

УДК 624.012.36

С. Д. Семенюк, д-р техн. наук, Н. В. Белый

РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ СЕРИИ Б.3.503.1–1 ДЛЯ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В статье рассматривается определение несущей способности дорожных плит марок 1ППЗ0.18-30 и 2ППЗ0.18-30 по прочности нормальных сечений в коротком и длинном направлении, а также несущая способность при совместном воздействии крутящего и изгибающего моментов. Предлагаемая методика расчета железобетонных плит покрытий автомобильных дорог по прочности нормальных сечений и на совместное воздействие крутящего и изгибающего моментов была выполнена на основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований.

Введение

Плиты железобетонные для покрытий автомобильных дорог по серии Б.3.503.1–1 предназначены для применения в сухих и водонасыщенных грунтах, со слабо- и среднеагрессивными водами. Конструкции плит разработаны институтом «БЕЛПРОЕКТ».

Плиты обозначены марками:

– 1ППЗ0.18–30 – плита покрытий с ненапрягаемой арматурой для постоянных дорог – прямоугольная, размером 3000×1750×170 мм, рассчитанная под на-

грузку 300 кН (рис. 1);

– 2ППЗ0.18–30 – плита покрытий с ненапрягаемой арматурой для временных дорог – прямоугольная, размером 3000×1750×170 мм, рассчитанная под нагрузку 300 кН (см. рис. 1).

Используется бетон класса С20/25 для плит временных дорог и С25/30 для плит постоянных дорог, плиты армированы верхней и нижней сетками (С1, С2) из стали класса S400. Сетки соединены между собой при помощи двух г-образных плоских каркасов (К1) из стали класса S500.

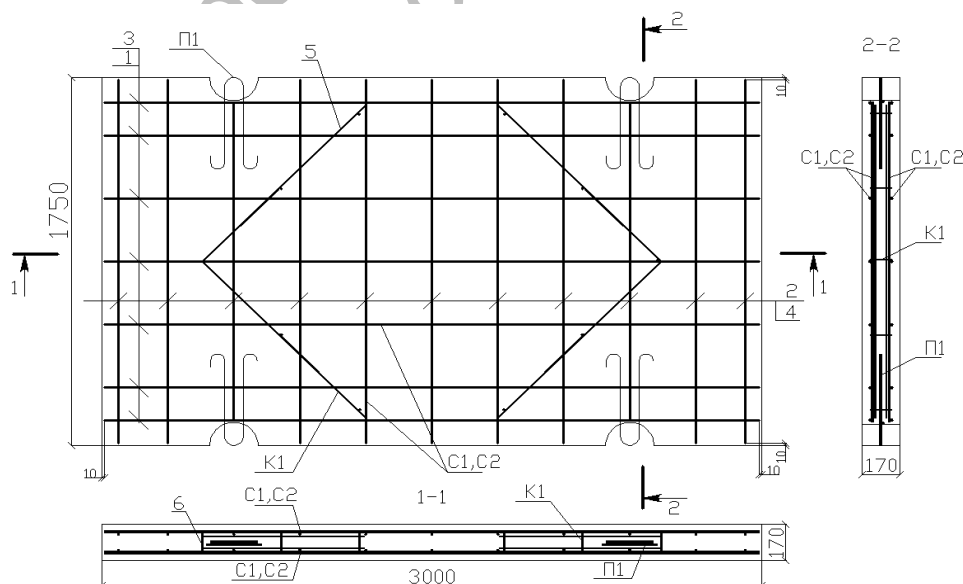


Рис. 1. Опалубочные чертежи и схемы армирования плит железобетонных для покрытий автомобильных дорог марок 1ППЗ0.18–30, 2ППЗ0.18–30

Плита дорожная 1ППЗ0.18–30. Сборочные единицы: сетка арматурная С1 – 2 шт., каркас плоский К1 – 2 шт., петля П1 – 4 шт.

1–7 Ø12 S400, L = 2980 мм; 5–2 Ø5 S500, L = 2100 мм; 2–11 Ø10 S400, L = 1730 мм; 6–5 Ø5 S500, L = 105 мм.

Плита дорожная 2ППЗ0.18–30. Сборочные единицы: сетка арматурная С2 – 2 шт., каркас плоский К1 – 2 шт., петля П1 – 4 шт.

3–7 Ø10 S400, L = 2980 мм; 5–2 Ø5 S500, L = 2100 мм; 4–11 Ø8 S400, L = 1730 мм; 6–5 Ø5 S500, L = 105 мм.

