

УДК 624.21

Стоянович С. В., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1363-7356>Полюга Р. І., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-3729-0577>

Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури (НАОМА), м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗБІРНО-МОНОЛІТНИХ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ МОСТІВ НА ДІЮ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація

Вступ. На сьогоднішній день залізобетонні збірно-монолітні прогонові будови набули значної популярності під час будівництва нових та реконструюванні існуючих мостів та шляхопроводів в Україні. Особливо це помітно в останні 10-15 років, коли почали застосовуватися покращені матеріали та нові ефективні конструктивні рішення під час спорудження мостів.

Щоб досягнути більшої ефективності таких конструкцій, покращення їх техніко-економічних показників важливо мати більше інформації про їх роботу, напружено-деформований стан. Ці дані можна отримати під час обстеження конструкцій, випробовування їх навантаженням та порівняння з аналітичними дослідженнями.

Мета. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних збірно-монолітних прогонових будов споруди: аналіз прогинів, аналіз просторової роботи споруди під дією статичного навантаження.

Матеріали і методи. При написанні статті використані матеріали випробувань збірно-монолітних прогонових будов споруди через річку Ірпінь на км 21+140 автомобільної дороги загального користування державного значення Р-30 Під'їзд до м. Ірпінь в Київській області.

Використані наступні методи досліджень: аналізування інформації, математичне моделювання, натурні та теоретичні дослідження.

Результати. У результаті проведених досліджень були встановлені експериментальні та аналітичні величини прогинів елементів прогонових будов споруди, виконано їх порівняння та визначені конструктивні коефіцієнти. Визначені експериментальні та теоретичні коефіцієнти поперечного розподілу навантажень прогонових будов та встановлено характер просторової роботи споруди.

Висновки. Результати аналітичних та експериментальних досліджень конструкцій збірно-монолітних прогонових будов мостів засвідчили їх хорошу просторову жорсткість, рівномірний розподіл навантажень на балки в поперечному напрямку споруди. Виміряні експериментально та аналітичні величини прогинів не перевищують гранично допустимих значень. Під час завантаження прогонових будов статичним навантаженням не було виявлено відхилень в їх роботі.

За результатами випробувань споруда може використовуватися для пропуску транспорту та відповідає вимогам діючих норм по навантаженню за схемами А-15, НК 100.

Ключові слова: залізобетонна збірно-монолітна прогонова будова, міст, напружено-деформований стан, прогини, статичні навантаження.

Вступ

На сьогоднішній день залізобетонні збірно-монолітні прогонові будови набули значної популярності під час будівництва нових та реконструюванні існуючих мостів та шляхопроводів в Україні. Особливо це помітно в останні 10–15 років, коли почали застосовуватися покращені матеріали та нові ефективні конструктивні рішення під час спорудження мостів.

Залізобетонні збірно-монолітні прогонові будови поєднали в собі переваги збірних та монолітних конструкцій, а саме: швидкість монтажу — відсутність необхідності у повноцінній опалубці значно прискорює процес будівництва порівняно зі звичайним монолітом; можливість монтажу над проїздами та водними перешкодами без застосування додаткових риштувань як при влаштуванні звичайних монолітних прогонових будов; жорсткість та стійкість конструкцій до навантажень майже не поступається монолітним спорудам та значно перевищує звичайні збірні залізобетонні прогонові будови.

У роботі [1] авторами проаналізовано технічний стан найпоширеніших типів прогонових будов мостів, описані їх основні переваги та недоліки, а також наведені перспективні напрямки вдосконалення конструкцій збірно-монолітних прогонових будов. Нові ефективні конструктивні рішення залізобетонних збірних попередньо-напружених балок для збірно-монолітного варіанту прогонових будов, їх особливості та переваги, а також дослідження їх напружено-деформованого стану при дії одноразового навантаження та високих рівнів повторного навантаження представлено в статтях [2–4].

Особливістю збірно-монолітних конструкцій прогонових будов є необхідність враховувати стадійність роботи під час їх влаштування, а також враховувати це під час їх проектування [5, 6].

Щоб досягнути більшої ефективності залізобетонних збірно-монолітних конструкцій споруд, покращення їх техніко-економічних показників важливо мати більше інформації про їх роботу, напружено-деформований стан. Ці дані можна отримати під час обстеження конструкцій, випробування їх навантаженням та порівняння з аналітичними дослідженнями.

