

ISSN 2077-8481

ВЕСТНИК

№ 2, 2010



БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА



УДК 691.32:620.173

Р.З. Шутов

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ШЕСТИУГОЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ДОРОЖНОЙ ПЛИТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА РУПП БЕЛАЗ ПО НОРМАЛЬНЫМ СЕЧЕНИЯМ

В статье определяется несущая способность шестиугольной железобетонной дорожной плиты торцевого участка испытательного полигона РУПП БелАЗ. Расчет ведется по сечениям нормальным к продольной и поперечной осям плиты. Предлагаемая методика расчета была выполнена на основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований с учетом билинейной эпюры напряжений в бетоне.

Введение

На испытательном полигоне РУПП БелАЗ был запроектирован и выполнен тормозной участок из трех четырехугольных и одной шестиугольной железобетонных дорожных плит, выполненных монолитным способом. Шестиугольная плита представляет собой

шестиугольник длиной 27,4 м; прямоугольная часть плиты имеет размеры 20,0×2,4 м, исходящая из нее трапециевидная часть плиты шириной 20,0 м и длиной 25,0 м с равнобокими скосами оканчивается стороной 12,0 м толщиной 450 мм (рис. 1).

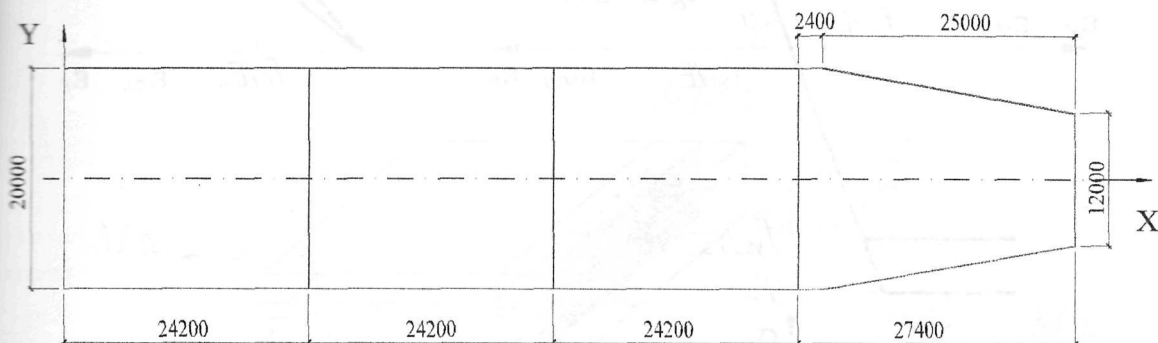


Рис. 1. План тормозного участка испытательного полигона РУПП БелАЗ

После возведения конструкции возникла необходимость проверки несущей способности плиты с учетом фактических (экспериментальных) прочностных характеристик бетона и арматуры, изменений нормативной документации, а также с учетом использования билинейной эпюры напряжений материалов.

Теория расчета несущей способности нормальных сечений плиты

При расчете прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, вводятся прочностные и деформативные характеристики бетона, зависящие от предельной сжимаемости, напряженно-деформированного состояния, геометрии и компоновки сечения.

Определение предельных усилий в нормальных сечениях основывается на следующих допущениях [2]:

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

– для средних деформаций бетона и арматуры считать справедливым линейный закон распределения по всей высоте сечений;

– в качестве расчетного сечения принято сечение со средней высотой сжатой зоны x , соответствующей средним деформациям;

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

Прочность нормальных сечений находится в зависимости от степени использования сопротивления сжатого бетона и растянутой арматуры. При расчете прямоугольного сечения железобетонной плиты дорожного покрытия, армированного стальными стержнями (арматура классов S400, S240), имеющими физический предел текучести, считается, что сопротивления арматуры и бетона используются полностью (см. рис. 2).

