

ISSN 2077-8481

ВЕСТНИК

№ 3, 2010



БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА



УДК 691.32:620.173

С. Д. Семенюк, д-р техн. наук, Р. З. Шутов

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ШЕСТИУГОЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ДОРОЖНОЙ ПЛИТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА РУПП БЕЛАЗ ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ СЕЧЕНИЯМ, ОБРАЗОВАННЫМ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ КРУТЯЩЕГО И ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТОВ

В данной статье рассматривается определение несущей способности шестиугольной железобетонной дорожной плиты тормозного участка испытательного полигона РУПП БелАЗ. Расчет ведется по пространственным сечениям, образованным при совместном действии крутящего и изгибающего моментов. Предлагаемая методика расчета была выполнена на основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований с учетом билинейной эпюры напряжений в бетоне.

Введение

Разработанная железобетонная плита предназначена для испытательного полигона тормозного участка РУПП БелАЗ при проведении испытаний самосвалов грузоподъемностью 500 т. Шестиугольная плита (рис. 1) имеет длину 27,4 м, ширину по длинной стороне 20 м и ширину по короткой 12 м,

толщину 450 мм.

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

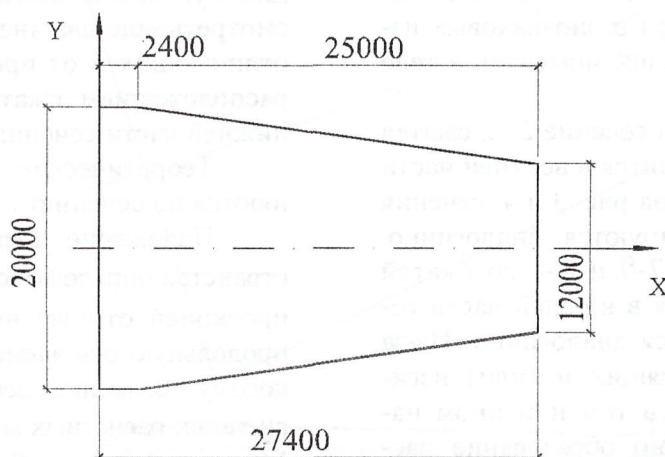


Рис. 1. Шестиугольная плита тормозного участка испытательного полигона РУПП БелАЗ

Теория расчета несущей способности пространственных сечений при совместном действии крутящего и изгибающего моментов

При действии крутящих и изгибающих моментов на шестиугольную железобетонную плиту дорожного по-

крытия разрушение происходит по пространственному сечению, образованному спиральной трещиной и замыкающей ее сжатой зоной, расположенной под углом α к продольной оси элемента. Для определения несущей способности плиты было рассмотрено восемь характерных сечений (рис. 2).