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних збірно-монолітних прогонових будов споруди: аналіз прогинів, аналіз просторової роботи споруди під дією статичного навантаження.

Основна частина

Об'єктом досліджень були збірно-монолітні прогонові будови споруди через річку Ірпінь на км 21+140 автомобільної дороги загального користування державного значення Р-30 Під'їзд до м. Ірпінь в Київській області.

Споруда складається з двох ідентичних мостів під правий та лівий проїзди. Мости влаштовані з 4-х прогонів, поздовжня схема — $24,0 + 2 \times 33,0 + 24,0$ м. Габарити мостів — $1,8 + 9,0$ м.

Прогонові будови мостів влаштовані з 8-ми збірних залізобетонних попередньо напружених бездіафрагмових балок І-подібного поперечного перерізу типу EFE об'єднаних між собою монолітною залізобетонною плитою. Поперечна схема прогонових будов — $7 \times 1,6$ м. Монолітна плита проїзної частини влаштована по збірній незнімній залізобетонній опалубці. Статична схема прогонових будов — розрізна. У поздовжньому напрямку прогонові будови в осях 0–2 та 2–4 об'єднані плитою в температурно-нерозрізні схеми, над опорою 2 влаштовано деформаційний шов.

Армування балок прогонових будов виконано попередньо напруженими канатами типу К-7, плити проїзної частини — арматурою класу А400С. Клас бетону балок за проектом — В40, клас бетону плити — В35. Висота балок у прогонах 0–1 та 3–4 становить 1,1 м та довжина 24 м, у прогонах 1–2 та 3–4 — висота 1,5 м та довжина 33 м.

Розрахункові навантаження на прогонові будови: А-15, НК 100.

Загальний вигляд споруди та прогонових будов наведено на **рис. 1**.

Випробування споруди включало встановлення параметрів просторової роботи та напружено-деформованого стану елементів прогонових будов за допомогою вимірювання абсолютних деформацій (прогинів) споруди під дією статичного навантаження з подальшим порівняльним аналізом розрахункової моделі і натурних даних.

В якості випробувального навантаження було обрано чотири вантажні автомобілі марки MAN масою від 35,84 т до 36,38 т. Максимальне значення навантаження становило 144,18 т при установці чотирьох автомобілів у межах прогонів.



а)



б)

- а) споруд ліворуч;
- б) прогонова будова.

Рисунок 1 — Загальні вигляди

Прогонові будови споруди завантажувалися випробувальним навантаженням (вантажними автомобілями) відповідно до розроблених схем. У поперечному напрямку автомобілі розташовували максимально наближено до країв проїзної частини, у поздовжньому напрямку — максимально навантажуючи середину випробуваного прогону. Було реалізовано по чотири схеми по кожному мосту споруди — виміри знімали після заїзду всіх автомобілів. Окремі схеми були поділені на підсхеми, при яких вимірювання проводили після заїзду кожного автомобіля.

За допомогою механічних прогиномірів та лазерного нівеліру фіксували вертикальні переміщення (прогини) балок прогонових будов споруди. У прогонах 2–3 правого мосту та 3–4 лівого мосту споруди переміщення фіксували за допомогою прогиномірів встановлених посередині прогону балок прогонових будов та за допомогою нівеліру — рейку встановлювали посередині прогонів по краях проїзної частини, в прогонах 0–1, 1–2, 2–3 вимірювання проводили тільки за допомогою нівеліру зі встановленням рейки посередині прогонів по краях проїзної частини. Схеми розміщення приладів під час проведення випробувань конструкцій споруди подані на **рис. 2**.

На **рис. 3** наведено приклади з процесу проведення випробування конструкцій споруди.

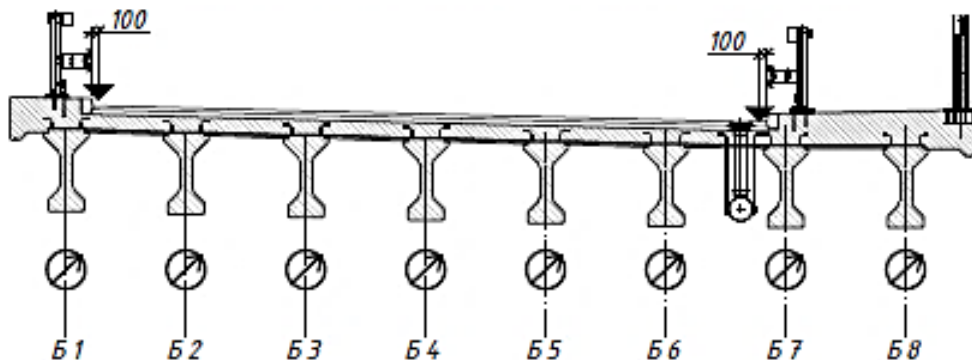


Рисунок 2 — Схема розміщення приладів (прогиномірів та точки встановлення нівелірної рейки) посередині прогонів



а)



б)

- а) завантаження прогону 1–2 лівого мосту;
 б) завантаження прогону 2–3 лівого мосту.

