

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.21.01/09

М. М. ПОПОВИЧ¹, Д. Ю. ІГНАТЕНКО^{2*}

¹ Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (096) 649 32 92

^{2*} Каф. «Мости», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (067) 181 02 11, ел. пошта dola1992@i.ua

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКОВИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ З ЇЗДОЮ ПОВЕРХУ МЕТОДОМ КЛАСИФІКАЦІЇ

Мета. Порівняння класів рухомого складу з класами елементів прогонових будов дозволяє судити про можливість та умови пропуску його по мостах. **Методика.** Для головних балок прогонової будови визначають максимальну інтенсивність тимчасового вертикального рівномірно розподіленого навантаження, яка не викликає наступ граничного стану при нормальній експлуатації моста. Розраховану таким чином інтенсивність надалі для стислості називають допустимим тимчасовим навантаженням. **Результати.** За виведеними формулами були отримані класи головних балок проїзної частини Дарницького залізничного моста. **Наукова новизна.** Виведено формули для визначення класів головних балок проїзної частини ароків залізобетонних прогонових будов з їздою поверху і визначені способи навантажування багатозначних ліній впливу у разі різних варіантів розрахунку. Порівняння отриманих класів дозволяє оцінити точність і похибку у визначенні за різними розрахунковими схемами. **Практична значимість.** За цією методикою були визначені класи головних балок проїзної частини Дарницького моста, як приклад.

Ключові слова: вантажопідйомність; класифікація; залізобетонні мости; проїзна частина; головна балка

Вступ

Всі мости залізничної мережі класифікують за вантажопідйомністю з метою визначення умов пропуску по ним різних поїзних навантажень та вирішення питань про підсилення, ремонт або заміну прогонових споруд. Методика визначення вантажопідйомності залізобетонних аркових прогонових будов з їздою поверху включає в себе перелік інженерних розрахунків, які враховують фактичний фізичний стан споруди.

Мета

Метою дослідження є отримання та порівняння результатів розрахунку вантажопідйомності аркових залізобетонних мостів з їздою по верху за розробленою методикою з результатами розрахунку елементів за методом, який не враховує сумісну роботу проїзної частини, стійок та арки як системи. Визначення несучої

спроможності окремих елементів споруди дозволяє оцінити можливість та умови пропуску тимчасового навантаження і виявити необхідність підсилення конструкції моста.

Методика

Методика розрахунку вантажопідйомності передбачає побудову розрахункової просторової стержневої скінчено-елементної моделі моста (рис. 1) у програмному комплексі, який дозволяє змодельовати рухоме тимчасове вертикальне навантаження на конструкцію моста у вигляді одиничної сили та отримати необхідні лінії впливу зусиль в усіх елементах.

Методика визначає способи та варіанти завантаження знакозмінних ліній впливу на основі проведеного аналізу результатів дослідження. Всі розрахунки вантажопідйомності зводяться до визначення максимального тимчасового навантаження – несучої здатності прогонової будови.

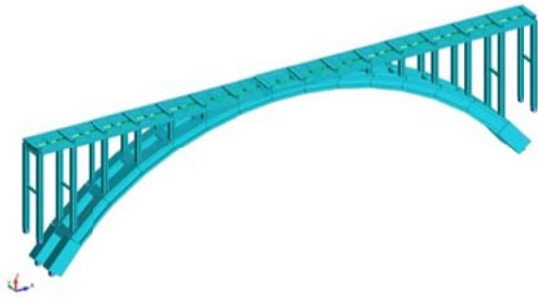


Рис. 1. Розрахункова модель аркової прогонової будови Дарницького моста

Класифікація проїзної частини

Для визначення несучої здатності перерізів головних балок проїзної частини і плити баластового корита прогонової будови необхідно провести розрахунок найбільш небезпечних перерізів на міцність за згинальним моментом, поперечною силою, а також на витривалість (рис. 2).

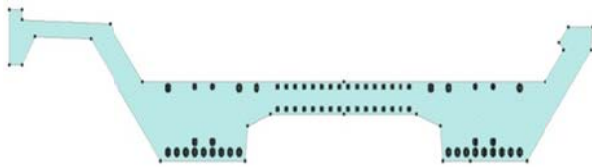


Рис. 2. Поперечний переріз проїзної частини – плитна прогонова будова у вигляді баластного корита

Класифікація головних балок

Спочатку визначається переріз головної балки і приводиться до таврового (рис. 3).