При эксплуатации дорожные плиты работают в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. В общем случае они работают на поперечный изгиб с кручением, в частности – на поперечный изгиб. В данной статье рассматривается влияние каждого из этих воздействий на несущую способность железобетонной плиты дорожного покрытия.

Теория расчета

Расчет прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента.

При расчете прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, в расчет вводится бетон с прочностными и деформативными характеристиками, зависящими от предельной сжимаемости, напряженно-деформированного состояния,

геометрии и компоновки сечения.

Определение предельных усилий в нормальных сечениях основывается на следующих допущениях:

– связь между напряжениями и деформациями бетона, а также между напряжениями и деформациями арматуры принимают в виде билинейной зависимости (рис. 2);

– для средних деформаций бетона конструкции и арматуры считается справедливым линейный закон распределения по высоте сечений;

– в качестве расчетного принимают сечение со средней высотой сжатой зоны «х», соответствующей средним деформациям;

– сопротивление расчетного сечения будет исчерпано, если деформации крайних сжатых волокон бетона для растянутой арматуры достигают предельных значений.

Прочность нормальных сечений находится в зависимости от степени использования сопротивления сжатого бетона и растянутой арматуры. При работе железобетонных плит дорожного покрытия прямоугольного сечения, армированных сталью, имеющей физический предел текучести (арматура классов S240, S400, S500), считается, что сопротивления арматуры и бетона используются полностью.

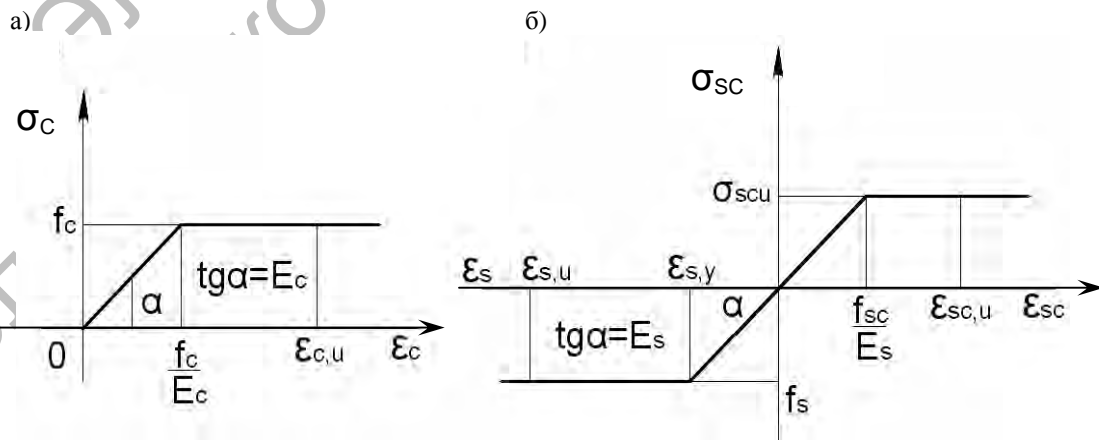


Рис. 2. Диаграммы «σ – ε»: а – для бетона; б – для арматурных сталей, имеющих физический предел текучести

Проверку прочности нормальных сечений (рис. 3) производят из условия:

$$M \leq M_u = 0,5 f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d - 0,33 x \times \right. \\ \left. \times (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d - c^1). \quad (1)$$

Высоту сжатой зоны «х» находят из квадратного уравнения

$$A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0; \quad (2)$$

$$A_1 = 0,5 \cdot (1 - \lambda_{red}^2) \cdot b; \quad (3)$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_s - (1 - \lambda_{red}) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot A_s; \quad (4)$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_s \cdot c; \quad (5)$$

$$\lambda_{red} = 1 - \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c,u} \cdot E_c}; \quad (6)$$

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}}; \quad (7)$$

$$\sigma_{sc} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c)}{(1 - \lambda_{red}) \cdot x}. \quad (8)$$