Рисунок 3 — Розміщення випробувального навантаження

Відповідно до програми випробувань оцінювалася інтенсивність випробувального навантаження по відношенню до нормативного А-15, НК-100 (табл. 1).

Таблиця 1

Значення інтенсивності випробувального навантаження по відношенню до проектного нормативного

№ Схеми	Прогін	M_{exp} , тм	M_{A-15} , тм	$M_{НК-100}$, тм	Інтенсивність випробувального навантаження в %	
					А-15	НК-100
1, 8	0-1	58,57	95,16	87,47	61,55	66,97
2, 7	1-2	82,73	152,67	123,91	54,19	66,76
3, 6	2-3	82,73	152,67	123,91	54,19	66,76
4, 5	3-4	58,57	95,16	87,47	61,55	66,97

Для порівняння отриманих експериментальних даних з розрахунковими, перевірки просторової роботи конструкцій та вантажопідйомності, встановлення рівня завантаження прогонових будов споруди була реалізована скінченно-елементна модель конструкцій в програмному комплексі ПК SCAD Office (рис. 4). Геометричні розміри та перерізи основних елементів конструкцій споруди прийняті в розрахунковій схемі згідно результатів натурних вимірювань. Виконані розрахунки на аналітичні аналоги випробувальних схем та отримані розрахункові значення переміщень елементів прогонових будов від навантажень за різними схемами (рис. 5).

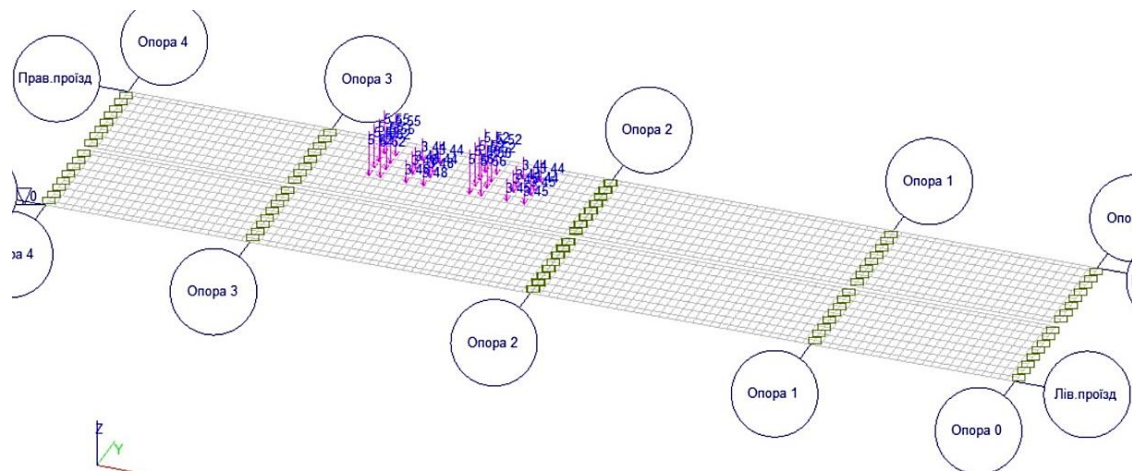


Рисунок 4 — Скінченно-елементна модель на прикладі аналітичного аналогу випробувальної схеми прогонової будови в осях 2–3 правого мосту

