

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012.36

С. Д. Семенюк, И. В. Ильиных, Э. А. Кетнер, М. А. Зябкина

ПРОЧНОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ УЧАСТКА С ПОРОГОВЫМИ НЕРОВНОСТЯМИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА РУПП «БелАЗ»

UDC 624.012.36

S. D. Semeniuk, I. V. Ilyinykh, E. A. Ketner, M. A. Ziabkina

STRENGTH OF NORMAL AND SPATIAL SECTIONS OF REINFORCED CONCRETE PAVING SLABS OF THE ROAD SECTION WITH THRESHOLD UNEVENNESS AT THE OJSC BELAZ TEST SITE

Аннотация

Приведены результаты численных исследований несущей способности железобетонных плит покрытия участка дороги с пороговыми неровностями испытательного полигона РУПП «БелАЗ». Предложена методика расчета железобетонных плит покрытия дороги под карьерные самосвалы грузоподъемностью 500 т на основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований. Рассматривается прочность нормальных сечений плит как в продольном, так и в поперечном направлении, а также прочность пространственных сечений.

Ключевые слова:

плита покрытия, железобетон, нормальные и пространственные сечения, полигон, дорога, изгибающий момент, кручение, несущая способность.

Abstract

The paper deals with the results of numerical studies of carrying capacity of reinforced concrete slabs covering the road section with the threshold unevenness at the OJSC BelAZ test site. The proposed method of calculation of reinforced concrete paving slabs of the road to be used by quarry dump trucks with carrying capacity of 500 tonnes is based on performed experimental and theoretical studies, the strength of normal sections of slabs in both longitudinal and transverse direction and the strength of spatial sections being considered.

Key words:

paving slab, reinforced concrete, normal and spatial cross-section, test site, road, bending moment, torsion, load-bearing capacity.

Введение

Треть мирового рынка большегрузных карьерных самосвалов занимает Беларусь. Перед отправкой потребителю (в большей части за границу) карьерные самосвалы, в том числе грузо-

подъемностью 500 т, проходят испытания на полигоне РУПП «БелАЗ». Составным элементом испытательного полигона является участок дороги с пороговыми неровностями, для которого кафедрой «Строительные конструкции,

здания и сооружения» Белорусско-Российского университета разработаны железобетонные плиты [1]. Плиты имеют маркировку ППН-1, ППН-2, ППН-3, ППН-4, где ППН – это плита пороговых неровностей, цифровые индексы 1, 2, 3, 4 – типы плиты, характеризующие поперечное сечение.

В статье детально рассматривается плита железобетонная для дороги с порогами неровностями ППН-1 с размерами 1490 × 5990 × 510 мм.

В соответствии с договором между РУПП «БелАЗ» и Белорусско-Российским университетом кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения» были запроектированы четыре типоразмера железобетонных плит покрытия для участка дороги с порогами неровностями. Размеры конструктивного сечения плит пороговых неровностей представлены на рис. 1, фрагмент участка с порогами неровностями – на рис. 2.