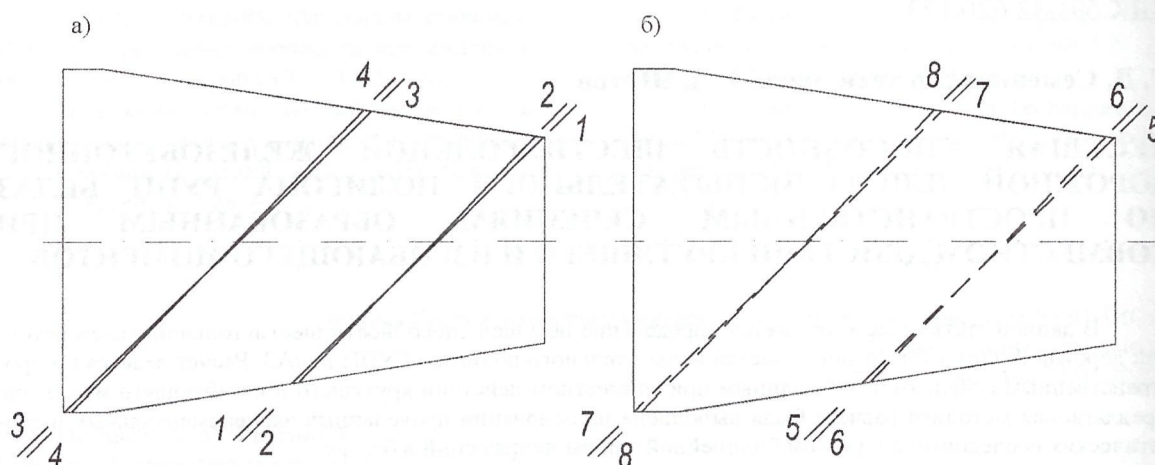


Рис. 2. Расположение расчетных пространственных сечений, образованных спиральной трещиной и замыкающей ее сжатой зоной: а – сжатая зона расположена в верхней части плиты; б – сжатая зона расположена в нижней части плиты

На рис. 2, а рассмотрены сечения, сжатая зона которых находится в верхней части сечения. На рис. 2, б рассмотрены сечения, сжатая зона которых находится в нижней части сечения. Рассмотрение расположения сжатой зоны в верхней и нижней частях сечения связано с возникновением разнознаковых изгибающих и крутящих моментов в теле плиты.

Сечение 1–1 и сечение 2–2, сжатая зона которых находится в верхней части сечения, показаны на рис. 3 и 4; сечения 3–3 и 4–4 формируются аналогично. Сечения 5–5, 6–6, 7–7 и 8–8 со сжатой зоной, находящейся в нижней части сечения, формируются аналогично. Из-за преобладания крутящих и (или) изгибающих моментов в том или ином направлении возможно образование расчетных пространственных сечений с поворотом сечения под углом $+45^\circ$ или -45° (наклон сечения отражен на развертках плиты на рис. 7 и 8).

Для вывода необходимых расчетных величин при определении несущей способности плиты пространственных сечений на рис. 5 и 6 показаны фрагменты продольного и поперечного армирования шестиугольной железобетонной плиты с указанием необходимых размеров и параметров.

Таким образом, все рассматриваемые сечения сводятся к двум основным разновидностям (см. рис. 7 и 8), отличающимся длиной сжатой зоны, однако, учитывая расположение сжатой зоны бетона и у нижней, и у верхней грани шестиугольной плиты, необходимо рассмотреть еще два аналогичных сечения, отличающихся от предыдущих сечений расположением сжатой зоны бетона в нижней части сечения.

Теоретические выкладки выполняются по сечению 1–1 (см. рис. 3).

Положение сжатой зоны в пространстве определяется параметром C_1 – проекцией отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента. По нормали к косому сечению действуют проекции внешних расчетных моментов $M_{Sd,x} \cdot \cos \alpha$, $M_{Sd,y} \cdot \sin \alpha$, а также $T_{Sd,xy}$.

$$\sin \alpha = \frac{b_1}{b_T}; \quad \cos \alpha = \frac{C_1}{b_T};$$

$$b_N = \sqrt{b_1^2 + C_1^2}. \quad (1)$$

Значения размеров b_1 , C_1 , а также b_T определяются расчетным путем (используя геометрические преобразования) или принимаются по фактическим (натурным) показателям на чертеже, выполненном в масштабе в AutoCAD.

Ширина расчетного сечения принимается равной b_T .

Условие прочности в расчетном предельном состоянии выводится из соотношения моментов внешних и внутренних сил относительно оси, про-

ходящей через центр тяжести этой сжатой зоны, при принятии эпюры напряжений в сжатой зоне в виде прямоугольной трапеции [2]:

$$M_{Sd,x} \cdot \cos \alpha + M_{Sd,y} \cdot \sin \alpha + T_{Sd,xy} \leq M_{Rd} \quad (2)$$