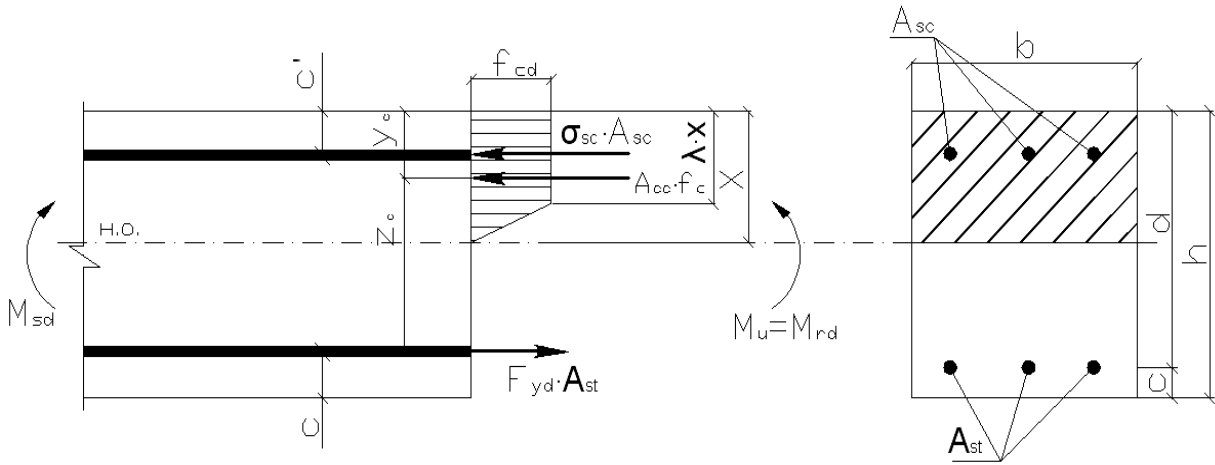


Рис. 3. К расчету прочности нормальных сечений

При этом должно выполняться условие $\sigma_{sc} \leq f_{yd}$, в противном случае проверку прочности производят из условия (1) с учетом замены σ_{sc} на f_{yd} , тогда

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s - f_{sc} \cdot A_s}{0,5 \cdot (1 + \lambda_{red}) \cdot f_c \cdot b}. \quad (9)$$

Во всех случаях должно соблюдаться условие

$$\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + 0,02 \cdot E_s \cdot (1 - \lambda_c)} \leq x \leq \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)}. \quad (10)$$

При проектировании конструкций численные значения параметров f_{cd} , f_{ck} , f_{yd} и E_c для применяемых бетонов определяют по СНБ 5.03.01-02, коэффициент пластичности λ_c [2] вычисляют по формуле

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot f_{cd} \quad (11)$$

В равенстве (11) значение f_{cd} выражено в мегапаскалях.

Расчет прочности пространственных сечений.

При действии на железобетонную плиту дорожного покрытия крутящего и изгибающего моментов разрушение про-

исходит по пространственному сечению, образованному спиральной трещиной и замыкающей ее сжатой зоной, расположенной под углом к горизонтальной оси элемента (рис. 4).