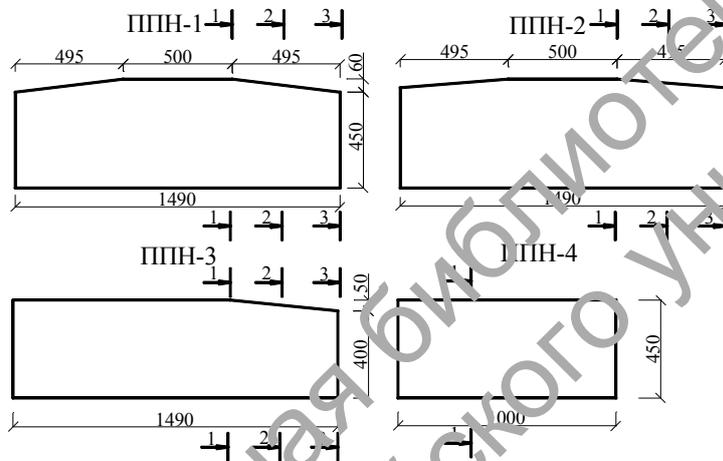


Рис. 1. Размеры конструктивного сечения плит пороговых неровностей

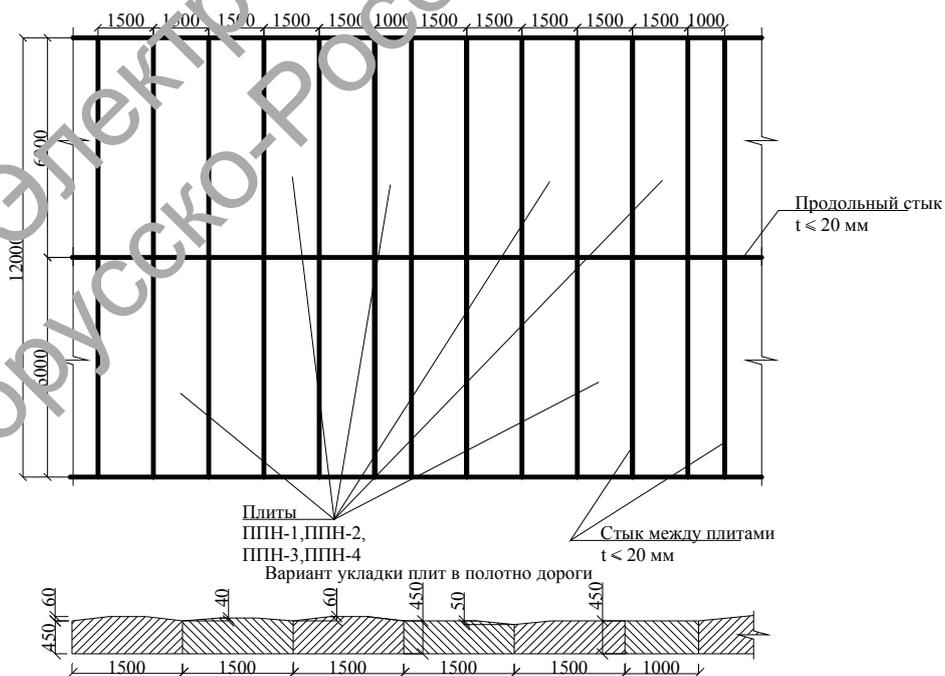


Рис. 2. Фрагмент участка с порогами неровностями

Плиты запроектированы в соответствии с [2] под нагрузкой от карьерного самосвала грузоподъемностью 500 т при его торможении с замедлением 4 м/с² (нагрузка может достигать 764 т на переднюю ось автомобиля). Длина каждой плиты – 600 см, толщина – 45 см. Класс бетона плит – С 25/30.

Статический расчет плит

Расчет выполняется методом Б. Н. Жемочкина по специально разра-

ботанной программе, в которой при определении коэффициентов канонических уравнений задавались функцией прогибов прямоугольной плиты с защемленной в начале координат нормалью, в виде особого решения и совокупности частных решений Клебша [3]. При этом рассматривались два варианта загрузки: центральное и краевое от карьерных самосвалов грузоподъемностью 500 т (табл. 1). Расчет плит выполнен в соответствии с [4].

Табл. 1. Значения поперечных сил, изгибающих и крутящих моментов для плит дороги с пороговыми неровностями испытательного полигона РУПП «БелАЗ»

Исследуемый параметр, кН/м	Маркировка			
	ППН-1	ППН-2	ППН-3	ППН-4
Q_x	1598,40	1564,40	1581,20	532,30
	987,10	985,0	986,30	-526,90
Q_y	1013,00	981,40	992,60	13,072
	-733,34	-717,70	-726,90	-12,89
M_x	341,10	332,10	346,40	41,28
	-69,00	-67,20	-80,70	-41,28
M_y	1290,00	1284,00	1287,00	630,00
	-153,30	-154,20	-179,10	-188,50
M_{xy}	49,50	48,60	49,10	54,05
	-49,50	-48,60	-49,10	-54,05

Примечание – В числителе – расчетные значения; в знаменателе – значения на 1 п. м

Конструктивный расчет плит

При действии на железобетонную плиту дорожного покрытия крутящих и изгибающих моментов разрушение происходит до пространственному сечению, образованному спиральной трещиной и замыкающей ее сжатой зоной, расположенной под углом α к горизонтальной оси элемента. Условие прочности в расчетном предельном состоянии выведено 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 принимают в виде прямоугольной трапеции [5].