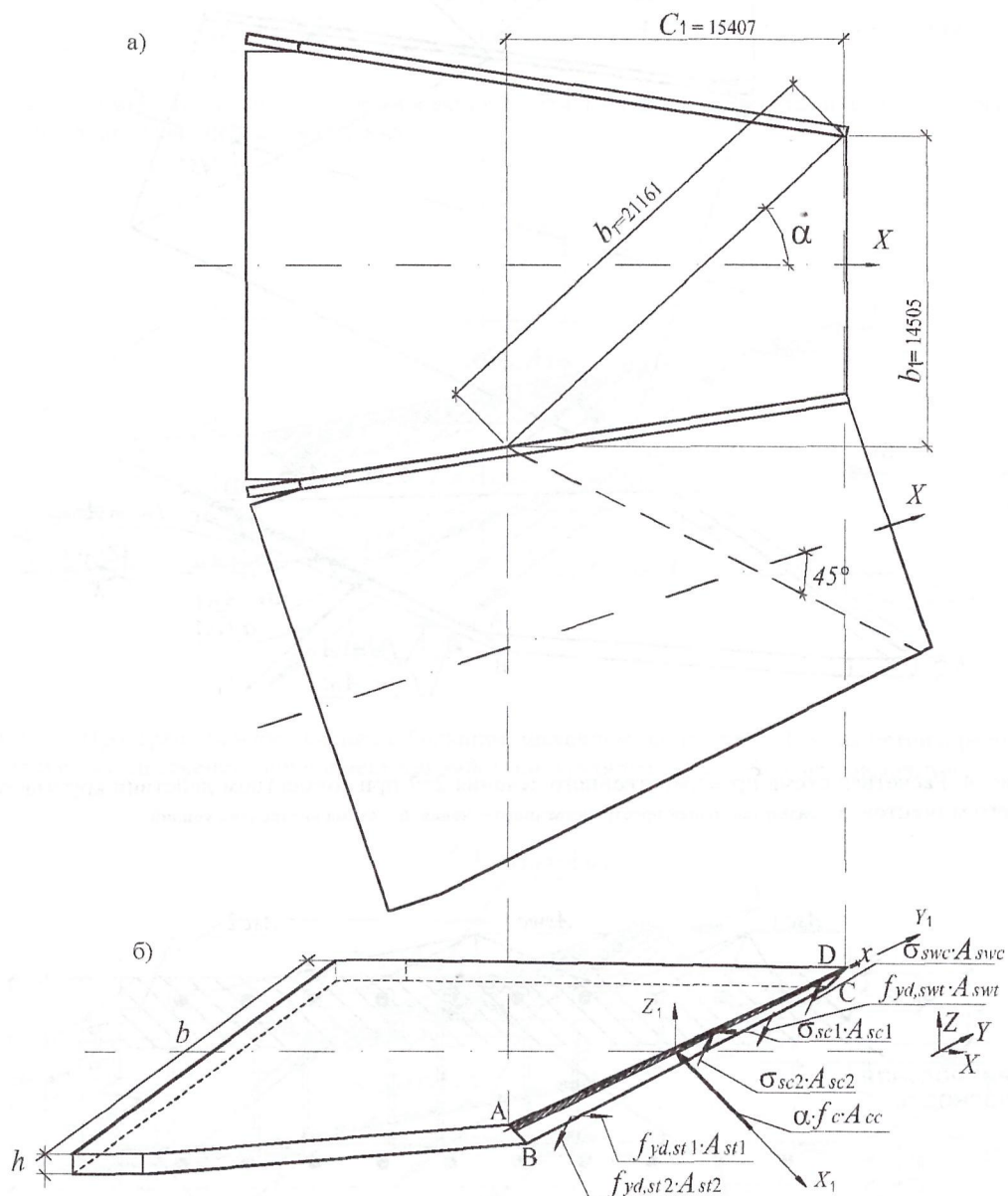


Рис. 3. Расчетная схема пространственного сечения 1-1 при совместном действии крутящего и изгибающего моментов: а – развертка граней пространственного сечения; б – схема внутренних усилий