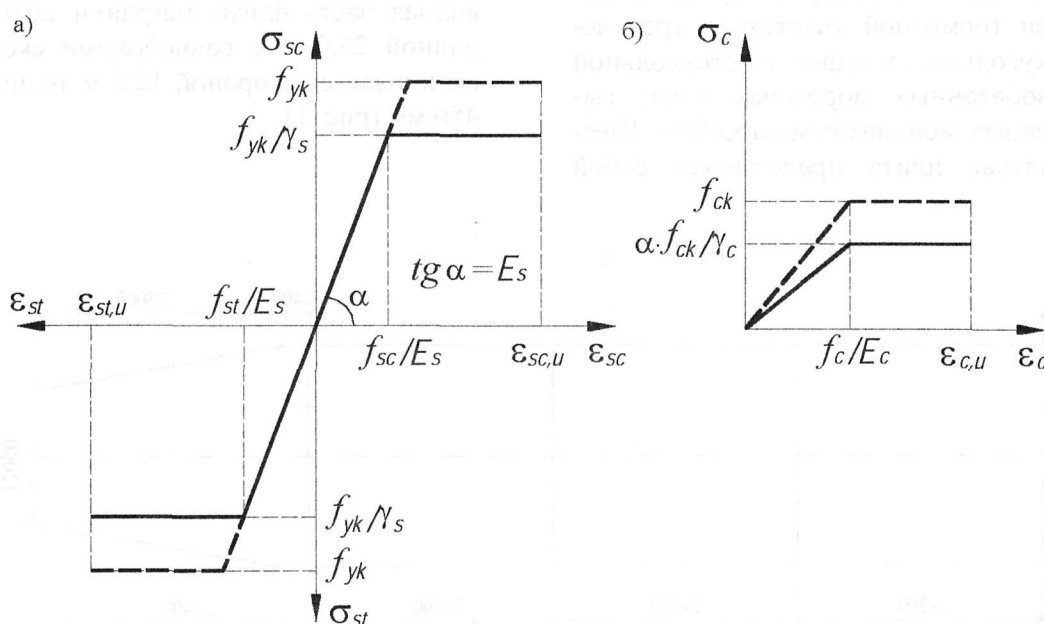


Рис. 2. Диаграммы « $\sigma - \epsilon$ »: а – для арматурной стали с физическим пределом текучести; б – для бетона

Проверка прочности нормальных сечений с расположением сжатой зоны в верхней части сечения (рис. 3) производится по условию [2]

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot S_c + \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1} \cdot (d_1 - c'_1), \quad (1)$$

где S_c – статический момент (определяется по рис. 3 и 4).

Статический момент инерции

эпюры напряжений сжатого бетона определяется как

$$S_c = A_{cc} \cdot x_c, \quad (2)$$

где A_{cc} – площадь билинейной эпюры напряжений сжатого бетона; x_c – высота центра тяжести площади билинейной эпюры напряжений сжатого бетона.

Площадь билинейной эпюры напряжений

$$\begin{aligned}
 A_{cc} &= A_{cc1} + A_{cc2} = \\
 &= x \cdot \lambda_c \cdot b + \frac{x - \lambda_c \cdot x}{2} \cdot b = \\
 &= 0,5 \cdot x \cdot b \cdot (1 + \lambda_c), \quad (3)
 \end{aligned}$$

где A_{cc1} , A_{cc2} – площади, составляющие площадь билинейной эпюры напряжений сжатого бетона; λ_c – коэффициент пластичности бетона; b – ширина сечения.