Расчет прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента. Проверка прочности нормальных сечений (рис. 3) производится из условия

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

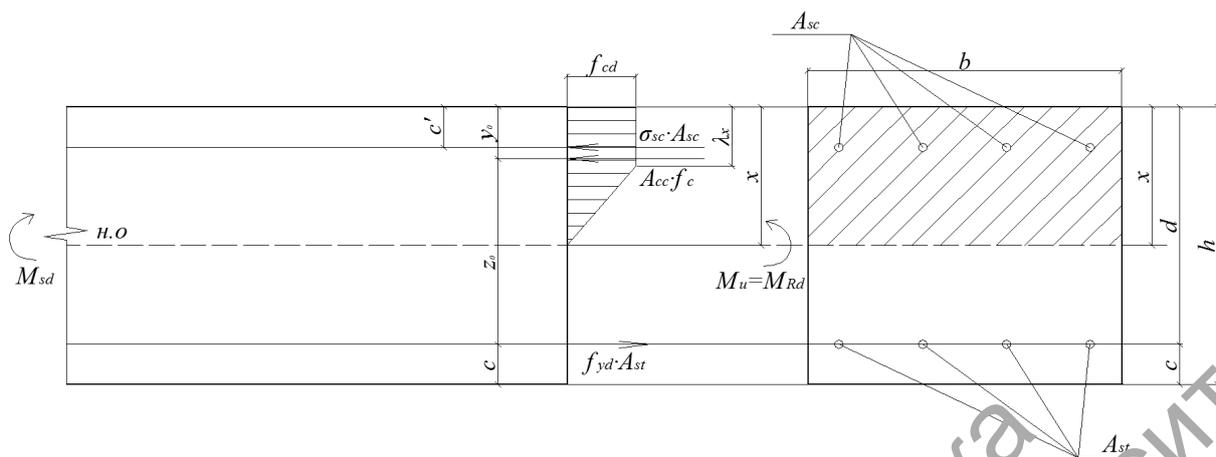


Рис. 3. К расчету прочности нормальных сечений

Высота сжатой зоны x определяется из квадратного уравнения

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

где

$$A_1 = 0,5(1 - \lambda_c^2)b; \quad (3)$$

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

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

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

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

Напряжения в арматурных рядах

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

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

$$x = \frac{f_{yd} A_s - f_{sc} A_s}{0,5(1 + \lambda_c) f_{cd} b}. \quad (9)$$

Во всех случаях должно соблюдаться условие

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

При проектировании конструкций численные значения параметров f_{cd} , f_{ck} , f_{yd} и E_{cd} для применяемых бетонов определяют по [6], коэффициент пластичности вычисляют по формуле

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

или по данным натуральных испытаний [7].

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

Расчет прочности пространственных сечений. Теоретически доказано и подтверждено экспериментально, что распространение спиральной тре-

щины в железобетонных элементах прямоугольного сечения, подверженных кручению, изгибу с кручением или воздействию поперечной силы и кручения, происходит под углом 45° к продольной оси элемента [8].

Положение сжатой зоны в пространстве определяется параметром C_1 – проекцией отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента. По нормали к этому сечению действуют проекции внешних расчетных моментов $M_y \sin \alpha$ и

$T_x \cos \alpha$ (рис. 4).

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

$$b_T = \sqrt{b^2 + C_1^2}, \quad (12)$$

где C_1 – проекция отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента, $C_1 = (2h + b) \operatorname{ctg} \beta$.