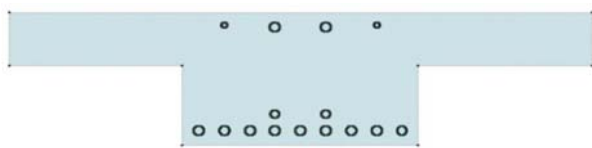


Рис. 3. Приведений тавровий переріз головної балки проїзної частини

Далі визначається висота стиснутої зони бетону

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b} = \frac{19 \cdot 64,47}{1,2 \cdot 65} = 15,71 \text{ см,}$$

де R_s – розрахунковий опір розтягнутої арматури; A_s – площа поперечного перерізу розтягнутої арматури; R_b – розрахунковий опір бетону на стиск; b – ширина стінки головної балки.

Розрахунок головної балки за згинальним моментом (за нерозрізною схемою)

Клас головної балки за нерозрізною схемою на міцність за несучою здатністю визначається із наступної формули

$$\varepsilon_k K_n k_n (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_1} - \varepsilon_k k_{nn} (1 + \mu) \Omega_{\kappa_2} + \varepsilon_k k_n (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_3} + \varepsilon_p p \Omega_p = R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right),$$

де K_n – клас поїзного навантаження; $k_{nn} = 14$ кН/м – навантаження від порожнього рухомого складу.

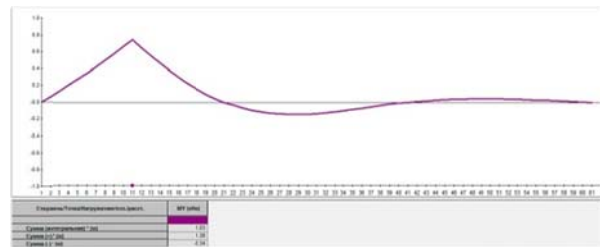


Рис. 4. Лінія впливу згинального моменту в головній балці за нерозрізною схемою ($l = 3 \times 3,71$)

Площа лінії впливу для навантаження від власної ваги

$$\Omega_p = \Omega_{\kappa_1} - \Omega_{\kappa_2} + \Omega_{\kappa_3}.$$

Якщо прийняти $K_n = K$, тобто клас елемента, що розраховується

$$\begin{aligned} k_n \varepsilon_k K_n (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_1} - k_n \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_2} &= \\ = R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + k_{nn} \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_2} - \varepsilon_p p \Omega_p & \end{aligned}$$

Отримаємо клас головної балки з розрахунку на міцність

$$K = \left(R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + k_{nn} \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_2} - \varepsilon_p p \Omega_p + k_n \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_3} \right) / k_n \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{\kappa_1}$$

де k_n – еквівалентне тимчасове вертикальне навантаження Н1 (за схемою поїзда 1931 р.) при $\lambda = \lambda_1$, $\alpha = \alpha_1$; $1 + \mu$ – динамічний коефіцієнт до тимчасового навантаження при $\lambda = \lambda_1$, $\alpha = \alpha_1$.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$K = \left(12000 \cdot 0,65 \cdot 0,1571 \cdot \left(0,345 - \frac{0,1571}{2} \right) + \right. \\ \left. + 14 \cdot 0,51,6411,15 \cdot 0,34 - \right. \\ \left. - 1 \cdot 2,441,03 + 24,7 \cdot 0,51,6411,15 \cdot 0,11 \right) / \\ / 24,7 \cdot 0,51,6411,15 \cdot 1,26 = 11,27$$

Розрахунок головної балки за згинальним моментом (за схемою, яка складається з арки, стійок та проїзної частини)

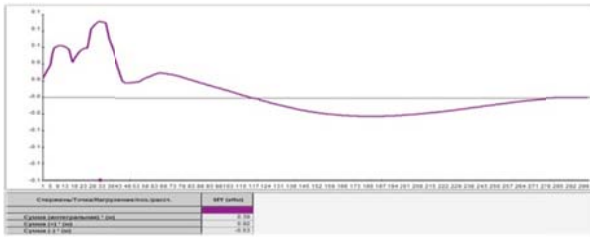


Рис. 5. Лінія впливу згинального моменту за сумісною схемою арка-стійка-балка (найбільше значення площі лінії впливу на опори зі стійкою P-1)

Клас головної балки з розрахунку на міцність

$$K = \frac{R_b b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) - \varepsilon_p p \Omega_p + k_n \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{k_2}}{k_n \varepsilon_k (1 + \mu) n_k \Omega_{k_1}}$$

$$K = \left(12000 \cdot 0,65 \cdot 0,1571 \cdot \left(0,345 - \frac{0,1571}{2} \right) - \right. \\ \left. - 1 \cdot 2,44 \cdot 0,39 + 16,9 \cdot 0,51,6411,15 \cdot 0,53 \right) / \\ / 18,4 \cdot 0,51,6411,15 \cdot 0,92 = 19,99$$