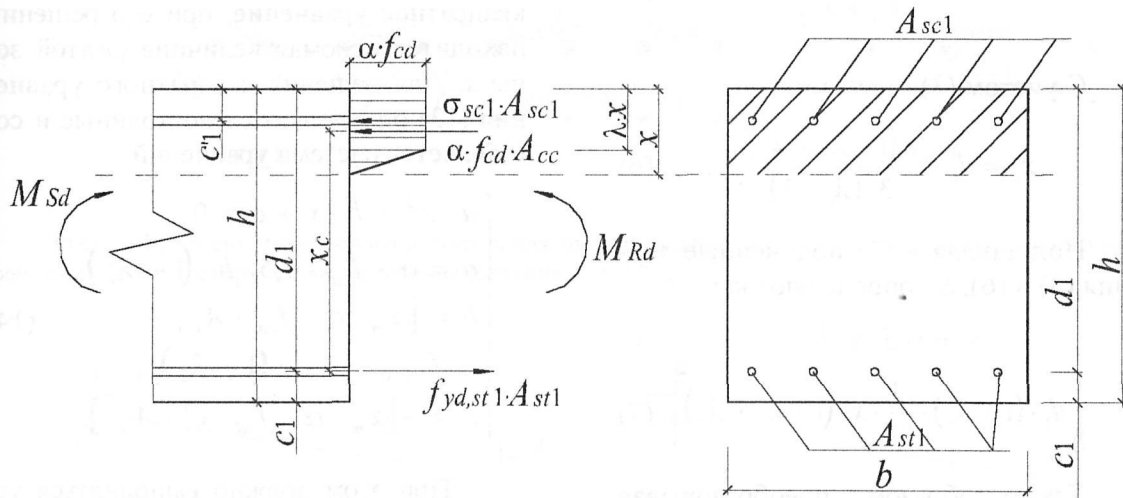


Рис. 3. К расчету прочности нормальных сечений

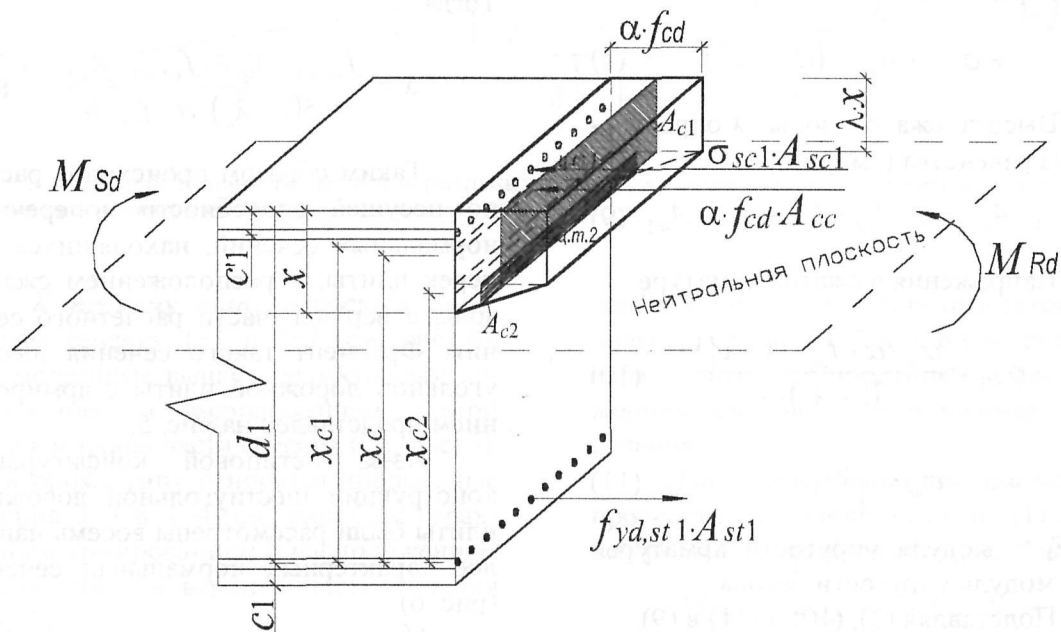


Рис. 4. К расчету статического момента при билинейной эпюре напряжений

Коэффициент пластичности бетона [2]

$$\lambda_c = 0,97 - 0,0077 f_{cd}, \quad (4)$$

где значение f_{cd} выражено в мегапаскалях.

Высота центра тяжести сечения

$$x_c = \frac{A_{c1} \cdot x_{c1} + A_{c2} \cdot x_{c2}}{x_{c1} + x_{c2}}. \quad (5)$$

С учетом (3) получается

$$x_c = d_1 - \frac{x(1 + \lambda_c + \lambda_c^2)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)}. \quad (6)$$

Подставляя в (2) полученные значения (3) и (6), S_c определяют как

$$S_c = 0,5 \cdot x \cdot b \times \left[d_1 \cdot (1 + \lambda_c) - \frac{1}{3} \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right]. \quad (7)$$

Таким образом, преобразовывая (1) с учетом (7),

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b \times \left[d_1 \cdot (1 + \lambda_c) - \frac{1}{3} \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1} \cdot (d_1 - c_1). \quad (8)$$

Высота сжатой зоны x определяется из равенства (см. рис. 3)

$$f_{yd,st1} \cdot A_{st1} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{cc} + \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1}. \quad (9)$$

Напряжения в сжатой арматуре

$$\sigma_{sc1} = \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c_1)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}. \quad (10)$$

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cm}}, \quad (11)$$

где E_s – модуль упругости арматуры; E_{cm} – модуль упругости бетона.