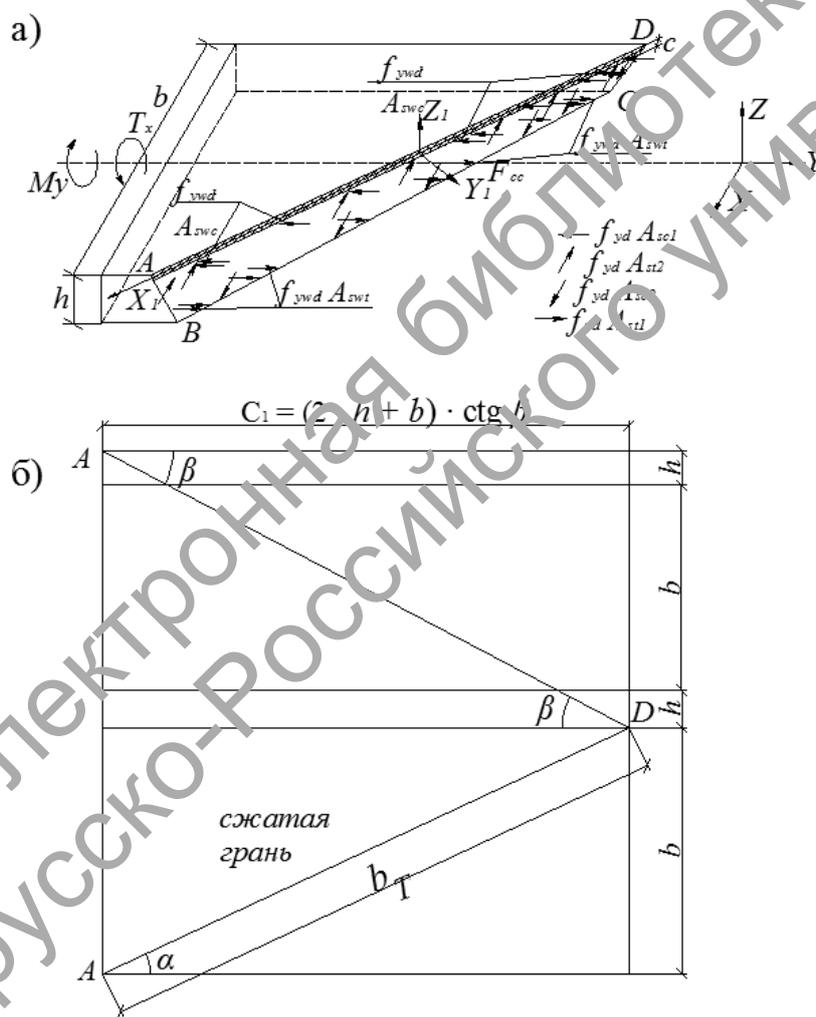


Рис. 4. Расчетная схема пространственного сечения при совместном действии крутящего и изгибающего моментов: а – схема внешних и внутренних усилий; б – развертка граней пространственного сечения

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} 0,5(1 + \lambda) f_{cd} b_T x &= f_{yd} A_{st1} \sin \alpha + f_{yd} A_{sc2} x \times \\ &\times \cos \alpha - A_{sc1} \frac{\alpha f_{cd} (d_2 - x)}{(1 - \lambda_c) x} \sin \alpha - A_{sw1} f_{yd} \times \\ &\times \cos \alpha + f_{ywd} A_{sw1} \frac{bctg\beta}{S} \sin \alpha - f_{ywd} A_{swc} \times \\ &\times \frac{bctg\beta}{S} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда

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

Условие прочности в расчетном предельном состоянии при симметричном армировании плиты записывают следующим образом:

$$\begin{aligned} M_y \sin \alpha + T_x \cos \alpha &\leq \sigma_{st1} A_{sc1} z_{st1} \sin \alpha + \\ &+ \sigma_{st2} A_{st2} z_{st2} \cos \alpha + \sigma_{sc1} A_{sc1} z_{sc1} \sin \alpha - \\ &- \sigma_{sc2} A_{sc2} z_{sc2} \cos \alpha + f_{ywd} A_{sw1} \frac{bctg\alpha}{S} \times \\ &\times z_{sw1} \sin \alpha + \sigma_{sc1} A_{sc1} z_{sc1} \sin \alpha - \\ &- \sigma_{sc2} A_{sc2} z_{sc2} \cos \alpha + f_{ywd} A_{sw1} \frac{bctg\alpha}{S} \times \\ &\times z_{sw1} \sin \alpha + f_{ywd} A_{swc} \frac{bctg\beta}{S} z_{swc} \sin \alpha, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} = \sigma_{s4} &= \frac{\alpha f_{cd} (d_2 - x)}{(1 - \lambda_c) x} \sin \alpha; \\ \sigma_{s2} = \sigma_{s3} &= \frac{\alpha f_{cd} (d_2 - x)}{(1 - \lambda_c) x} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (18)$$

Несущая способность плиты по сечению, нормальному к оси Y

Поперечное сечение дорожной плиты представлено на рис. 5.

