм}^2 = 120\ \text{МПа},$$

здесь $\varphi\left(t,t_0\right) = 2,07$ – коэффициент ползучести в момент времени t при приложении нагрузки в момент времени t_0 (п. 1.2.4.1.2);

$M_q = 835,54$ кН · м – момент от постоянной нагрузки $q = 23,1$ кН/м (п. 1.2.4.1.2);

$$M_{сн} = \frac{0,5\cdot 5,76\cdot 6,542}{2}\left(17,6 - 6,542\right) = 104,17\ \text{кН}\cdot\text{м} –$$

момент от снеговой нагрузки (при $\psi_1 = 0,5$), где ψ_1 – коэффициент, учитывающий пониженную составляющую временной нагрузки [1, табл. A.1.1]. В проекте Национального приложения РФ к EN 1990 для снеговой нагрузки $\psi_1 = 0,5$; $y_p = 560,9$ мм – расстояние от центра тяжести приведенного поперечного сечения до центра тяжести напрягаемой арматуры (п. 1.2.3); $I_{red} = 5,52 \cdot 10^{10}$ мм^4 – момент инерции приведенного поперечного сечения (см. п. 1.2.3);

k_t – коэффициент, зависящий от длительности действия нагрузки. При кратковременном действии нагрузки, $k_t = 0,6$;

$f_{ct,eff}$ – среднее значение прочности бетона при растяжении, когда впервые может произойти возникновение трещин [5, п. 7.3.2.(2)], $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2,9$ МПа; здесь f_{ctm} – среднее значение предела прочности бетона при осевом растяжении [5, табл. 3.1];

$$\alpha = E_p / E_{cm} = \left(2\cdot 10^5\right)/\left(0,33\cdot 10^5\right) = 6,06,$$

где $E_p = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости арматуры [14, п. 6.2.12];

$E_{cm} = 33$ ГПа $= 33 \cdot 10^3$ МПа – значение модуля упругости бетона в возрасте 28 сут. [5, табл. 3.1];

$$\rho_{s,eff} = \frac{\xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}} = \frac{0,894^2 \cdot 2945}{24500} = 0,096,$$

здесь A'_p = 2945 мм² – площадь поперечного сечения предварительно напряженной арматуры в пределах эффективной площади $A_{c,eff}$; $A_{c,eff}$ – эффективная площадь растянутого бетона, окружающего арматуру или напрягающие элементы, с высотой $h_{c,eff}$, причем $h_{c,eff}$ принимается как меньшее значение

$2,5(h–d)$; $(h–x)/3$; $h/2$ [5, рис. 7.1];

x – высота сжатой зоны бетона сечения с трещиной, которая определяется из условия, что статический момент относительно центра тяжести сечения равен нулю: $400 \cdot 185(x - 185/2) = 6,06 \cdot 2945(1227,5 - x)$. Из решения уравнения $x = 313,0$ мм.

В данном случае

$$A_{c,eff} = 2,5(h - d)b_w = 2,5(1350 - 1227,5)80 = 24500 \text{ мм}^2;$$

$\xi_1 = \sqrt{\xi} = \sqrt{0,8} = 0,894$ – поправочный коэффициент прочности сцепления,

здесь ξ = 0,8 — отношение прочностей сцепления напрягаемой и арматурной стали [5, табл. 6.2];

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{120 - 0,6 \cdot \frac{2,9}{0,096}(1 + 6,06 \cdot 0,096)}{2 \cdot 10^5} = 0,00046 > 0,6 \cdot \frac{120}{2 \cdot 10^5} = 0,00036.$$

Максимальное расстояние между трещинами [5, п. 7.3.4(3)]:

$$s_{r,\max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \varnothing / \rho_{s,eff}$$

где $\varnothing$ – диаметр стержня (25 мм); $c = c_{nom}$ – защитный слой бетона для продольной арматуры (72,5 мм); k_1 – коэффициент, учитывающий свойства сцепления арматуры, $k_1 = 0,8$ – для арматуры периодического профиля; k_2 – коэффициент, учитывающий распределение относительных деформаций ($k_2 = 0,5$ – для изгиба); $k_3 = 3,4$; $k_4 = 0,425$.

$$s_{r,\max} = 3,4 \cdot 72,5 + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 0,425 \cdot 25/0,096 = 290,8 \text{ мм}.$$

Ширина раскрытия трещин

$$w_k = 290,8 \cdot 0,00046 = 0,133 \text{ мм} < w_{\max} = 0,2 \text{ мм}.$$

1.3.2. Расчет по деформациям

Приближенный расчет балки по деформациям выполняется путем сравнения отношения расчетного пролета к рабочей высоте с предельно допустимым отношением для наиболее опасного сечения x-x балки (см. рис. 1). Более точный расчет прогиба балки выполняется вычислением кривизны для нескольких сечений с последующим интегрированием.