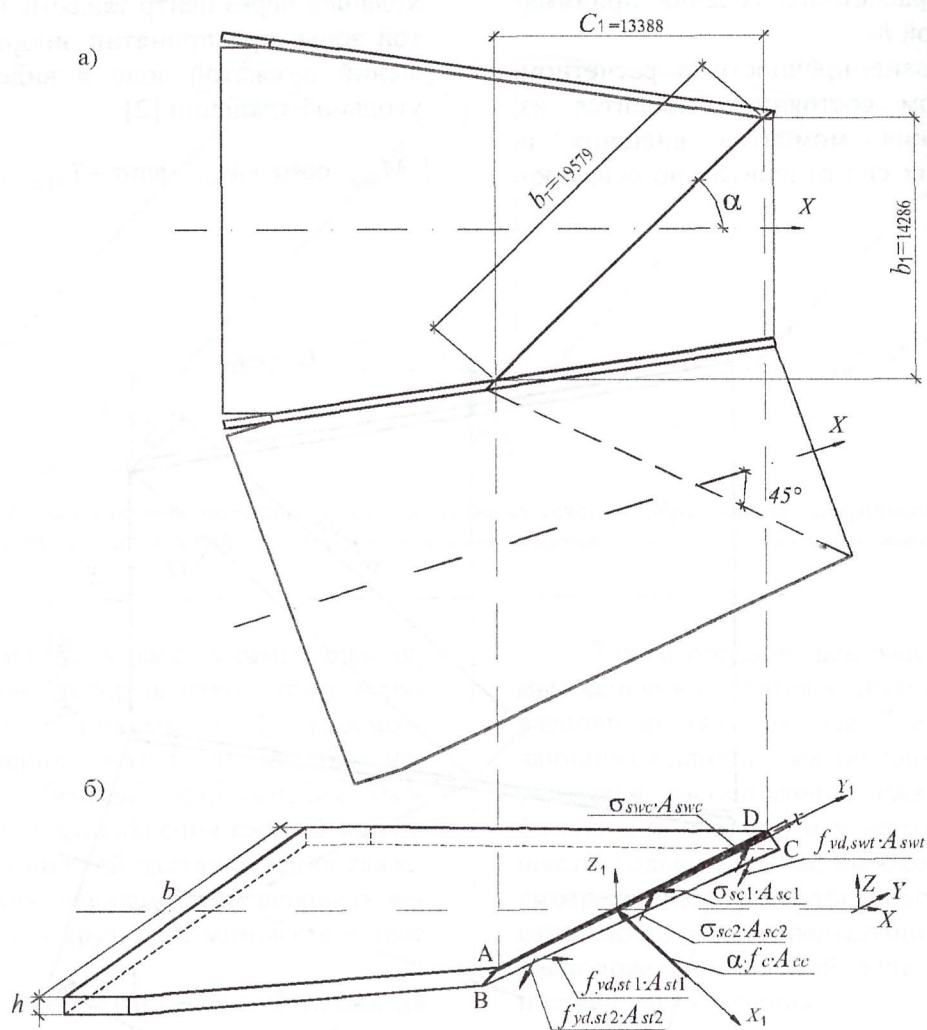


Рис. 4. Расчетная схема пространственного сечения 2-2 при совместном действии крутящего и изгибающего моментов: а – развертка граней пространственного сечения; б – схема внутренних усилий