Подставляя (3), (10) и (11) в (9),

$$f_{yd,st1} \cdot A_{st1} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b \times \left(1 + \lambda_c \right) + \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c_1)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot A_{sc1}, \quad (12)$$

преобразовав равенство (12),

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b \cdot (1 - \lambda_c^2) \cdot x^2 + \left[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{sc1} - f_{yd,st1} \cdot A_{st1} \cdot (1 - \lambda_c) \right] \times x - \left[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c_1' \cdot A_{sc1} \right] = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) представляет собой квадратное уравнение, при его решении находится искомая величина сжатой зоны x . Для решения квадратного уравнения (13) определяются постоянные и составляется система уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0; \\ a = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b \cdot (1 - \lambda_c^2); \\ b = \left[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{sc1} - f_{yd,st1} \cdot A_{st1} \cdot (1 - \lambda_c) \right]; \\ c = - \left[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c_1' \cdot A_{sc1} \right]. \end{cases} \quad (14)$$

При этом должно выполняться условие $\sigma_{sc1} \leq f_{yd,sc1}$, в противном случае проверка прочности производится из условия (1) с учетом замены σ_{sc1} на $f_{yd,sc1}$. Тогда

$$x = \frac{f_{yd,st1} \cdot A_{st1} - f_{yd,sc1} \cdot A_{sc1}}{0,5(1 + \lambda_c) \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot b}. \quad (15)$$

Таким образом происходит расчет по несущей способности поперечных нормальных сечений, находящихся поперек плиты, с расположением сжатой зоны в верхней части расчетного сечения. Фрагмент такого сечения шестиугольной дорожной плиты с армированием представлен на рис. 5.

Из-за нетиповой конфигурации конструкции шестиугольной дорожной плиты были рассмотрены восемь наиболее характерных нормальных сечений (рис. 6).

Учитывая реальное армирование и расположение сжатой зоны, выделяют четыре типа нормальных сечений, подлежащих рассмотрению.

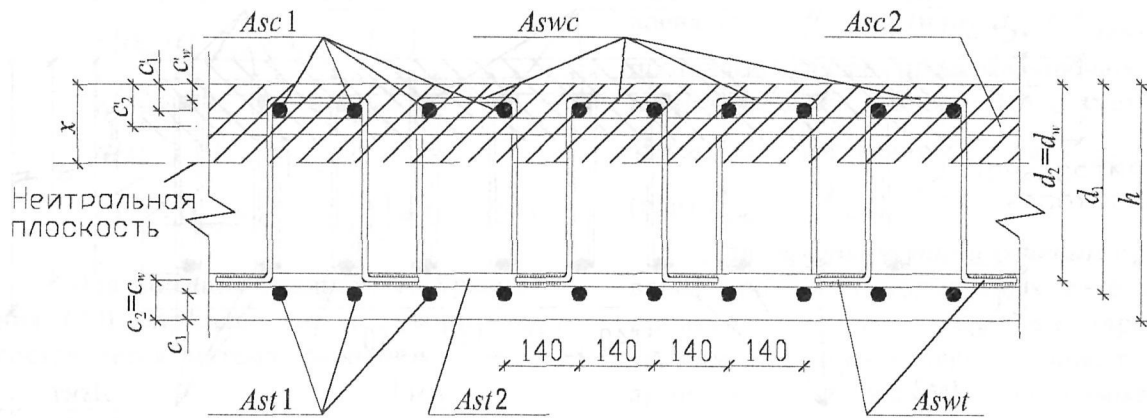


Рис. 5. Фрагмент поперечного армирования шестиугольной железобетонной плиты с расположением сжатой зоны в верхней части сечения (сечения 1-1 и 2-2)

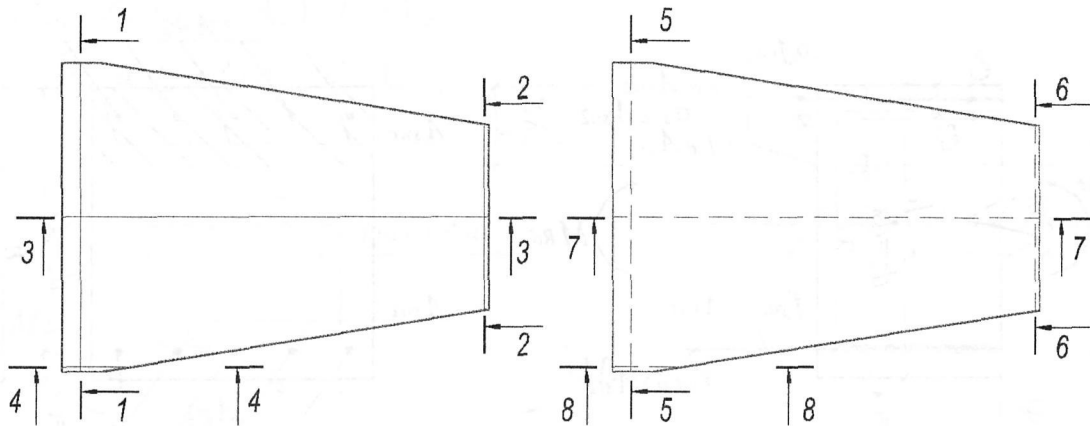


Рис. 6. Расположение расчетных нормальных сечений: а – сжатая зона находится в верхней части; б – сжатая зона находится в нижней части