В результаті порівняння класів тимчасового вертикального навантаження за розрізною і нерозрізною схемами із загальною розрахунковою схемою для визначення класу отримуємо у відсотках

$$\frac{19,99 - 11,27}{19,99} \cdot 100\% = 43,6$$

$$\frac{19,99 - 5,38}{19,99} \cdot 100\% = 73,1\%$$

Визначення класу головної балки за розрахунком на витривалість

Умова міцності за бетоном

$$\frac{M^e}{I_{red}} x' = m_{b_1} R_b$$

Згинальний момент в головній балці з розрахунку на витривалість

$$M^e = k_n \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_1} - k_{nn} \varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_2} + \\ + \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_3} + \varepsilon_p p \Omega_p$$

З умови міцності маємо:

$$M^e = \frac{m_{b_1} R_b I_{red}}{x'}$$

Умова міцності перерізу

$$k_n \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_1} - k_{nn} \varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_2} + \\ + \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_3} + \varepsilon_p p \Omega_p = \frac{m_{b_1} R_b I_{red}}{x'} \\ K_n = K$$

Клас головної балки з розрахунку на витривалість

$$K = \left(m_{b_1} R_b I_{red} \right) / \\ / x' \left(\varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \left(k_n \Omega_{k_1} + \Omega_{k_3} \right) - \right. \\ \left. - k_{nn} \varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_2} + \varepsilon_p p \Omega_p \right)$$

Коефіцієнт умов роботи бетону, що враховує вплив багаторазового повторюваного навантаження

$$m_{b_1} = 0,6 \beta_b \varepsilon_b$$

$$\sigma_{b_1} = \frac{M}{I_{red}} \cdot x = \frac{32650,25}{517222} \cdot 15,71 = 0,99 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{b_2} = \frac{M_p}{I_{red}} \cdot x = \frac{465}{517222} \cdot 15,71 = 0,014 \text{ кН/см}^2$$

Коефіцієнт відношення мінімального напруження до максимального

$$p_b = \frac{\sigma_{b,min}}{\sigma_{b,max}} = \frac{0,014}{0,99} = 0,014$$

Коефіцієнт, який залежить від асиметрії циклу повторюваних напружень

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

$$\varepsilon_b = 1,0$$

Коефіцієнт, що враховує збільшення міцності бетону в часі

$$\beta_b = 1,31$$

$$m_{b_1} = 0,6 \cdot 1,31 \cdot 1,0 = 0,786$$

Висота стиснутої зони бетону

$$x' = -\frac{n'(A_s + A'_s)}{b} + \sqrt{\left(\frac{n'(A_s + A'_s)}{b}\right)^2 + \frac{2n'(A_s h_0 + A'_s a'_s)}{b}}$$

де n' – коефіцієнт – умовне відношення модулів пружності арматури та бетону

$$x' = -\frac{25(64,47 + 16,34)}{65} + \sqrt{\left(\frac{25(64,47 + 16,34)}{65}\right)^2 + \frac{2 \cdot 25(64,47 \cdot 34,5 + 16,34 \cdot 3)}{65}} = 21$$

$$K = (0,786 \cdot 12000 \cdot 0,00517222) /$$

$$\left[0,21 \left(0,685 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,641 \right) 0,5(18,4 \cdot 1,26 + 0,11) - 14 \cdot 0,685 \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,641 \right) 0,5 \cdot 0,34 + 1 \cdot 2,44 \cdot 0,39 \right) \right] = 23,21$$

Умова міцності за арматурою:

$$n' \frac{M}{I_{red}} (h - x' - a_u) \leq m_{as1} R_s$$

Звідси маємо

$$M = \frac{m_{as1} R_s I_{red}}{n' (h - x' - a_u)}$$

де n' – коефіцієнт – умовне відношення модулів пружності арматури та бетону; m_{as1} – коефіцієнт, що враховує асиметрію циклу напружень у бетоні й у не напруженій арматурі; a_u – відстань від зовнішньої розтягнутої грані до осі найближчого ряду арматури.

$$m_{as1} = \varepsilon_{ps} \beta_{pw}$$

$$\sigma = \frac{M}{I_{red}} \cdot x$$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I_{red}} \cdot x = \frac{32650,25}{517222} \cdot 15,71 = 0,99 \text{ кН/см}^2$$

$$\sigma_{min} = \frac{M_p}{I_{red}} \cdot x = \frac{465}{517222} \cdot 15,71 = 0,014 \text{ кН/см}^2$$

$$p = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{0,014}{0,99} = 0,014$$

$$\varepsilon_{ps} = 0,81 \quad \beta_{pw} = 0,75$$

$$m_{as1} = 0,81 \cdot 0,75 = 0,608$$

Згинальний момент з розрахунку на витривалість

$$M^e = k_n \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_1} - k_{nn} \varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_2} + \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_3} + \varepsilon_p p \Omega_p$$

$$k_n \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_1} - k_{nn} \varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_2} + \varepsilon_k K_n \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_3} + \varepsilon_p p \Omega_p = \frac{m_{as1} R_s I_{red}}{n' (h - x' - a_u)}$$

