

УДК (UDC): 624.131

METHOD OF CALCULATION OF SELF-STRESSED CONCRETE SLABS SUPPORTED ALONG THE CONTOUR

Салиханов С.С.¹
Salixanov S.S.¹

¹ – Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта
(Ташкент, Узбекистан)

¹ – Tashkent Institute of Railway Engineers (Tashkent, Uzbekistan)

Abstract: The paper presents the developed method for calculating the contour-supported slab of self-stressed concrete. Reinforced concrete slab on the tension cement replaces the traditional construction of the bridge. In this article, in order to exclude reinforcement, the problem of determining the stress-strain state of self-stressed concrete slabs supported along the contour is considered. The values of stresses in the upper and lower faces of the concrete slab, as well as the bending moment in the middle section of the slab.

Key words: concrete, self-tension, bridges, web, waterproofing, plate, contour, bending moment, tension, design, construction.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПЕРТЫХ ПО КОНТУРУ ПЛИТ ИЗ САМОНАПРЯЖЕННОГО БЕТОНА

Аннотация: В работе приведена разработанная методика расчета опертой по контуру плиты из самонапряженного бетона. Армированная плита из бетона на напрягающем цементе заменяет традиционную конструкцию мостового полотна. В данной статье, в целях исключения армирования, рассматривается задача определения напряженно-деформированного состояния опертых по контуру плит из самонапряженного бетона. Определены значения напряжений в верхней и нижней гранях бетона плиты, а также изгибающего момента в среднем сечении плиты.

Ключевые слова: бетон, самонапряжение, мосты, полотно, гидроизоляция, плита, контур, изгибающий момент, напряжения, проектирование, конструкция.

Надежность и долговечность железнодорожных и автодорожных мостов в целом во многом зависит от надежности и долговечности отдельно взятых элементов конструкции, в том числе и мостового полотна проезжей части. Мостовое полотно, кроме восприятия давлений от временной нагрузки и передачи их на главные несущие конструкции, также является своеобразной «крышей», предохраняющей нижележащие элементы от воздействия воды и прочих факторов, негативно влияющих на долговечность моста.

Основной функцией традиционной конструкции мостового полотна, состоящей из выравнивающего, гидроизоляционного и защитного слоев, является защита основных несущих элементов пролетного строения. В то же время собственный вес этого «пирога» является вынужденной постоянной нагрузкой, которая действует на главные балки пролетного строения и требует дополнительного расхода арматуры для восприятия усилий, возникающих от этой нагрузки.

Рациональности конструкции мостового полотна можно было бы достичь путем устройства одного десятисантиметрового слоя из самонапряженного бетона, выполняющего функции выравнивающего, гидроизоляционного и защитного слоев.

В работах [1-3] рассматривалась конструкция мостового полотна, состоящая из десятисантиметрового слоя, армированного сеткой из десятимиллиметровых стержней по всей длине и ширине моста. Коэффициент армирования в обоих направлениях равен 0,4%. По сравнению с традиционной конструкцией мостового полотна достигалась ощутимая экономия в металле (в пределах 12-15%), главным образом за счет уменьшения количества рабочей арматуры при учете совместной работы главных балок со слоем мостового полотна.

В целях дальнейшего снижения металлоемкости пролетных строений была предложена новая конструкция мостового полотна «рамный контур – напрягающий бетон» [5] и получено авторское свидетельство [4]. Данная конструкция отличается существенно меньшей металлоемкостью.

Целью устройства новой конструкции мостового полотна, состоящего из одного слоя из самонапряженного бетона и заменяющего при этом три традиционные слоя является водонепроницаемость. В соответствии с «Инструкцией по проектированию самонапряженных железобетонных конструкций СН 511-78», водонепроницаемость плиты из бетона на напрягающем цементе будет обеспечена при величине самонапряжения (с учетом потерь от усадки и ползучести) не менее 0,5 МПа.

В связи с вышеуказанным требованием представляет интерес исследование напряженно-деформированного состояния плиты из самонапряженного бетона при различных граничных условиях и разработка методики их расчета.