Монолитный бетон класса С 25/30; арматура 11Ø16 S400 с $A_{s1} = 22,1 \text{ см}^2$ и 1 Ø22 S400 с $A_{s2} = 41,81 \text{ см}^2$. Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. При этом прочностные и деформативные характеристики бетона $f_{ck} = 25 \text{ МПа}$; $f_{cd} = 16,667 \text{ МПа}$; $f_{ctm} = 1,8 \text{ МПа}$; $f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа}$; $E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

Несущая способность бетонного сечения

$$\begin{aligned} M &= f_{ctd} W_{pl} = 1,2 \cdot 102214 \cdot 0,1 = \\ &= 12265,7 \text{ кН} \cdot \text{см} = 122,657 \text{ кН} \cdot \text{м}, \end{aligned}$$

где

$$W_{pl} = \frac{bh^2}{3,5} = \frac{149 \cdot 49^2}{3,5} = 102214 \text{ см}^3.$$

Коэффициент пластичности
 $\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot 16,667 = 0,697.$

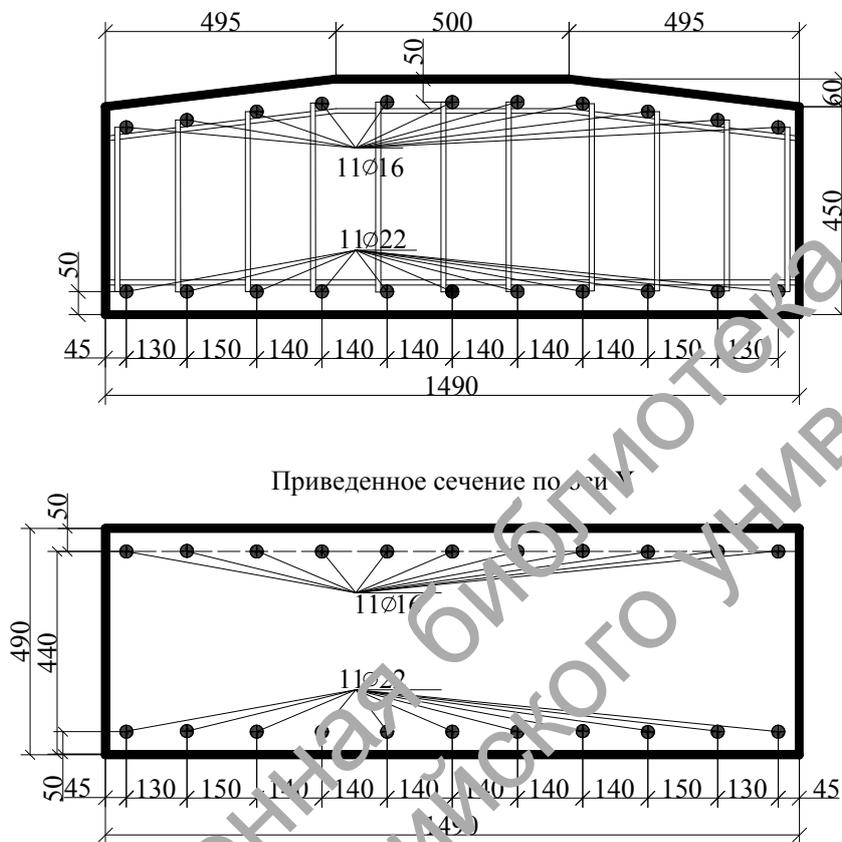


Рис. 5. Поперечное сечение дорожной плиты ППН-1

Рабочая высота сечения

$$d = d_2 = 490 - 50 = 440 \text{ мм} = 44 \text{ см.}$$

Отношение модулей упругости
 стали к бетону

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

Граничная высота сжатой зоны

$$x_{lim} = \frac{\alpha f_{cd} d}{\alpha f_{cd} + f_{yd} (1 - \lambda_c)} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 44}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 24,5 \text{ см.}$$

Высота сжатой зоны определяется из квадратного уравнения

$$A_1 x^2 + A_2 x + A_3 = 0;$$

где неизвестные при x

$$A_1 = 0,5(1 - \lambda_{red}^2) b = 0,5(1 - 0,802^2) 149 = 26,581;$$

$$A_2 = \alpha_m A_s - (1 - \lambda_{red}) \frac{f_{yd}}{f_{cd}} A_s = 8,333 \cdot 41,811 - (1 - 0,802) \times \frac{365}{16,667} \cdot 41,811 = 167,114;$$

$$A_3 = -\alpha_m A_s c = -8,333 \cdot 41,811 \cdot 5 = -1742,055;$$

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

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

$$26,581x^2 + 167,114x - 1742,055 = 0;$$

$$x = \frac{-167,114 \pm \sqrt{167,114^2 + 4 \cdot 26,581 \times 1742,055}}{2 \cdot 26,581} = 11,828 \text{ см.}$$