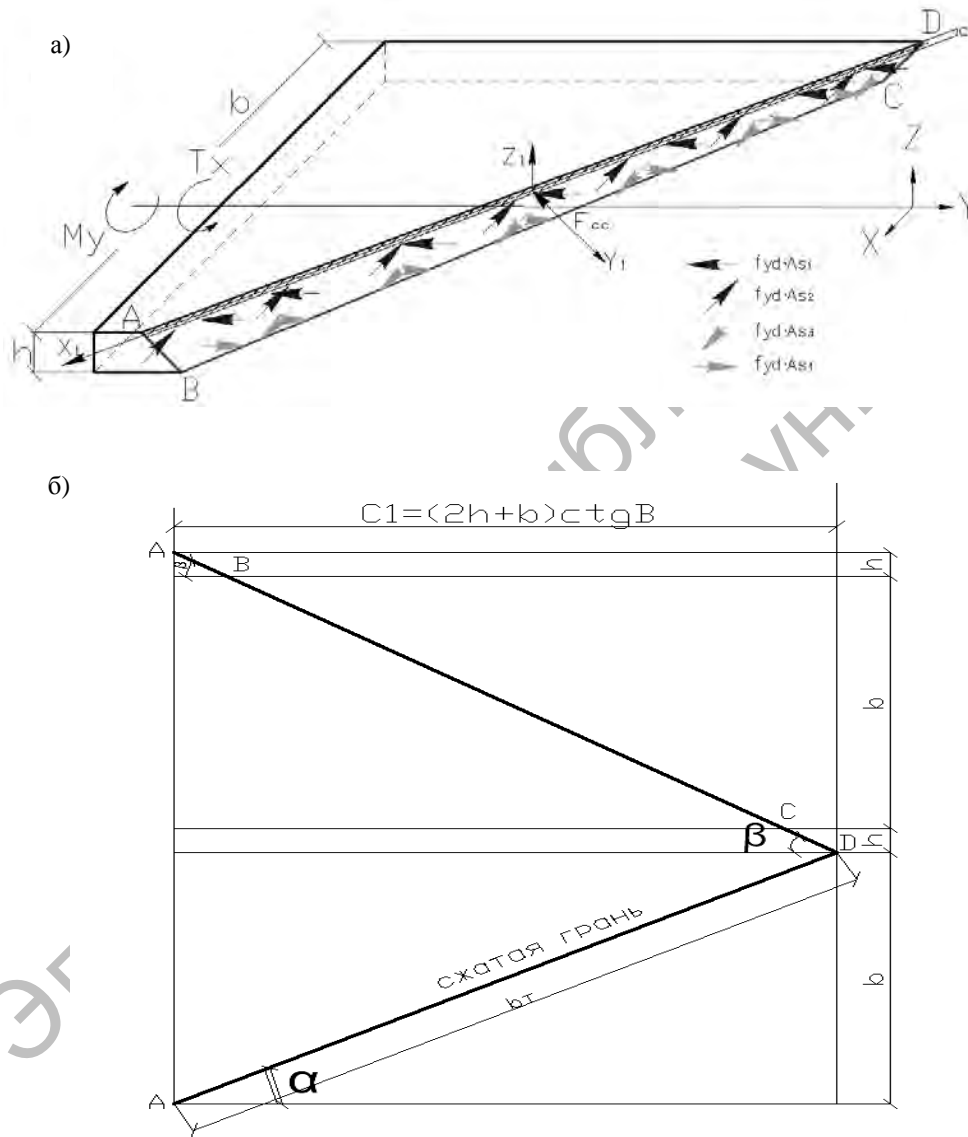


Рис. 4. Расчетная схема пространственного сечения при совместном действии крутящего и изгибающего моментов: а – схема внешних и внутренних усилий; б – развертка граней пространственного сечения

Положение сжатой зоны в пространстве определяется параметром $C1$ – проекцией отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента. По нормали к косому

сечению действуют проекции внешних расчетных моментов $M_y \cdot \sin \alpha$ и $T_x \cdot \cos \alpha$ (см. рис. 4), где

$$\sin \alpha = \frac{b}{b_T}; \quad \cos \alpha = \frac{c_1}{b_T};$$

$$b_T = \sqrt{b^2 + c_1^2}, \quad (12)$$

где c_1 – проекция отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента,

$$c_1 = (2 \cdot h + b) \cdot \operatorname{ctg} \beta.$$

Из условия ограничения деформаций с учетом упругопластических характеристик бетона вычисляем граничную высоту сжатой зоны:

$$\chi_{\text{lim}} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)}. \quad (13)$$

Так как арматурные стержни расположены не в одном уровне, то приведение их к сосредоточенному армированию даст погрешность. Поэтому расчет производим полагая, что $|\sigma_{s1}| \geq f_{yd}$; $|\sigma_{s2}| < f_{yd}$; $|\sigma_{s3}| \geq f_{yd}$, тогда получаем следующие зависимости при кручении с изгибом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{s1} = -f_{yd} \cdot \sin \alpha; \\ \sigma_{s2} = -\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \lambda_{cd}) \cdot x} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{s3} = f_{yd} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{s4} = f_{yd} \cdot \sin \alpha. \end{array} \right. \quad (14)$$

Определяем высоту сжатой зоны «х» из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны.

$$0,5 \cdot (1 + \lambda) \cdot f_{cd} \cdot b_T \cdot x = f_{yd} \cdot A_{s4} \cdot \sin \alpha + f_{yd} \cdot A_{s3} \cdot \cos \alpha - A_{s2} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \lambda) \cdot x} \times \cos \alpha - A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha. \quad (15)$$

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда определяем из выражения

$$Z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)}. \quad (16)$$

Условие прочности в расчетном предельном состоянии выводится из соотношения моментов внешних и внутренних сил относительно оси, проходящей через центр тяжести сжатой зоны. При этом, учитывая упругопластическую работу бетона, эпюру напряжений в сжатой зоне принимаем в виде прямоугольной трапеции. При симметричном армировании плиты:

$$\sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot Z_1 \cdot \sin \alpha + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \times Z_2 \cdot \cos \alpha + \sigma_{s3} \cdot A_{s3} \cdot Z_3 \times \cos \alpha + \sigma_{s4} \cdot A_{s4} \cdot Z_4 \cdot \sin \alpha, \quad (17)$$

где

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s4} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \sin \alpha;$$

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s3} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \cos \alpha. \quad (18)$$

Примеры расчета железобетонных плит для покрытия автомобильных дорог

Расчет железобетонной плиты для покрытия автомобильных дорог марки 1ПП 30.18–30 серии Б.3.503.1–1. Представляет собой элемент покрытия дороги размером в плане 3000×1750 мм толщиной 170 мм. Бетон класса С25/30 плита армирована верхней и нижней сетками (С1) из стали класса S400, в продольном направлении диаметр стержней равен 12 мм, в поперечном – 10 мм. Сетки соединены между собой при помощи двух г-образных плоских каркасов (К1) из стали класса S500. Каркас состоит из двух продольных стержней и пяти хомутов диаметром 5 мм.