В работах [6-7] приведены методики расчета свободно лежащей (т.е. не имеющей сцепления с бетоном главных балок пролетного строения) плиты мостового полотна из армированного самонапряженного бетона и плиты мостового полотна из самонапряженного бетона, совместно работающей с балкой пролетного строения мостов (т.е. имеющей сцепления с бетоном главных балок).

В данной статье, в целях исключения армирования, рассматривается задача определения напряженно-деформированного состояния опертых по контуру плит из самонапряженного бетона.

Рассмотрим квадратную в плане плиту с граничными условиями в виде жестких контуров. Предположим, что контуры плиты являются абсолютно жесткими и по направлениям x и y деформации исключены, т.е. податливость контуров равна нулю (рис 1,а).

При расширении бетона на напрягающем цементе (НЦ) из-за граничных условий в бетоне плиты возникают некоторые величины самонапряжения и по направлению координат (рис.1,б).

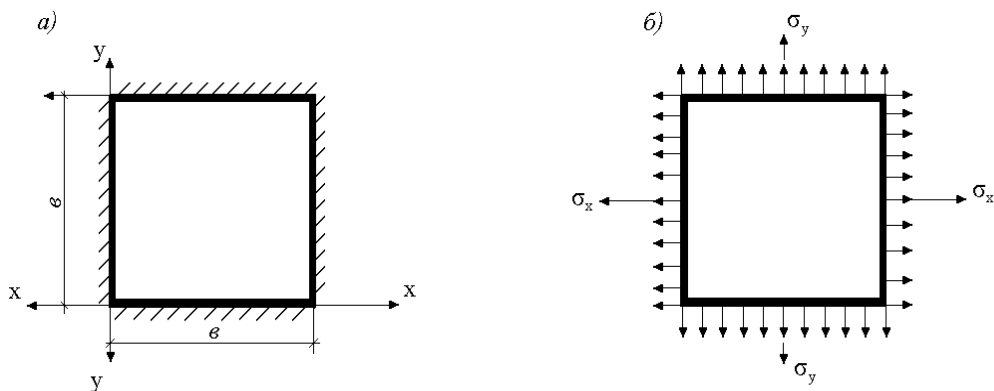


Рисунок 1. Расчетная схема плиты, опертой по контуру

Здесь необходимо отметить, что обязательным условием образования деформаций расширения бетона на НЦ является его смачивание водой через сутки после его бетонирования. Экспериментальными исследованиями было установлено, что при смачивании бетона на НЦ сверху, деформации расширения бетона по высоте плиты является неравномерными и при этом величина деформации верхних слоев бетона больше, чем у

нижних слоев. Вследствие такой неравномерной деформации бетона (следовательно, и напряжений) по толщине давление плиты на контуры будет неравномерным. Из-за неравномерного действия усилий на контуры плиты имеет место случай внецентренного сжатия, вследствие чего в сечениях плиты возникают некоторые величины изгибающих моментов M_x и M_y , которые характеризуют общие деформации плиты.

Необходимо разработать методику расчета опертой по контуру плиты из самоупроченного бетона. При этом следует определить величину напряжений на верхней грани бетона σ_6^e , на нижней грани бетона σ_6^h и величину возникающего изгибающего момента M_x и M_y (рис 2,а,б).

Необходимо отметить, что величины определяемых напряжений и усилий также зависят от толщины плиты из бетона на напрягающем цементе.

Для упрощения расчета рассмотрим свободно лежащую (т.е. не имеющую сцепление с подстилающим слоем) квадратную плиту из напрягающего бетона размерами в плане b и толщиной h (см. рис. 2).