К *первому типу* относятся поперечные сечения 1-1 и 2-2 (см. рис. 6), рассмотренные выше, с характерным армированием и расположением сжатой зоны в верхней части сечения (см. рис. 5). Ко *второму типу* относятся продольные сечения 3-3 и 4-4 (см. рис. 6) с характерным армированием и расположением сжатой зоны в верхней части сечения (рис. 7).

К *третьему типу* относятся поперечные сечения 5-5 и 6-6 (см. рис. 6) с характерным армированием и расположением сжатой зоны в нижней части сечения.

К *четвертому типу* относятся продольные сечения 7-7 и 8-8 (см. рис. 6) с характерным армированием и расположением сжатой зоны в нижней части сечения.

Для *второго типа сечений* условие прочности аналогично условию (1) с учетом реального армирования (рис. 7 и 8):

$$M_{sd} \leq M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot S_c + \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} \cdot (d_2 - c'_2) + \sigma_{swc} \cdot A_{swc} \cdot (d_w - c'_w). \quad (16)$$

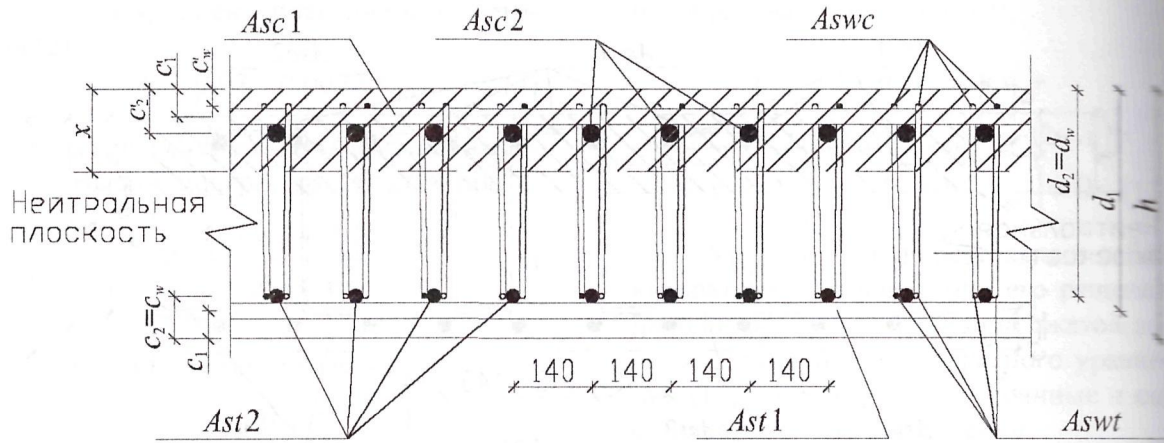


Рис. 7. Фрагмент продольного армирования шестиугольной железобетонной плиты с расположением сжатой зоны в верхней части сечения (сечения 3-3 и 4-4)