Напряжение в арматурных рядах по высоте сечения вычисляется по формуле

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

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (5 - 11,828)}{(1 - 0,697) \cdot 11,828} =$$

$$= -264,605 \text{ МПа.}$$

Несущая способность сечения определяется как

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

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

$$+ \sigma_{sc} A_{sc} (d_2 - c^1). \quad (19)$$

Таким образом, несущая способность плиты по сечению, нормальному к оси Y

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 149 \cdot 11,828 \cdot 10^2 \times$$

$$\times [(1 + 0,697) \cdot 44 - 0,33 \cdot 11,828 \times$$

$$\times (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 264,605 \times$$

$$\times 10^2 \cdot 22,121 \cdot (44 - 5) =$$

$$= 119977698 \text{ Н} \cdot \text{см} = 1199,8 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

что на 1 п. м составляет 805,25 кН·м.

Несущая способность плиты по сечению, нормальному к оси X

Рассмотрены сечения 1-1, 2-2, 3-3. Монолитный бетон класса С 25/30; арматура $\Omega \text{O} 16 \text{ S}400$ с $A_s = 185,012 \text{ см}^2$. Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Для бетона $f_{ck} = 25 \text{ МПа}$; $f_{cd} = 16,667 \text{ МПа}$; $f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}$; $f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа}$; $E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Сечение 1-1 представлено на рис. 6.

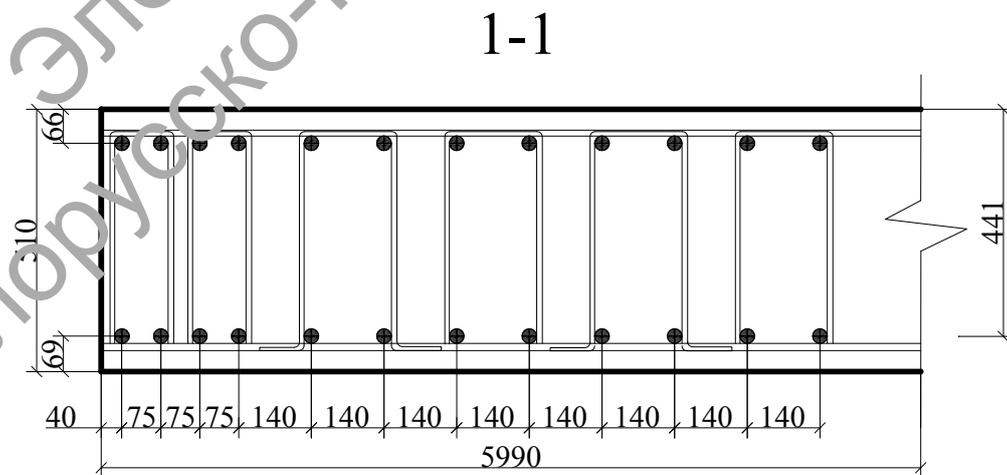


Рис. 6. Сечение 1-1 дорожной плиты ППН-1

Сечение 1–1. Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} W_{pl} = 1,2 \cdot 445142,6 \cdot 0,1 = 53417,1 \text{ кН}\cdot\text{см} = 534,171 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

где

$$W_{pl} = \frac{bh^2}{3,5} = \frac{599,0 \cdot 51^2}{3,5} = 445142,6 \text{ см}^3.$$

Для определения несущей способности армированного сечения используются [7]

$$\lambda_c = 0,697;$$

$$d = d_2 = 51 - 6,9 = 44,1 \text{ см};$$

$$\alpha_m = 8,333.$$

$$x_{lim} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 44,1}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 24,55 \text{ см}.$$

Согласно (2)...(6),

$$A_1 = 0,5 \cdot (1 - 0,802^2) \cdot 599 = 106,86;$$

$$A_2 = 8,333 \cdot 92,506 - (1 - 0,802) \times \frac{365}{16,667} \cdot 92,506 = 369,736;$$

$$A_3 = -8,333 \cdot 92,506 \cdot 6,9 = -5318,882;$$

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

$$106,86x^2 + 369,736x - 5318,882 = 0;$$

$$x = 8,994 \text{ см}.$$

В соответствии с формулой (8)

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (6,6 - 8,994)}{(1 - 0,697) \cdot 8,994} = -122,008 \text{ МПа}.$$

Таким образом, несущая способность сечения 1–1 определяется по (19):

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 599 \times 8,994 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \times 44,1 - 0,33 \cdot 8,994 \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 122,008 \times 10^2 \cdot 92,506 \cdot (44,1 - 6,6) = 349228836,24 \text{ Н}\cdot\text{см} = 3492,29 \text{ кН}\cdot\text{м} = 349,229 \text{ тс}\cdot\text{м},$$

что на 1 п. м составляет 58,3 тс·м.