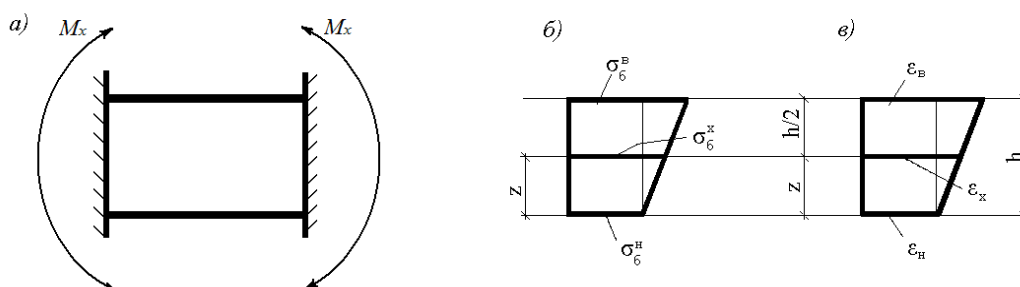


Рисунок 2. Схемы к расчету опертой по контуру плиты из самоупроченного бетона
а) – схема изгибающих моментов; б) – эпюра напряжений; в) – эпюра деформаций

Из эпюры деформаций находим величину относительной деформации на уровне z (см. рис 2,в):

$$\varepsilon_z = \frac{\varepsilon_e - \varepsilon_h}{h} \cdot z;$$

Кривизну плиты из-за разности деформаций ее верхней и нижней граней можно сформулировать следующим выражением:

$$\frac{1}{\rho_z} = \frac{\varepsilon_z}{z};$$

Отсюда находим $\varepsilon_z = \frac{z}{\rho_z}$; Но с другой стороны, при $z = \frac{h}{2}$; величина относительной деформации на уровне равна:

$$\varepsilon_z = \frac{h}{2\rho_z} = \frac{h}{2\rho_z};$$

$$\varepsilon_z = \frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_n}{h} \cdot \frac{h}{2} = \frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_n}{2};$$

Значит:

$$\frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_n}{2} = \frac{h}{2\rho_z};$$

Отсюда находим, что зависимость между кривизной и относительными деформациями верхней и нижней граней плиты будет выглядеть по следующему:

$$\frac{1}{\rho_z} = \frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_n}{h}; \quad (1)$$

Далее выразим относительные деформации расширения на уровне z по осям x и y через соответствующие напряжения и модулей упругости самоупругого бетона:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_6} - \frac{\nu\sigma_y}{E_6}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_6} - \frac{\nu\sigma_x}{E_6}; \quad (3)$$

Здесь ν - коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

По условию непрерывности деформаций, при $\varepsilon_y = 0$ или $\varepsilon_x = 0$ должно быть:

$$\sigma_y = \nu\sigma_x; \quad (4)$$

$$\sigma_x = \nu\sigma_y;$$

(4) подставляем в выражение (2) и (3), получаем:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_6} - \frac{\nu^2\sigma_x}{E_6} = \frac{\sigma_x(1-\nu^2)}{E_6};$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_6} - \frac{\nu^2\sigma_y}{E_6} = \frac{\sigma_y(1-\nu^2)}{E_6};$$

Отсюда

$$\sigma_x = \frac{E_6\varepsilon_x}{1-\nu^2}; \quad (5)$$

$$\sigma_y = \frac{E_6\varepsilon_y}{1-\nu^2};$$

Теперь определяем величину изгибающего момента:

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x \cdot z dz = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{E_b z}{\rho_x (1 - \nu^2)} z dz = \frac{E_\sigma}{\rho_x (1 - \nu^2)} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} z^2 dz =$$

$$= \frac{E_\sigma}{3\rho_x (1 - \nu^2)} \left[\frac{h^3}{8} + \frac{h^3}{8} \right] = \frac{2E_\sigma h^3}{24\rho_x (1 - \nu^2)} = D \left(\frac{1}{\rho_x} \right);$$