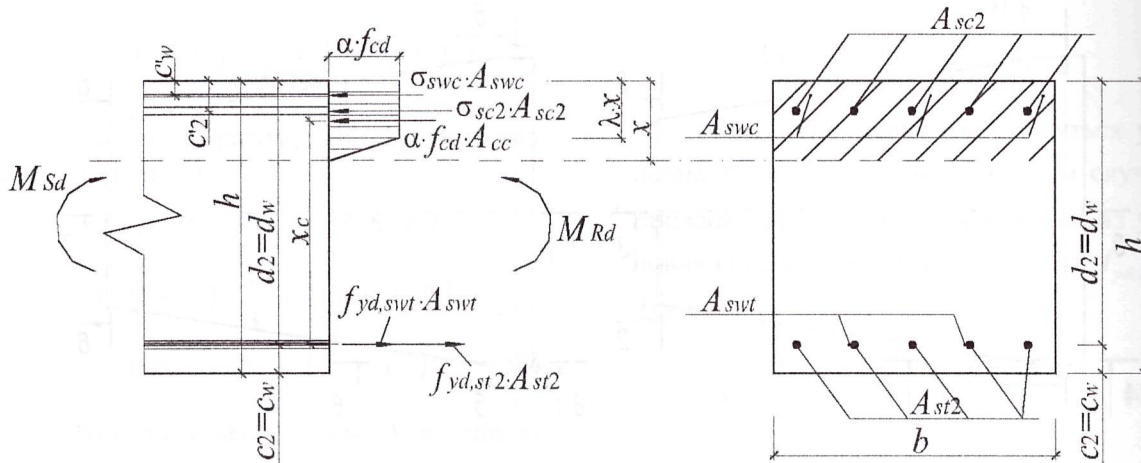


Рис. 8. К расчету прочности нормальных сечений второго типа

После преобразований аналогично (8)

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b \times \left[d_{2(w)} \cdot (1 + \lambda_c) - \frac{1}{3} \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} \cdot (d_2 - c'_2) + \sigma_{swc} \cdot A_{swc} \cdot (d_w - c'_w). \quad (17)$$

Высота сжатой зоны x определяется из равенства (см. рис. 8)

$$f_{yd, st2} \cdot A_{st2} + f_{yd, swt} \cdot A_{swt} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{cc} + \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} + \sigma_{swc} \cdot A_{swc}. \quad (18)$$

Напряжения в сжатой арматуре определяются как

$$\begin{cases} \sigma_{sc2} = \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_2)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}, \\ \sigma_{swc} = \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_w)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}. \end{cases} \quad (19)$$

Преобразовывая (18) с учетом (19) и упрощая, получают квадратное уравнение:

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b \cdot (1 - \lambda_c^2) \cdot x^2 + [\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (A_{sc2} + A_{swc}) - (f_{yd,st2} \cdot A_{st2} + f_{yd,swt} \cdot A_{swt}) \times (1 - \lambda_c)] \cdot x - [\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \times (c'_2 \cdot A_{sc2} + c'_w \cdot A_{swc})] = 0. \quad (20)$$

Для решения квадратного уравнения (20) определяются постоянные и составляется система уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0; \\ a = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b \cdot (1 - \lambda_c^2); \\ b = [\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (A_{sc2} + A_{swc}) - (f_{yd,st2} \cdot A_{st2} + f_{yd,swt} \cdot A_{swt}) \cdot (1 - \lambda_c)]; \\ c = -[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (c'_2 \cdot A_{sc2} + c'_w \cdot A_{swc})]. \end{cases} \quad (21)$$

При этом должны выполняться условия $\sigma_{sc2} \leq f_{yd,sc2}$ и (или) $\sigma_{swc} \leq f_{yd,swc}$, в противном случае проверка прочности производится из условия (16) с учетом замены соответственно σ_{sc2} на $f_{yd,sc2}$ и (или) σ_{swc} на $f_{yd,swc}$.

Для третьего типа сечений проверка прочности нормальных сечений происходит точно по условиям, характерным для сечений первого типа, т. к. армирование данных сечений симметрично (рис. 9).

Для четвертого типа сечений условие прочности с учетом реального армирования (рис. 10) аналогично (16).