Расчет несущей способности дорожной плиты по сечению нормальному к оси «у».

Поперечное сечение дорожной плиты принято по рис. 5. Монолитный бетон класса C25/30; арматура 14Ø12 S400 с $A_s = 1584,333 \text{ мм}^2$. Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$;

$$E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Определяем прочностные и деформативные характеристики бетона:

$$f_{ck} = 25 \text{ МПа}; f_{cd} = 16,667 \text{ МПа};$$

$$f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}; f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа};$$

$$E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа.}$$

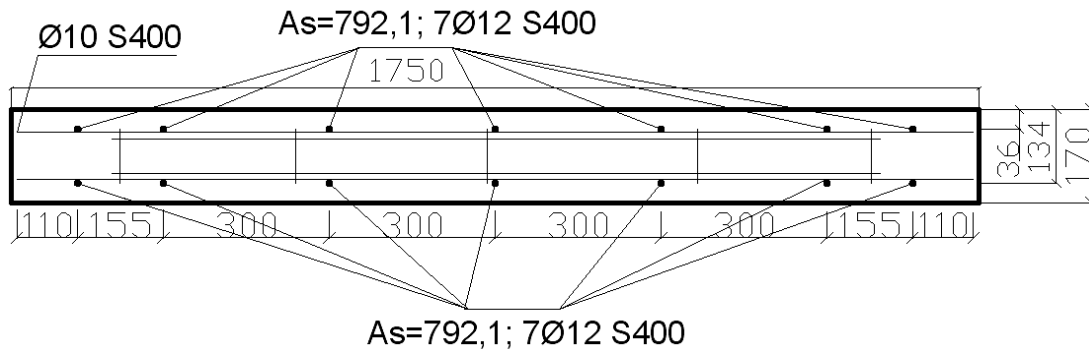


Рис. 5. Поперечное сечение дорожной плиты

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 14450 \cdot 0,1 = 1734 \text{ кН} \cdot \text{см} = 17,34 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5} = \frac{175 \cdot 17^2}{3,5} = 14450 \text{ см}^3$.

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем коэффициент пластичности [1]:

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot f_{cd} = 0,93 - 0,014 \cdot 16,667 = 0,697;$$

$$d = d_2 = 170 - 30 - 6 = 134 \text{ мм} = 13,4 \text{ см.}$$

Отношение

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}} = \frac{20,0 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 10^4} = 8,333.$$

Из условия ограничения деформаций с учетом упругопластических характеристик бетона вычисляем граничную высоту

сжатой зоны:

$$\chi_{lim} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 13,4}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 7,46 \text{ см.}$$

Высоту сжатой зоны определяем из квадратного уравнения:

$$A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0,$$

где неизвестные при x:

$$A_1 = 0,5 \cdot (1 - \lambda_{red}^2) \cdot b = 0,5 \cdot (1 - 0,802^2) \cdot 175 = 31,22;$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_s - (1 - \lambda_{red}) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot A_s = 8,333 \cdot 7,92 - (1 - 0,802) \times \frac{365}{16,667} \cdot 7,92 = 31,655;$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_s \cdot c =$$

$$= -8,333 \cdot 7,92 \cdot 3,6 = -237,59;$$

$$\lambda_{red} = 1 - \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c,u} \cdot E_c} =$$

$$= 1 - \frac{16,667}{0,0035 \cdot 2,4 \cdot 10^4} = 0,802;$$

$$31,22 \cdot x^2 + 31,655 \cdot x - 237,59 = 0;$$

$$x = \frac{-31,655 \pm \sqrt{31,655^2 + 4 \cdot 31,22 \cdot 237,59}}{2 \cdot 31,22} =$$

$$= \frac{-31,655 - 175,135}{62,44} = 3,31 \text{ см.}$$

Проверяем условие:

$$\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + 0,02 \cdot E_s \cdot (1 - \lambda_c)} \leq x \leq \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)},$$