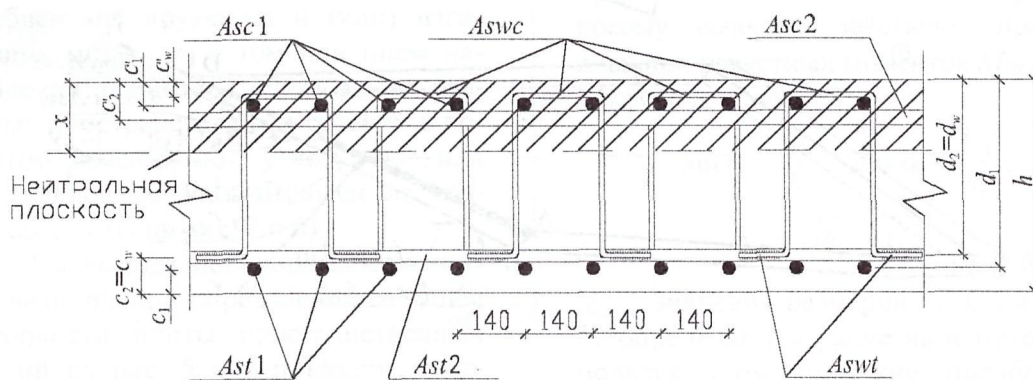


Рис. 5. Фрагмент поперечного армирования шестиугольной железобетонной плиты с расположением сжатой зоны в верхней части сечения

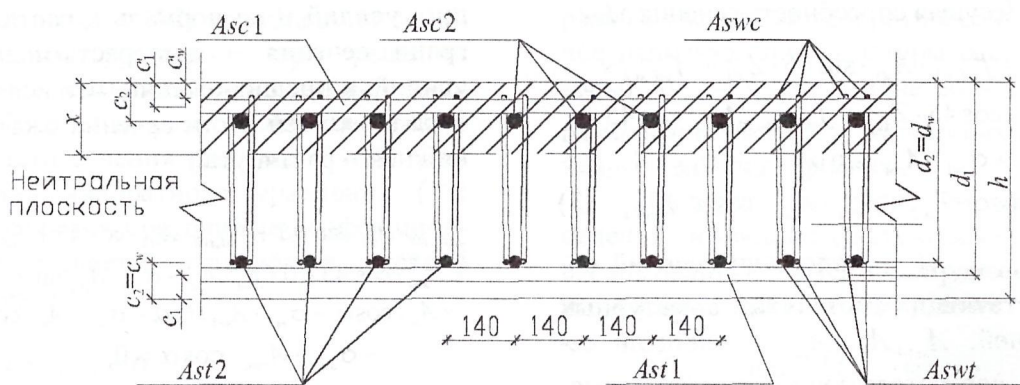


Рис. 6. Фрагмент продольного армирования шестиугольной железобетонной плиты с расположением сжатой зоны в верхней части сечения

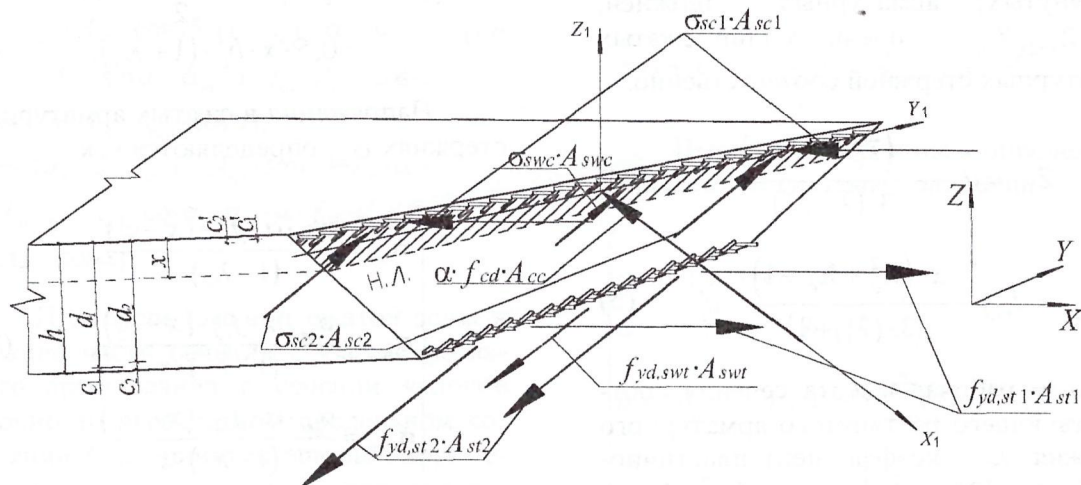


Рис. 7. Пространственное сечение с большим значением длины сжатой зоны бетона, расположенной в верхней части сечения, при совместном действии крутящего и изгибающего моментов