Значит

$$M_x = D \left(\frac{1}{\rho_x} \right); \quad (6)$$

Отсюда

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{M_x}{D}; \quad (7)$$

При этом детерминант изгибающего момента выражается следующим отношением:

$$D = \frac{E_\sigma h^3}{12(1 - \nu^2)};$$

Преобразуя (1) и (7) получаем

$$b \frac{\varepsilon_\sigma - \varepsilon_H}{h} = \frac{M_x}{D};$$

Значение изгибающего момента на единицу длины в среднем сечении плиты размером $b \times b$:

$$M_x = \frac{D(\varepsilon_\sigma - \varepsilon_H)}{h} b; \quad (8)$$

Теперь можно определить величины напряжений на верхней и нижней гранях σ_σ^b и σ_σ^H плиты из самонапряженного бетона, для чего составляем уравнения равновесия:

1. Уравнение проекций сил на ось плиты:

$$\int_A \sigma_\sigma^x \cdot dA = 0; \quad (9)$$

2. Уравнение моментов относительно низа плиты:

$$\int_A \sigma_\sigma^x \cdot z dA - M_x = 0; \quad (10)$$

Или

$$\int_A \sigma_\sigma^x \cdot z dA - \frac{D(\varepsilon_\sigma - \varepsilon_H)}{h} = 0; \quad (11)$$

Здесь $dA = b dz$;

Величину напряжения в бетоне по оси x можно выразить:

$$\sigma_{\sigma}^x = \sigma_{\sigma}^H + \frac{\sigma_{\sigma}^{\epsilon} - \sigma_{\sigma}^H}{h} \cdot z = \sigma_{\sigma}^H + \frac{\sigma_{\sigma}^{\epsilon}}{h} - \frac{\sigma_{\sigma}^H \cdot z}{h};$$

Тогда уравнение (9) будет иметь вид:

$$\int_0^h \sigma_{\sigma}^H b dz + \int_0^h \frac{\sigma_{\sigma}^{\epsilon} z}{h} b dz - \int_0^h \frac{\sigma_{\sigma}^H z}{h} b dz = 0;$$

Или:

$$\sigma_{\sigma}^H b dz /_0^h + \frac{\sigma_{\sigma}^{\epsilon} z^2}{2h} b /_0^h - \frac{\sigma_{\sigma}^H z^2}{2h} b /_0^h = 0;$$

Интегрируя по переменной высоте z , получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_{\sigma}^H b h + \frac{\sigma_{\sigma}^{\epsilon} b h^2}{2h} - \frac{\sigma_{\sigma}^H b h^2}{2h} &= 0; \\ 2h^2 b \sigma_{\sigma}^H + \sigma_{\sigma}^{\epsilon} b h^3 - \sigma_{\sigma}^H b h^2 &= 0; \end{aligned}$$

Отсюда:

После преобразований уравнение (9) примет вид:

$$3bh^2 \sigma_{\sigma}^H + \sigma_{\sigma}^{\epsilon} bh^2 = 0;$$

Отсюда:

$$\sigma_{\sigma}^{\epsilon} = 3\sigma_{\sigma}^H; \quad (12)$$

$$\sigma_{\sigma}^H = \frac{\sigma_{\sigma}^{\epsilon}}{3};$$

Уравнение (10) после подстановки значений (12), и последующих преобразований будет иметь вид:

$$h^2 [72b \sigma_{\sigma}^H (1 - \nu^2) - E_{\sigma} (\epsilon_{\epsilon} - \epsilon_H)] = 0;$$

Отсюда определяем величины напряжений в верхней и нижней гранях опертой по контуру плиты из бетона на напрягающем цементе:

$$\begin{aligned} \sigma_{\sigma}^{\epsilon} &= \frac{E_{\sigma} (\epsilon_{\epsilon} - \epsilon_H) h^2}{24b(1 - \nu^2)}; \\ \sigma_{\sigma}^H &= \frac{E_{\sigma} (\epsilon_{\epsilon} - \epsilon_H) h^2}{72b(1 - \nu^2)}; \end{aligned}$$

Вывод. Из вышеизложенного можно заключить, что разработанная методика расчета опертых по контуру плит из бетона на напрягающем цементе может быть применена для расчета конструкции мостового полотна типа «рамный контур-напрягающий бетон» при отсутствии армирования.