$$\frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 13,4}{8,333 \cdot 16,667 + 0,02 \cdot 20,0 \cdot 10^4 \cdot (1 - 0,697)} \leq x \leq \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 13,4}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)},$$

$$1,378 \text{ см} \leq 3,31 \text{ см} \leq 7,46 \text{ см.}$$

Напряжения в арматурных рядах по высоте сечения вычисляем по формуле

$$\sigma_{si} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x};$$

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (3,6 - 3,31)}{(1 - 0,697) \cdot 3,31} =$$

$$= 40,159 \text{ МПа.}$$

Несущая способность сечения составляет:

$$M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot [(1 + \lambda_c) \times$$

$$\times d_2 - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2)] +$$

$$+ \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d_2 - c^1);$$

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 175 \cdot 3,31 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \times$$

$$\times 13,4 - 0,33 \cdot 3,31 \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] -$$

$$- 40,159 \cdot 10^2 \cdot 7,92 \cdot (13,4 - 3,6) =$$

$$= 9514412 \text{ Н} \cdot \text{см} = 9514,41 \text{ кН} \cdot \text{см} =$$

$$= 95,14 \text{ кН} \cdot \text{м} = 9,51 \text{ тс} \cdot \text{м.}$$

Расчет несущей способности дорожной плиты по сечению нормальному к оси «х».

Поперечное сечение дорожной плиты принято по рис. 6. Монолитный бетон класса С25/30; арматура 22Ø10 S400 с $A_s = 1727 \text{ мм}^2$. Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Определяем прочностные и деформативные характеристики бетона:

$$f_{ck} = 25 \text{ МПа}; f_{cd} = 16,667 \text{ МПа};$$

$$f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}; f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа};$$

$$E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа.}$$

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 24771,429 \cdot 0,1 =$$

$$= 2972,571 \text{ кН} \cdot \text{см} = 29,73 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где

$$W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5} = \frac{300 \cdot 17^2}{3,5} = 24771,429 \text{ см}^3.$$

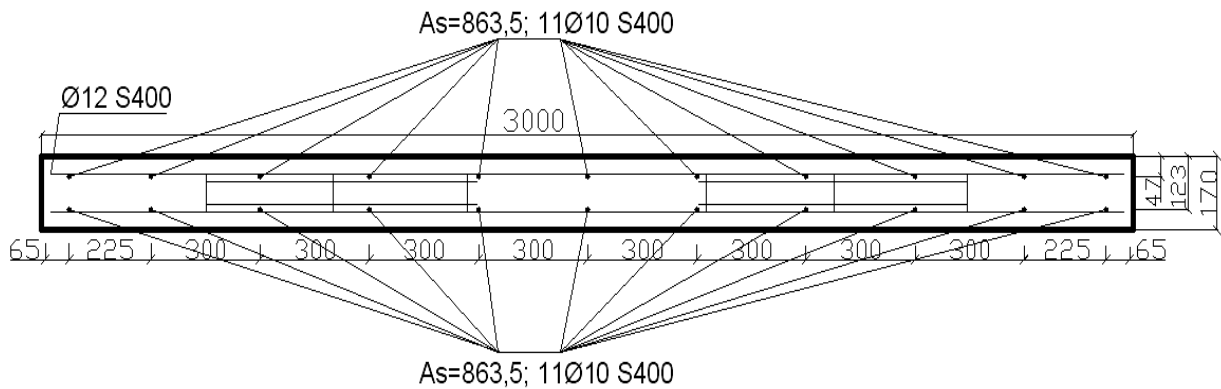


Рис. 6. Продольное сечение дорожной плиты

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем:

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot f_{cd} = 0,93 - 0,014 \cdot 16,667 = 0,697;$$

$$d = d_2 = 170 - 30 - 12 - 5 = 123 \text{ мм} = 12,3 \text{ см.}$$

Отношение

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}} = \frac{20,0 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 10^4} = 8,333.$$

Из условия ограничения деформаций с учетом упругопластических характеристик бетона вычисляем граничную высоту сжатой зоны:

$$\chi_{lim} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 12,3}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 6,85 \text{ см.}$$