Клас головної балки з розрахунку на витривалість

$$K = m_{as1} R_s I_{red} / n' (h - x' - a_u) \times \left(\varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon (k_n \Omega_{k_1} + \Omega_{k_3}) - k_{nn} \varepsilon_k \left(1 + \frac{2}{3} \mu \right) \varepsilon \Omega_{k_2} + \varepsilon_p p \Omega_p \right)$$

$$K = 12,86$$

Висновки

Для отримання точних результатів розрахунку вантажопідйомності та визначення класів головних балок проїзної частини необхідно правильно побудувати розрахункову модель, яка б відповідала конструкції моста у дійсності, а також враховувала умови взаємного розташування елементів та в'язей. Неврахування взаємного впливу роботи арки з проїзною частиною досить сильно спотворює результати розрахунку, тому при визначенні вантажопідйомності це необхідно враховувати розрахунком загальної системи. Методика розрахунку дозволяє провести класифікацію головних балок проїзної частини аркових залізобетонних прогонових будов з їздою поверху аналітично, а також визначити

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

фактичні класи для визначення умов пропуску рухомого складу.

СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. Руководство по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов [Текст] – МПС. Москва : Транспорт, 1989. – 125 с.
2. Руководство по определению грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов [Текст]. – МПС. Москва : Транспорт, 1987. – 272 с.
3. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування [Текст]. – Чинні від 2007-02-01. – Київ : Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
4. Поливанов, Н. И. Проектирование и расчет железобетонных и металлических автодорожных мостов [Текст] Учебн. пособие / Н. И. Поливанов. – Москва : Транспорт, 1970. – 516 с.
5. Кириллов, В. С. Строительство мостов и труб. (Справочник инженера) [Текст] / В. С. Кириллов. – Москва : Транспорт, 1975. – 600 с.

Н. Н. ПОПОВИЧ¹, Д. Ю. ИГНАТЕНКО^{2*}

¹ Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел. +38 (096) 649 32 92

^{2*} Каф. «Мосты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел. +38 (067) 181 02 11, эл. почта dola1992@i.ua

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ С ЕЗДОЙ ПОВЕРХУ МЕТОДОМ КЛАССИФИКАЦИИ

Цель. Сравнение классов подвижного состава с классами элементов пролетных строений позволяет судить о возможности и условиях пропуска его по мостам. **Методика.** Для главных балок пролетного строения определяют максимальную интенсивность временной вертикальной равномерно распределенной нагрузки, которая не вызывает наступление предельного состояния при нормальной эксплуатации моста. Рассчитанную таким образом интенсивность в дальнейшем для краткости называют допустимой временной нагрузкой. **Результаты.** По выведенным формулам были получены классы главных балок проезжей части Дарницкого железнодорожного моста. **Научная новизна.** Выведены формулы для определения классов главных балок проезжей части арочных железобетонных пролетных строений с ездой поверху и определены способы загрузки многозначных линий влияния в случае различных вариантов расчета. Сравнение полученных классов позволяет оценить точность и погрешность в определении по разным расчетным схемам. **Практическая значимость.** По этой методике были определены классы главных балок проезжей части Дарницкого моста, как пример.

Ключевые слова: грузоподъемность; классификация; железобетонные мосты; проезжая часть; главная балка

N. N. POPOVICH¹, D. YU. IGNATENKO^{2*}

¹ Dept. of Bridges, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 649 32 92

^{2*} Dept. of Bridges, Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryana Str., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 181 02 11, e-mail dola1992@i.ua

THE TECHNIQUE OF CALCULATION AND DETERMINATION OF THE CARRYING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE ARCHED CONSTRUCTIONS WITH RIDING SURFACE ACCORDING TO THE CLASSIFICATION METHOD

Purpose. Comparing Classes rolling elements with classes superstructures gives an indication of the possibilities and conditions of his passes over the bridge. **Methodology.** For the main beams span determine the maximum inten-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

sity of temporary vertical uniformly distributed load that does not cause a limiting condition during normal operation of the bridge. Thus calculated intensity for brevity called allowable time - viscous heating. **Findings.** The formulas were derived classes of the main beams carriageway Darnytsia railway bridge. **Originality.** The formulas for determining the classes of the main beams of the roadway arch concrete superstructures with riding on top and defined ways of loading multivalued lines of influence in the case of different variants of calculation . Comparison of the class to evaluate the accuracy and error in determining for various design schemes. **Practical value.** By this procedure the major classes were defined by the beams of the bridge roadway Darnytsia as an example.

Keywords: load; classification; reinforced concrete bridges; roadway; the main beam

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. С. Распоповим (Україна), д.т.н., проф. Лантухом-Лященко (Україна).

Надійшла до редколегії 20.06.2014.

Прийнята до друку 02.07.2014.