Литература

1. Салиханов С.С. Экспериментальное исследование совместной работы слоя самоупроченного бетона с главной балкой пролетного строения мостов. // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» 6-7 декабря 2014 года. ТашИИТ, г. Ташкент, 2014. С. 94-95.

2. Салиханов С.С. Безбалластное мостовое полотно железнодорожных мостов с использованием самоупроченного бетона. // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» 6-7 декабря 2013 года. ТашИИТ, г. Ташкент, 2013. С. 97-98.

3. Салиханов С.С. Ремонт мостового полотна с применением самонапряженного бетона. // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» 6-7 декабря 2013 года. ТашИИТ, г. Ташкент, 2013. С. 104-106.

4. Салиханов С.С., Лившиц Я.Д., Штильман Е.И. Мостовое полотно проезжей части и способ его возведения. Авторское свидетельство № 804755. 1981. Бюллетень изобретений, № 6.

5. Салиханов С.С. Расчет самонапряженности конструкции мостового полотна «рамный контур-самонапряженный бетон». Вестник ТашИИТ №1, Ташкент, 2016. С. 16-18.

6. Салиханов С.С. Методика расчета свободно лежащей плиты мостового полотна из армированного самонапряженного бетона. Вестник ТашИИТ №4, Ташкент, 2016. С. 22-25.

7. Салиханов С.С. Методика расчета плиты мостового полотна из самонапряженного бетона, совместно работающего с балкой пролетного строения мостов. Вестник ТашИИТ №1, Ташкент, 2017. С. 95-98.

References

1. Salikhanov S. S. Experimental study of the joint work of a layer of self-stressed concrete with the main beam of the span structure of bridges. // Scientific works of the Republican scientific and technical conference with the participation of foreign scientists "resource-Saving technologies in railway transport" 6-7 December 2014. Tashkent railway transport engineering Institute, Tashkent, 2014. Pp. 94-95.

2. Salikhanov S. S. Ballastless bridge deck railway bridges with the use of self-stressed concrete. // Scientific works of the Republican scientific and technical conference with the participation of foreign scientists "resource-Saving technologies in railway transport" 6-7 December 2013. Tashkent railway transport engineering Institute, Tashkent, 2013. Pp. 97-98.

3. Salikhanov S. S. Repair of the bridge with the use of self-stressed concrete. // Scientific works of the Republican scientific and technical conference with the participation of foreign scientists "resource-Saving technologies in railway transport" 6-7 December 2013. Tashkent railway transport engineering Institute, Tashkent, 2013. Pp. 104-106.

4. Salikhanov S. S., Livshits Ya. D., Shtilman E. I. Bridge roadway and the method of its construction. Author's certificate No. 804755. 1981. Bulletin of inventions, No. 6.

5. Salikhanov S. S. Calculation of self-tension of bridge structure "frame contour-self-stressed concrete". Bulletin of The Tashkent Railway Transport Engineering Institute No. 1, Tashkent, 2016. Pp. 16-18.

6. Salikhanov S. S. Method of calculation of the free - lying slab of the bridge web of reinforced self-stressed concrete. Bulletin of The Tashkent Railway Transport Engineering Institute No. 4, Tashkent, 2016. Pp. 22-25.

7. Salikhanov S. S. Method of calculation of the plate of the bridge web of self-stressed concrete, working together with the beam of the span structure of bridges. Bulletin of The Tashkent Railway Transport Engineering Institute No. 1, Tashkent, 2017. Pp. 95-98.

Сведения об авторах / Information about the authors

Салиханов Саидхан Салиханович – кандидат технических наук, доцент, и.о. профессора кафедры «Мосты и тоннели» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта, Телефон: +998-90 -975-90-00, e-mail: sssalihanov@mail.ru

Salixanov Saidxon Salihanovich – Candidate of technical sciences, professor, «Bridges and tunnels», Tashkent Institute of railway engineers, Telephone: +998-90 -975-90-00, e-mail: sssalihanov@mail.ru