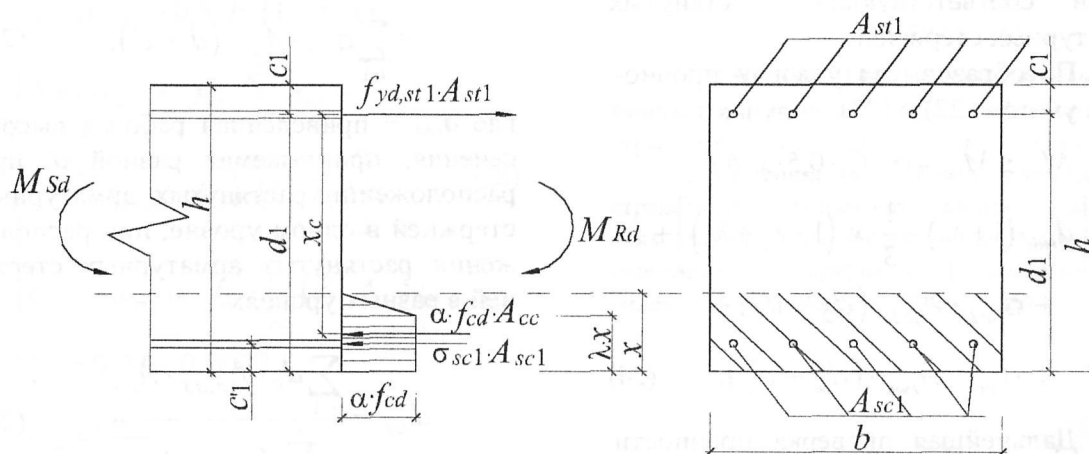


Рис. 9. К расчету прочности нормальных сечений третьего типа

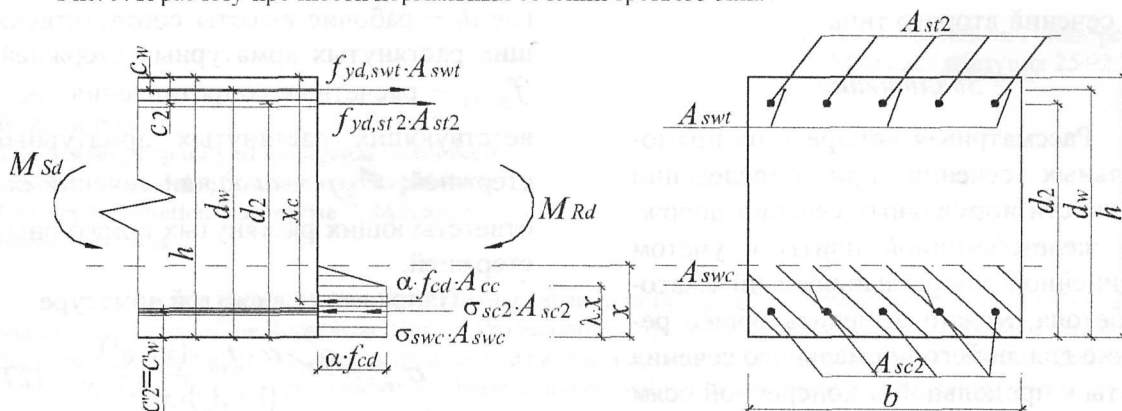


Рис. 10. К расчету прочности нормальных сечений четвертого типа

Высота центра тяжести сечения определяется по формуле, аналогичной (5) и (6):

$$x_c = d_{red} - \frac{x(1 + \lambda_c + \lambda_c^2)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)}, \quad (22)$$

где d_{red} – приведенная рабочая высота сечения.

Приведенная рабочая высота сечения d_{red} определяется следующим образом:

$$d_{red} = \frac{d_2 \cdot f_{yd,st2} \cdot A_{st2} + d_w \cdot f_{yd,swt} \cdot A_{swt}}{f_{yd,st2} \cdot A_{st2} + f_{yd,swt} \cdot A_{swt}}, \quad (23)$$

где d_2, d_w – рабочие высоты соответствующих растянутых арматурных стержней; $f_{yd,st2}, f_{yd,swt}$ – расчетные сопротивления соответствующих растянутых арматурных стержней; A_{st2}, A_{swt} – площади сечений соответствующих растянутых арматурных стержней.

Преобразовывая условие прочности с учетом (22) и (23), получают

$$\begin{aligned} M_{Sd} \leq M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b \times \\ \times \left[d_{red} \cdot (1 + \lambda_c) - \frac{1}{3} \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \\ + \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} \cdot (d_2 - c'_2) + \\ + \sigma_{swc} \cdot A_{swc} \cdot (d_w - c'_w). \quad (24) \end{aligned}$$

Дальнейшая проверка прочности нормальных сечений четвертого типа происходит по условиям, характерным для сечений второго типа.

Заключение

Рассматривая четыре типа прямоугольных сечений при определении прочности нормальных сечений дорожной железобетонной плиты с учетом билинейной эпюры напряжений сжатого бетона, можно выделить общее решение для любого нормального сечения плиты к продольной и поперечной осям конструкции, включая двухуровневое

размещение арматурных стержней (сеток) при допуске – размещение сжатой арматуры в сжатой зоне, т. е. $c'_i < x$ и $\sigma_{sc,i} \leq f_{yd,sc,i}$ (напряжения меньше расчетного сопротивления), а также размещение растянутой арматуры в растянутой зоне, т. е. $d_i > x$ и $\sigma_{st,i} = f_{yd,st,i}$ (напряжения равны расчетному сопротивлению (полное использование арматуры растянутой зоны)). Учтена возможность размещения сжатых и растянутых стержней в нескольких уровнях.