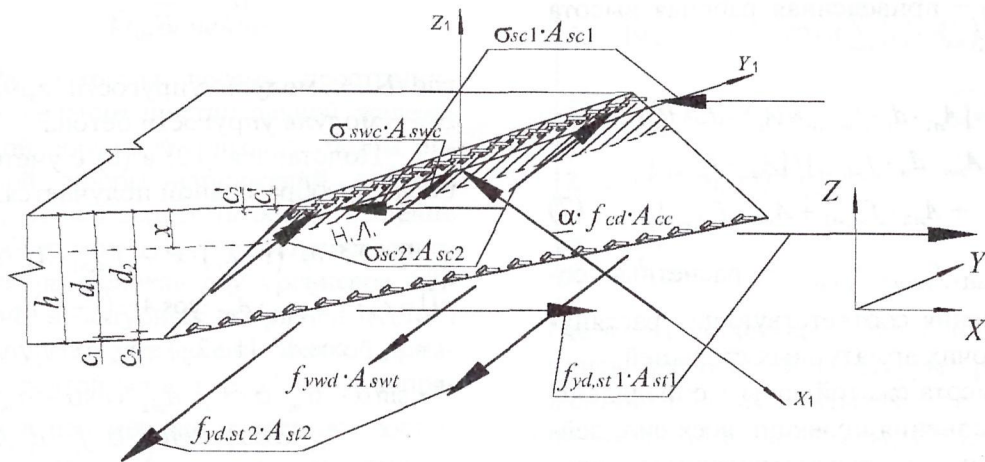


Рис. 8. Пространственное сечение с меньшим значением длины сжатой зоны бетона, расположенной в верхней части сечения, при совместном действии крутящего и изгибающего моментов

Несущая способность сечения M_{Rd} .

$$M_{Rd} = f_{yd, st1} \cdot A_{st1} \cdot \sin 45 \cdot Z_{st1} + f_{yd, st2} \times \\ \times A_{st2} \cdot \cos 45 \cdot Z_{st2} + f_{yd, swt} \cdot A_{swt} \cdot \cos 45 \times \\ \times Z_{swt} + \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1} \cdot \sin \alpha \cdot Z_{sc1} + \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} \times \\ \times \cos \alpha \cdot Z_{sc2} + \sigma_{swc} \cdot A_{swc} \cdot \cos \alpha \cdot Z_{swc}, \quad (3)$$

где $A_{st1}, A_{st2}, A_{swt}$ – площади сечений соответствующих растянутых арматурных стержней; $A_{sc1}, A_{sc2}, A_{swc}$ – площади сечений соответствующих сжатых арматур; $\sigma_{sc1}, \sigma_{sc2}, \sigma_{swc}$ – напряжения в соответствующих сжатых арматурных стержнях; $Z_{st1}, Z_{st2}, Z_{swt}$ – плечи усилий растянутых арматурных стержней; $Z_{sc1}, Z_{sc2}, Z_{swc}$ – плечи усилий сжатых арматурных стержней соответственно.

$$Z_{sti} = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)}, \quad (4)$$

$$Z_{sci} = d_{red} - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)} - c'_i, \quad (5)$$

где d_i – рабочая высота сечения соответствующего растянутого арматурного стержня; λ_c – коэффициент пластичности бетона [2]:

$$\lambda_c = 0,97 - 0,0077 f_{cd}, \quad (6)$$

здесь значение f_{cd} выражено в мегапаскалях; d_{red} – приведенная рабочая высота сечения:

$$d_{red} = [A_{st1} \cdot d_1 \cdot f_{yd, st1} + A_{st2} \cdot d_2 \cdot f_{yd, st2} + \\ + A_{swt} \cdot d_w \cdot f_{yd, swt}] / [A_{st1} \cdot f_{yd, st1} + \\ + A_{st2} \cdot f_{yd, st2} + A_{swt} \cdot f_{yd, swt}], \quad (7)$$

где $f_{yd, st1}, f_{yd, st2}, f_{yd, swt}$ – расчетные сопротивления соответствующих растянутых рабочих арматурных стержней.