Высоту сжатой зоны определяем из квадратного уравнения:

$$A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0,$$

где неизвестные при x :

$$A_1 = 0,5 \cdot (1 - \lambda_{red}^2) \cdot b = 0,5 \cdot (1 - 0,802^2) \cdot 300 = 53,519;$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_s - (1 - \lambda_{red}) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot A_s = 8,333 \cdot 8,635 - (1 - 0,802) \times \frac{365}{16,667} \cdot 8,635 = 34,513;$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_s \cdot c = -8,333 \times 8,635 \cdot 4,7 = -338,191;$$

$$\lambda_{red} = 1 - \frac{f_{cd}}{\epsilon_{c,u} \cdot E_c} = 1 - \frac{16,667}{0,0035 \cdot 2,4 \cdot 10^4} = 0,802;$$

$$53,519 \cdot x^2 + 34,513 \cdot x - 338,191 = 0;$$

$$x = \frac{-34,513 \pm \sqrt{34,513^2 + 4 \cdot 53,519 \cdot 338,191}}{2 \cdot 53,519} = \frac{-34,513 - 271,274}{107,038} = 2,86 \text{ см.}$$

Проверяем условие:

$$\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + 0,02 \cdot E_s \cdot (1 - \lambda_c)} \leq x \leq \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)},$$

$$\frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 12,3}{8,333 \cdot 16,667 + 0,02 \cdot 20,0 \cdot 10^4 \cdot (1 - 0,697)} \leq x \leq \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 12,3}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)},$$

$$1,26 \text{ см} \leq 2,86 \text{ см} \leq 6,86 \text{ см}.$$

Напряжения в арматурных рядах по высоте сечения вычисляем по формуле

$$\sigma_{si} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x};$$

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (4,7 - 2,86)}{(1 - 0,697) \cdot 2,86} = 294,895 \text{ МПа}.$$

Несущая способность сечения составляет:

$$M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d_2 - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \times A_{sc} \cdot (d_2 - c^1);$$

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 300 \cdot 2,86 \cdot 10^2 \cdot \left[(1 + 0,697) \times 12,3 - 0,33 \cdot 2,86 \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2) \right] - 294,895 \cdot 10^2 \cdot 8,635 \cdot (12,3 - 4,7) = 11516260 \cdot \text{Н} \cdot \text{см} = 115,16 \text{ кН} \cdot \text{м} = 11,52 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Расчет несущей способности дорожной плиты при совместном действии крутящего и изгибающего моментов.

Расчетная схема дорожной плиты принята по рис. 4. Монолитный бетон класса С25/30; арматура в продольном направлении 7Ø12 S400 с $A_{s1} = 792,167 \text{ мм}^2$ и 7Ø12 S400 с $A_{s4} = 792,167 \text{ мм}^2$, в поперечном направлении 6Ø10 S400 с $A_{s3} = 471 \text{ мм}^2$ и 7Ø10 S400 с $A_{s2} = 549,5 \text{ мм}^2$. Для рабочей

арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, где A_{s1} – площадь верхней арматуры в продольном направлении; A_{s2} – площадь верхней арматуры в поперечном направлении; A_{s3} – площадь нижней арматуры в поперечном направлении; A_{s4} – площадь нижней арматуры в продольном направлении.

Определяем прочностные и деформативные характеристики бетона:

$$f_{ek} = 25 \text{ МПа}; \quad f_{cd} = 16,667 \text{ МПа};$$

$$f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}; \quad f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа};$$

$$E_{ct}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}; \quad E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 14450 \cdot 0,1 = 1734 \text{ кН} \cdot \text{см} = 17,34 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$\text{где } W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5} = \frac{175 \cdot 17^2}{3,5} = 14450 \text{ см}^3.$$

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем:

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot f_{cd} = 0,93 - 0,014 \cdot 16,667 = 0,697;$$

$$d = d_2 = 170 - 30 - 6 = 134 \text{ мм} = 13,4 \text{ см}.$$

Отношение

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}} = \frac{20,0 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 10^4} = 8,333.$$

Из условия ограничения деформаций с учетом упругопластических характеристик бетона вычисляем граничную высоту сжатой зоны:

$$\begin{aligned} \chi_{lim} &= \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} = \\ &= \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 13,4 \cdot 0,642}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = \\ &= 4,79 \text{ см.} \end{aligned}$$

По формуле вычисляем ширину сжатой зоны от действия М и Т:

$$\begin{aligned} b_T &= \sqrt{b^2 + c_1^2} = \sqrt{175^2 + 209^2} = \\ &= 272,59 \text{ см.} \end{aligned}$$

где b ширина поперечного сечения дорожной плиты; c_1 – проекция отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента,

$$\begin{aligned} c_1 &= (2 \cdot h + b) \cdot \operatorname{ctg} \beta = \\ &= (2 \cdot 17 + 175) \cdot \operatorname{ctg} 45 = 209 \text{ см.} \end{aligned}$$

$$\cos \alpha = \frac{c_1}{b_T} = \frac{209}{272,59} = 0,767 ;$$

$$\sin \alpha = \frac{b}{b_T} = \frac{175}{272,59} = 0,642 .$$

Определяем высоту сжатой зоны «х» из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны: $x = 2,01$ см.