Проверка прочности нормальных сечений с расположением сжатой зоны в верхней части сечения (рис. 11) производится по условию

$$\begin{aligned} M_{Sd} \leq M_{Rd} = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot x \cdot b \times \\ \times \left[d_{red} \cdot (1 + \lambda_c) - \frac{1}{3} \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \\ + \sum_{i=1}^n \sigma_{sc,i} \cdot A_{sc,i} \cdot (d_i - c'_i), \quad (25) \end{aligned}$$

где d_{red} – приведенная рабочая высота сечения, принимаемая равной d_i при расположении растянутых арматурных стержней в одном уровне; при расположении растянутых арматурных стержней в разных уровнях

$$d_{red} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot f_{yd,st,i} \cdot A_{st,i}}{\sum_{i=1}^n f_{yd,st,i} \cdot A_{st,i}}, \quad (26)$$

где d_i – рабочие высоты соответствующих растянутых арматурных стержней; $f_{yd,st,i}$ – расчетные сопротивления соответствующих растянутых арматурных стержней; $A_{st,i}$ – площади сечений соответствующих растянутых арматурных стержней.

Напряжения в сжатой арматуре

$$\sigma_{sc,i} = \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_i)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}, \quad (27)$$

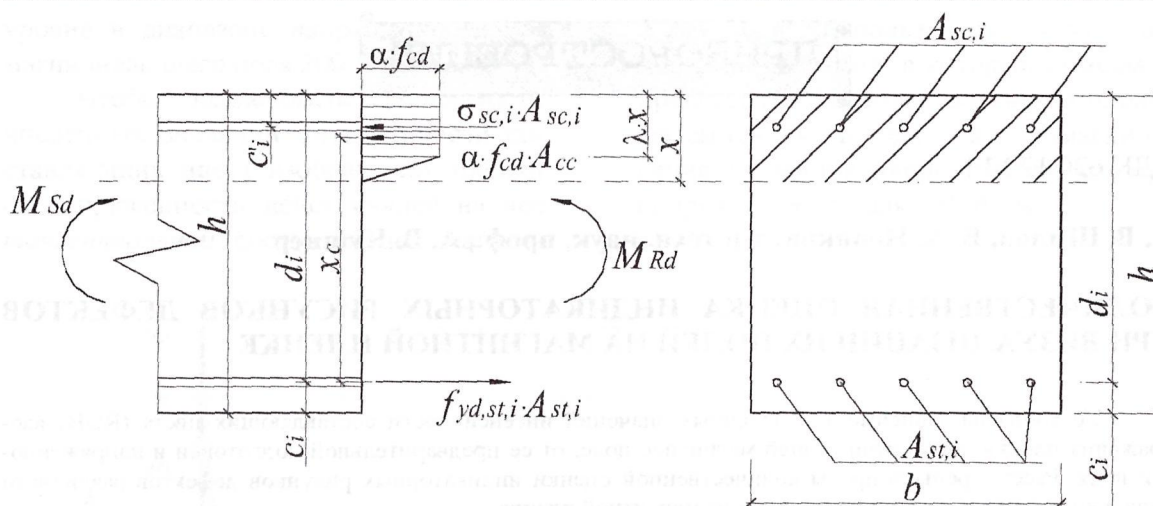


Рис. 11. К расчету прочности любых нормальных сечений плитных конструкций

Высота сжатой зоны x определяется решением системы уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0; \\ a = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b \cdot (1 - \lambda_c^2); \\ b = \left[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot \sum_{i=1}^n A_{sci} - \right. \\ \left. - \sum_{i=1}^n (f_{yd,sti} \cdot A_{sti}) \cdot (1 - \lambda_c) \right]; \\ c = - \left[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot \sum_{i=1}^n (c'_i \cdot A_{sci}) \right]; \\ \lambda_c = 0,97 - 0,0077 f_{cd}; \\ \alpha_m = \frac{E_s}{E_{cm}}. \end{cases} \quad (28)$$

При расположении сжатой зоны в нижней части сечения расчет сечения производится по этим же уравнениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 139 с.
2. 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.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 25.02.2010

R. Z. Shutau The bearing capacity of hexagonal reinforced concrete road slab of testing area Republican Unitary Production Enterprise BelAZ over normal sections

In this article determination of the bearing capacity of hexagonal reinforced concrete road slab of brake site of testing area of the Republican Unitary Production Enterprise BelAZ over normal sections is considered in the article. The calculation is over normal sections along long axis and transverse axis of the slab. The offered design procedure has been executed on the basis of the carried out experimental and theoretical researches with taking into account bilinear voltage waveform in concrete.