Высота сжатой зоны x определяется из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны – для сжимаю-

щих усилий и на нормаль к растянутой грани сечения – для растягивающих усилий, в предположении, что вся арматура в верхней части сечения сжата, а в нижней – растянута:

$$f_{yd, st1} \cdot A_{st1} \cdot \sin 45 + f_{yd, st2} \cdot A_{st2} \cdot \cos 45 + f_{yd, swt} \times \\ \times A_{swt} \cdot \cos 45 - \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{cc} - \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1} \sin \alpha - \sigma_{sc2} \times \\ \times A_{sc2} \cos \alpha - \sigma_{swc} \cdot A_{swc} \cdot \cos \alpha = 0, \quad (8)$$

где A_{cc} – площадь билинейной эпюры напряжений:

$$A_{cc} = x \cdot \lambda_c \cdot b_T + \frac{x - \lambda_c \cdot x}{2} \cdot b_T = \\ = 0,5 \cdot x \cdot b_T \cdot (1 + \lambda_c). \quad (9)$$

Напряжения в сжатых арматурных стержнях σ_{sci} определяются как

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{sc1} &= \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_1)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}; \\ \sigma_{sc2} &= \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_2)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}; \\ \sigma_{swc} &= \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_w)}{(1 - \lambda_c) \cdot x}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

где α_m – коэффициент, определяемый по формуле

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

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

Подставляя (10) в (8) с учетом (9), после преобразований получается:

$$\alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b_T \cdot (1 - \lambda_c^2) \cdot x^2 - [f_{yd, st1} \cdot A_{st1} \cdot \sin 45 \times \\ \times (1 - \lambda_c) + f_{yd, st2} \cdot A_{st2} \cdot \cos 45 \cdot (1 - \lambda_c) + f_{yd, swt} \times \\ \times A_{swt} \cdot \cos 45 \cdot (1 - \lambda_c) - \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{sc1} \times \\ \times \sin \alpha - \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{sc2} \cdot \cos \alpha - \alpha_m \cdot \alpha \times \\ \times f_{cd} \cdot A_{swc} \cdot \cos \alpha] \cdot x - [\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c'_1 \cdot A_{sc1} \times \\ \times \sin \alpha + \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c'_2 \cdot A_{sc2} \cdot \cos \alpha + \\ + \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c'_w \cdot A_{swc} \cdot \cos \alpha] = 0. \quad (12)$$

Равенство (12) представляет собой квадратное уравнение, при решении которого находится искомая величина сжатой зоны x , расположенная в верхней части сечения (см. рис. 7 и 8). Для решения квадратного уравнения (12) определяются постоянные коэффициенты и решается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0; \\ a = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b_T \cdot (1 - \lambda_c^2); \\ b = -[f_{yd,sti1} \cdot A_{sti1} \cdot \sin 45 \cdot (1 - \lambda_c) + \\ + f_{yd,sti2} \cdot A_{sti2} \cdot \cos 45 \cdot (1 - \lambda_c) + \\ + f_{yd,svi} \cdot A_{svi} \cdot \cos 45 \cdot (1 - \lambda_c) - \alpha_m \cdot \alpha \times \\ \times f_{cd} \cdot A_{sc1} \cdot \sin \alpha - \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{sc2} \cdot \cos \alpha - \\ - \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_{svc} \cdot \cos \alpha]; \\ c = -[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c'_1 \cdot A_{sc1} \cdot \sin \alpha + \alpha_m \cdot \alpha \times \\ \times f_{cd} \cdot c'_2 \cdot A_{sc2} \cdot \cos \alpha + \alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot c'_w \times \\ \times A_{svc} \cdot \cos \alpha]. \end{cases} \quad (13)$$

При расположении сжатой зоны в нижней части сечения с учетом реального армирования в сечении условие прочности в расчетном предельном состоянии при принятии эпюры напряжений в сжатой зоне в виде прямоугольной трапеции будет иметь вид, аналогичный (2) и (3), и расчет, аналогичный вышеприведенному.