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда определяем из выражения

$$Z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)},$$

где

$$\begin{aligned} \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)} &= \frac{2,01 \cdot (0,697^2 + 0,697 + 1)}{3 \cdot (0,697 + 1)} = \\ &= 0,862 \text{ см.} \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} Z_1 &= 3,6 - 0,862 = 2,738 \text{ см;} \\ Z_2 &= 4,7 - 0,862 = 3,838 \text{ см;} \\ Z_3 &= 12,3 - 0,862 = 11,438 \text{ см;} \\ Z_4 &= 13,4 - 0,862 = 12,538 \text{ см.} \end{aligned}$$

Несущая способность составляет

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot Z_1 \cdot \sin \alpha + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot Z_2 \cdot \cos \alpha + \\ + \sigma_{s3} \cdot A_{s3} \cdot Z_3 \cdot \cos \alpha + \sigma_{s4} \cdot A_{s4} \cdot Z_4 \cdot \sin \alpha, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} &= 232,784 \text{ МПа;} \quad \sigma_{s2} = 470,509 \text{ МПа;} \\ \sigma_{s3} &= 1799,827 \text{ МПа;} \quad \sigma_{s4} = 1667,55 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Несущая способность дорожной плиты при восприятии крутящего и изгибающего моментов:

$$\begin{aligned} &232,784 \cdot 7,92 \cdot 2,738 \cdot 0,642 \cdot 10^2 + 365 \cdot 5,495 \times \\ &\times 3,838 \cdot 0,767 \cdot 10^2 + 365 \cdot 4,71 \cdot 11,438 \cdot 0,767 \times \\ &\times 10^2 + 365 \cdot 7,92 \cdot 12,538 \cdot 0,642 \cdot 10^2 = \\ &= 4749616 \text{ Н} \cdot \text{см} = 47,5 \text{ кН} \cdot \text{м} = 4,75 \text{ тс} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Аналогично рассчитываем железобетонную плиту для временного покрытия автомобильных дорог марки 2ПП30.18–30 серии Б.3.503.1–1. Плита представляет собой элемент покрытия дороги размером в плане 3000×1750 мм, толщиной 170 мм. Бетон класса С20/25 плита армирована верхней и нижней сетками (С2) из стали класса S400, в продольном направлении диаметр стержней равен 10 мм, в поперечном – 8 мм. Сетки соединены между собой при помощи двух г-образных плоских каркасов (К1) из стали класса S500. Каркас состоит из двух продольных стержней и пяти хомутов диаметром 5 мм.

В результате расчета получаем: несущая способность сечения: по оси $y - M_u = 6,94$ тс·м; по оси $x - M_u = 8,12$ тс·м; при восприятии крутящего и изгибающего моментов – 3,31 тс·м.

Заключение

В соответствии с ГОСТ 8829–94 несущая способность плиты 1П.С.30.18–30 по прочности нормальных сечений при испытании равна 11,0 тс, по расчету 27,18 тс. Запас прочности равен 2,47. Изгибающий момент согласно схеме равен 3,85 тс·м. При совместном воздействии крутящего и изгибающего моментов несущая способность плиты составляет 4,75 тс·м. Коэффициент запаса прочности S равен 1,23.

В результате расчета было выявлено, что запас прочности меньше, чем 1,4. Следовательно, для того, чтобы не произошло разрушение плит и они успешно экс-

плуатировались, требуется увеличение армирования плит.

При эксплуатации дорог избежать совместного воздействия крутящего и изгибающего моментов невозможно, т. к. передача нагрузки на плиту от колес автомобиля всегда будет вне оси симметрии конструкции; также не исключена вероятность образования выбоин, воронок и других дефектов под основанием плиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенюк, С. Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании : монография / С. Д. Семенюк. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
2. СНБ 5.03.01–02 Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 139 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 27.02.2008

S. D. Semenuk, N. V. Bely
Calculation of sections of ferro-concrete plates
of series B.3.503.1–1 for coverings of highways

The definition of bearing ability of 1P.C.30.18–30 and 2P.C.30.18–30 road plates on durability of normal sections in a short and long direction and bearing ability is considered at joint influence of bending moment and torque. The offered calculation procedure of ferro-concrete plates of highway coverings on durability of normal sections and on joint influence of bending moment and torque has been executed on the basis of the carried experimental and theoretical researches.