Расчет по деформациям можно не производить, если отношение пролета к высоте элемента не превышает значений, указанных в [5, формула (7.16a) или (7.16b)]. В данном случае при $\rho > \rho_0$

$$\frac{l}{d} = K\left[11 + 1{,}5\sqrt{f_{ck}}\,\frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12}\sqrt{f_{ck}}\sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}}\right],$$

где $K = 1{,}0$ – коэффициент, учитывающий различные статические системы [5, табл. 7.4N];

$$\rho_0 = 10^{-3}\sqrt{f_{ck}} = 10^{-3}\sqrt{30} = 0{,}0055 -$$

рекомендуемый коэффициент армирования;

$$\rho = \frac{A_{p,req}}{b_w d} = \frac{2525{,}0}{80 \cdot 1227{,}5} = 0{,}0257 -$$

требуемый коэффициент армирования для растянутой арматуры в расчетном сечении для восприятия момента от расчетной нагрузки (требуемая площадь арматуры – см. п. 1.2.1); p' – то же для сжатой арматуры, $p' = 0$;

$$\frac{l}{d} = 1{,}0\left[11 + 1{,}5\sqrt{30}\,\frac{0{,}0055}{0{,}0257 - 0} + \frac{1}{12}\sqrt{30}\sqrt{\frac{0}{0{,}0055}}\right] = 12{,}76.$$

Коэффициент по формуле (7.17) из [5]

$$\frac{310}{\sigma_s} = \frac{500}{f_{pk}\,\dfrac{A_{p,req}}{A_{p,prov}}} = \frac{500 \cdot 2945}{500 \cdot 2525} = 1{,}17.$$

Окончательно получается

$$\frac{17600}{1227{,}5} = 14{,}34 < \frac{l}{d} = 12{,}76 \cdot 1{,}17 = 14{,}93,$$

т.е. расчет балки по деформациям не требуется.

Примечание

При наличии специальных графиков (рис. 7) предельное отношение l/d может приниматься непосредственно из [5, табл. 7.4N] и корректироваться с учетом требуемого коэффициента армирования и с использованием уже вычисленного коэффициента (1,17).

Требуемый коэффициент армирования

$$\rho = \frac{A_{p,req}}{b_w d}100 = \frac{2525{,}0}{80 \cdot 1227{,}5}100 = 2{,}57\ \%.$$

Фактическое армирование балки $A_{p,prov} = 2945$ мм^2.

При $\rho = 2{,}57\ \%$ и $f_{ck} = 30$ МПа из графиков на рис. 7 находим $l/d = 13$:

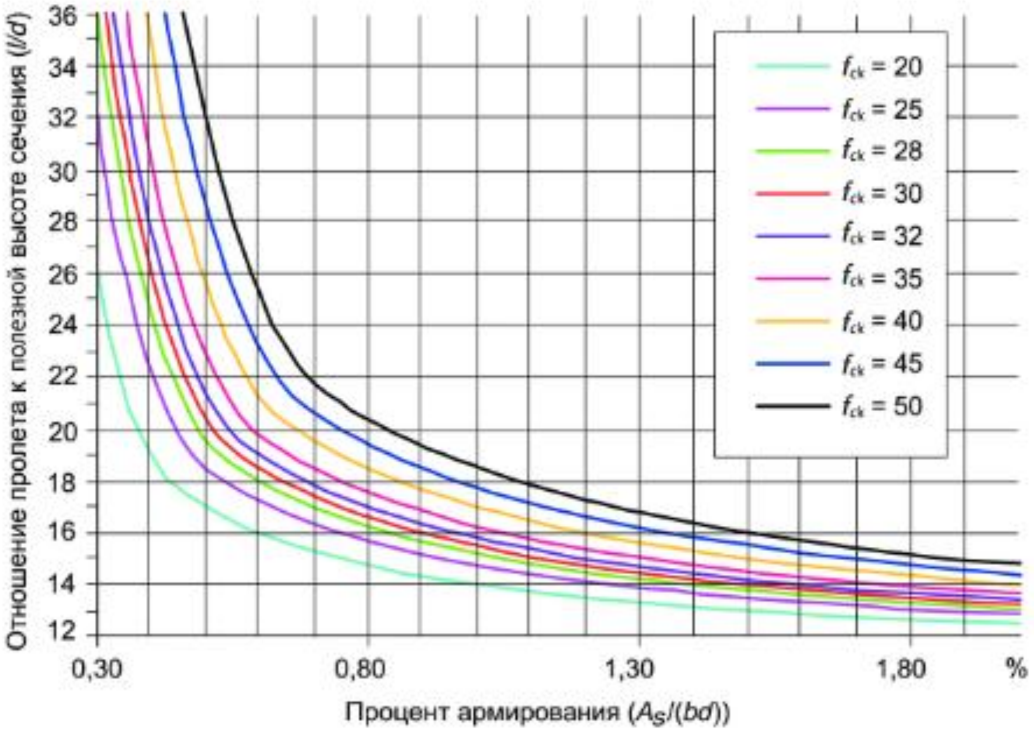

Рис. 7. Графическое представление уравнений (7.16 а) и (7.16 б) из [5] (при $K = 1$ и $\sigma_s = 310$ МПа)

Коэффициент по формуле (7.17) из [7]

$$\frac{310}{\sigma_s} = \frac{500}{f_{pk}\dfrac{A_{p,req}}{A_{p,prov}}} = \frac{500 \cdot 2945}{500 \cdot 2525} = 1{,}17.$$

Окончательно получаем

$$\frac{17600}{1227{,}5} = 14{,}34 < \frac{l}{d} = 13 \cdot 1{,}17 = 15{,}21,$$

т.е. расчет балки по деформациям не требуется.