Заключение

Рассматривая восемь пространственных сечений шестиугольной железобетонной дорожной плиты с учетом билинейной эпюры напряжений сжатого бетона, можно выделить общее решение для любого замкнутого пространственного сечения, включая двухуровневое размещение арматурных стержней (сеток) при допуске – размещение сжатой арматуры в сжатой зоне, т. е. $c'_i < x$ и напряжениях в ней меньше расчетного сопротивления: $\sigma_{sc,i} \leq f_{yd,sc,i}$, а также размещение растянутой арматуры в растянутой зоне, т. е. $d_i > x$ и напряжениях в ней,

равных расчетному сопротивлению (полное использование арматуры растянутой зоны): $\sigma_{st,i} = f_{yd,sti}$. Учтена возможность размещения сжатых и растянутых стержней в нескольких уровнях.

Проверка прочности нормальных сечений, имеющих сжатую зону в пространственном сечении, производится по условию, приведенному ниже:

$$\begin{aligned} & M_{sd,x} \cdot \cos \alpha + M_{sd,y} \cdot \sin \alpha + \\ & + T_{sd,xy} \leq \sum_{i=1}^n f_{yd,sti} \cdot A_{sti} \cdot \cos 45 \cdot Z_{sti} + \\ & + \sum_{i=1}^m f_{yd,sti} \cdot A_{sti} \cdot \sin 45 \cdot Z_{sti} + \sum_{i=1}^k \sigma_{sci} \cdot A_{sci} \times \\ & \times \cos \alpha + Z_{sci} \sum_{i=1}^z \sigma_{sci} \cdot A_{sci} \cdot \sin \alpha \cdot Z_{sci}. \end{aligned} \quad (14)$$

Высота сжатой зоны x определяется решением системы уравнений

$$\begin{cases} a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0; \\ a = \alpha \cdot f_{cd} \cdot 0,5 \cdot b \cdot (1 - \lambda_c^2); \\ b = -[(1 - \lambda_c) \cdot [\cos 45 \cdot \sum_{i=1}^n (f_{yd,sti} \cdot A_{sti}) + \\ + \sin 45 \cdot \sum_{i=1}^m (f_{yd,sti} \cdot A_{sti})] - [\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \times \\ \times (\cos \alpha \sum_{i=1}^k A_{sci} + \sin \alpha \sum_{i=1}^z A_{sci})]; \\ c = -[\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (\cos \alpha \sum_{i=1}^k (c'_i \cdot A_{sci}) + \\ + \sin \alpha \sum_{i=1}^z (c'_i \cdot A_{sci}))]; \\ \lambda_c = 0,97 - 0,0077 f_{cd}; \\ \alpha_m = \frac{E_s}{E_{cm}}, \end{cases} \quad (15)$$

где n – количество уровней по высоте плиты растянутой арматуры, расположенной поперек плиты; m – то же, расположенной вдоль плиты; k – количество уровней по высоте плиты сжатой арматуры, расположенной поперек плиты; z – то же, расположенной вдоль плиты.

Далее определяются напряжения в сжатой арматуре:

$$\sigma_{sc,i} = \frac{\alpha_m \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c'_i)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \quad (16)$$

S. D. Semenyuk, R. Z. Shutau
Bearing capacity over spatial sections, which are formed under the joint action of torsional and bending moments, possessed by a hexagonal reinforced concrete pavement slab of the rupp «belarusian autoworks» testing site

The paper deals with the determination of the bearing capacity of a hexagonal reinforced concrete pavement slab of the braking area at the testing site of the Republican Unitary Production Enterprise «Belarusian Autoworks». The calculation is performed over spatial sections, formed under the joint action of torsional and bending moments. The proposed calculation procedure has been done on the basis of the experimental and theoretical research, with the bilinear curve of concrete stresses being taken into account.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Белорусско-Российский университет
 Материал поступил 20.06.2010