Аналогично определяется несущая способность сечений 2–2 и 3–3.

Несущая способность плиты при совместном действии M_y и T_x

Монолитный бетон класса С 25/30; арматура в продольном направлении 11Ø16 S400 с $A_{sc1} = 22,121 \text{ см}^2$ и 11Ø22 S400 с $A_{st1} = 41,811 \text{ см}^2$, в поперечном направлении 11Ø16 S400 с $A_{st2} = 22,121 \text{ см}^2$ и 17Ø16 S400 с $A_{sc2} = 34,187 \text{ см}^2$. Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Для хомутов: 6Ø10 S240 с $A_{swc} = 4,71 \text{ см}^2$, 5Ø10 S240 с $A_{swt} = 3,925 \text{ см}^2$, где A_{sc1} – площадь верхней арматуры в продольном направлении; A_{sc2} – площадь верхней арматуры в поперечном направлении; A_{st2} – площадь нижней арматуры в поперечном направлении; A_{st1} – площадь нижней арматуры в продольном направлении; A_{swc} – площадь хомутов в сжатой зоне; A_{swt} – площадь хомутов в растянутой зоне (площадь открылок).

Для бетона: $f_{ck} = 25 \text{ МПа}$; $f_{cd} = 16,667 \text{ МПа}$; $f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}$; $f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа}$; $E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

Для расчета используются

$$\lambda_c = 0,697;$$

$$d = d_2 = 44 \text{ см};$$

$$\alpha_m = 8,333.$$

Граничная высота сжатой зоны $\lambda_{lim} = 24,5 \text{ см}$.

Ширина сжатой зоны от действия M_y и T_x :

$$b_T = \sqrt{247^2 + 149^2} = 288,46 \text{ см};$$

$$C_1 = (2 \cdot 49 + 149) \text{ctg}45 = 247 \text{ см};$$

$$\cos \alpha = \frac{247}{288,46} = 0,856;$$

$$\sin \alpha = \frac{149}{288,46} = 0,516.$$

Высота сжатой зоны x определяется по формуле (15):

$$\begin{aligned} &0,5 \cdot (1 - 0,697^2) \cdot 16,667 \cdot 288,46 \cdot x^2 - \\ &- 365 \cdot 41,811 \cdot 0,516 \cdot (1 - 0,697) \cdot x - \\ &- 365 \cdot 22,121 \cdot 0,856 \cdot (1 - 0,697) \cdot x + \\ &+ 22,121 \cdot 8,333 \cdot 16,667 \cdot 44 \cdot 0,516 - \\ &- 22,121 \cdot 8,333 \cdot 16,667 \cdot x \cdot 0,516 + \\ &+ 34,187 \cdot 365 \cdot 0,856 \cdot (1 - 0,697) \cdot x - \\ &- 365 \cdot 3,925 \cdot 2 \cdot \frac{149 \cdot 1}{28} \cdot 0,516 + 174 \cdot x \cdot \\ &\times 4,71 \cdot \frac{149 \cdot 1}{23,3} \cdot 0,516 = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1236,05x^2 - 2828,49x + 64590,2 &= 0; \\ x &= 8,5 \text{ см}. \end{aligned}$$

Плечо внутренней пары определяется по формуле (16), где

$$\begin{aligned} \frac{x(\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3(\lambda_c + 1)} &= \\ = \frac{8,5 \cdot (0,697^2 + 0,697 + 1)}{3 \cdot (0,697 + 1)} &= 3,7 \text{ см}. \end{aligned}$$

Тогда

$$Z_{st1} = 44 - 3,7 = 40,3 \text{ см};$$

$$Z_{st2} = 42,1 - 3,7 = 38,4 \text{ см};$$

$$Z_{sc1} = 5 - 3,7 = 1,3 \text{ см};$$

$$Z_{sc2} = 6,6 - 3,7 = 2,9 \text{ см};$$

$$Z_{swc} = 5,3 - 3,7 = 1,6 \text{ см};$$

$$Z_{swt} = 44,6 - 3,7 = 39,6 \text{ см}.$$

Напряжения в арматурных рядах:

$$\sigma_{st1} = 987,8 \text{ МПа}; \quad \sigma_{st2} = 1551 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{sc1} = -97,39 \text{ МПа}; \quad \sigma_{sc2} = -87,71 \text{ МПа}.$$

Несущая способность дорожной плиты ППН-1 при восприятии крутящих и изгибающих моментов

$$\begin{aligned} M_u &= 365 \cdot 41,811 \cdot 40,3 \cdot 0,516 \cdot 10^2 + \\ &+ 365 \cdot 22,121 \cdot 38,4 \cdot 0,856 \cdot 10^2 - \\ &- 97,39 \cdot 22,121 \cdot 1,3 \cdot 0,516 \cdot 10^2 - \\ &- 87,71 \cdot 34,187 \cdot 2,9 \cdot 0,856 \cdot 10^2 + \\ &+ 174 \cdot 3,925 \cdot \frac{149 \cdot 1}{24} \cdot 40,9 \cdot 0,516 - \\ &- 174 \cdot 4,71 \cdot \frac{149 \cdot 1}{23,3} \cdot 1,6 \cdot 0,516 = \\ &= 57757268,4 \text{ Н} \cdot \text{см} = 577,57 \text{ кН} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

что на 1 п. м составляет 200,4 кН·м.

По вышеприведенной методике была определена прочность нормальных и пространственных сечений для плит пороговых неровностей ППН-2, ППН-3, ППН-4.

Минимальные значения изгибающих и крутящих моментов приведены в табл. 2.

Табл. 2. Несущая способность плит покрытия участка с пороговыми неровностями

Момент, кН/м	Маркировка			
	ППН-1	ППН-2	ППН-3	ППН-4
M_x	537,8	523,3	458,00	497,00
M_y	805,23	778,40	706,00	576,95
M_{xy}	200,4	195,5	186,5	130,25

Заклучение

В результате произведенных расчетов было выявлено, что несущая способность каждой из рассмотренных плит при совместном действии крутящего и изгибающего моментов является наименьшей. Следовательно, данный вид загрузки необходимо учитывать при проектировании конструкций. 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, а также не исключена вероятность образования выбоин, воронок и других дефектов под основанием плиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенюк, С. Д. Несущая способность железобетонных плит покрытия и плиты тельного пола го- на РУПП «Белорусский автомобильный завод» / С. Д. Семенюк, О. З. Шутов, Н. Б. Белый // Геотехника Беларуси: наука и практика : сб. ст. – Минск, 2008. – С. 218–237.
2. СНБ 5.03.01-02*. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : Минстройархитектуры, 2003. – 139 с.
3. Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. – Минск : БНТУ, 2002. – 128 с.
4. ТКП 45-3.05-244-2011(02250). Автомобильные дороги. Дорожные покрытия жесткого типа. Строительные нормы проектирования. – Минск : Минстройархитектуры, 2012. – 60 с.
5. Семенюк, С. Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании / С. Д. Семенюк – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
6. ТКП EN 1992-1-1-2009*. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1 : Общие правила и правила для зданий. – Минск : Минстройархитектуры, 2015. – 200 с.
7. Семенюк, С. Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии / С. Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. – 2001. – № 1. – С. 40–45.
8. Семенюк, С. Д. Расчет железобетонных балок прямоугольного сечения при совместном воздействии поперечных сил, крутящих и изгибающих моментов / С. Д. Семенюк, А. В. Зезюлин, Е. Я. Семенюк // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск, 2015. – Вып.7. – С. 133–151.

Статья сдана в редакцию 19 сентября 2016 года

Славик Денисович Семенюк, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-297-43-38-72.

Игорь Владиславович Ильиних, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-336-92-78-86.

Эрнест Александрович Кетнер, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-336-36-99-53.

Марина Александровна Зябкакина, магистрант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-41-11-63.

Slavik Denisovich Semeniuk, DSc (Engineering), Belarusian-Russian University. Phone: +375-297-43-38-72.

Igor Vladislavovich Ilyinykh, MSc student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-336-92-78-86.

Ernest Aleksandrovich Ketner, MSc student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-336-36-99-53.

Marina Aleksandrovna Ziabkina, MSc student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-41-11-63.