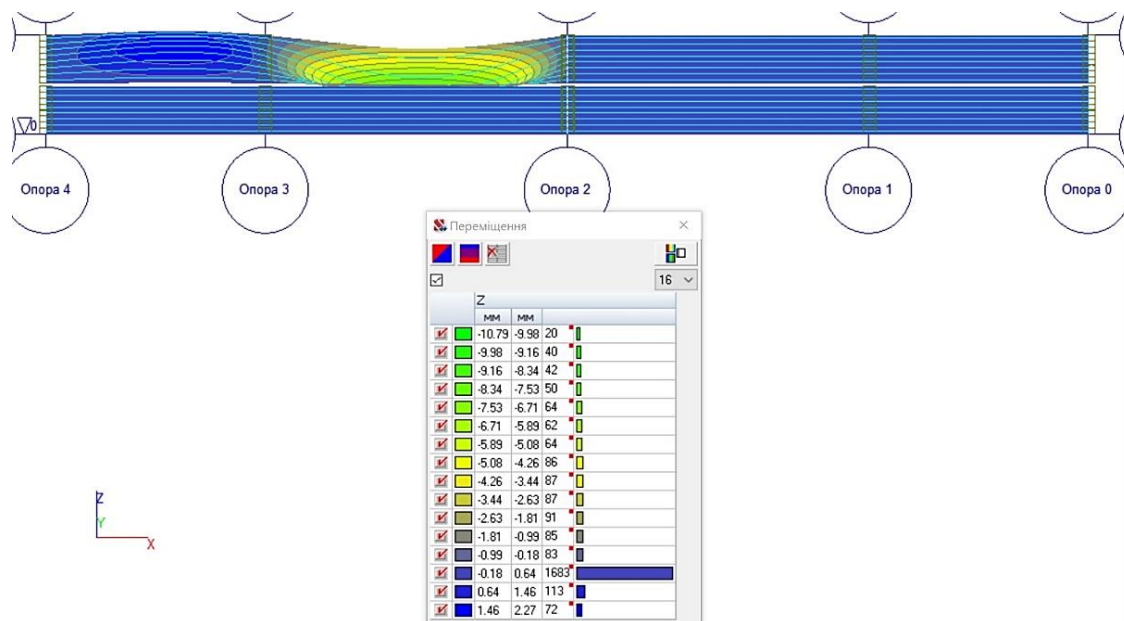


Рисунок 5 — Ізополя переміщень прогонових будов на прикладі випробувальної схеми прогонової будови в осях 2–3 правого мосту

У результаті аналітичних розрахунків та експериментальних досліджень виконали порівняння отриманих значень прогинів балок та визначили конструктивні коефіцієнти наведені в **табл. 2**, **рис. 6** і **рис. 7**.

Значення конструктивного коефіцієнта k , що визначається як відношення значення вимірюваного прогину f_{exp} до значення аналітичного f_{calc} ($k = f_{exp} / f_{calc}$), знаходиться в межах від 0,74 до 0,89 при максимальних значеннях прогинів. Для залізобетонних конструкцій, на основі численних випробувань, відомо, що значення конструктивного коефіцієнта може бути в межах від 0,7 до 1,0. При невеликих прогинах значення коефіцієнта k перевищує 1,0, що може пояснюватися неможливістю врахування в розрахунковій схемі усіх особливостей роботи конструкції споруди, а також точністю вимірювальних приладів.

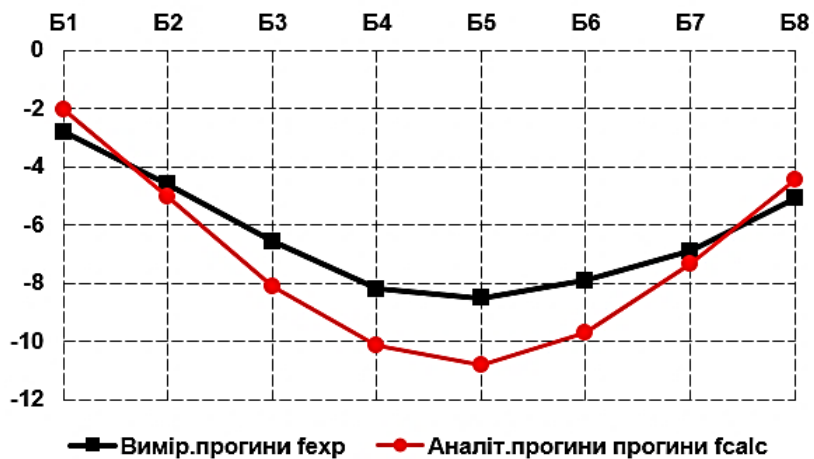
БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

У табл. 3 наведені максимальні значення експериментальних прогинів, на прикладі прогонів 2–3 правого мосту та 3–4 лівого, приведені до нормативного значення. Звідки видно, що ці значення значно менші допустимих $1/400 l_p$.

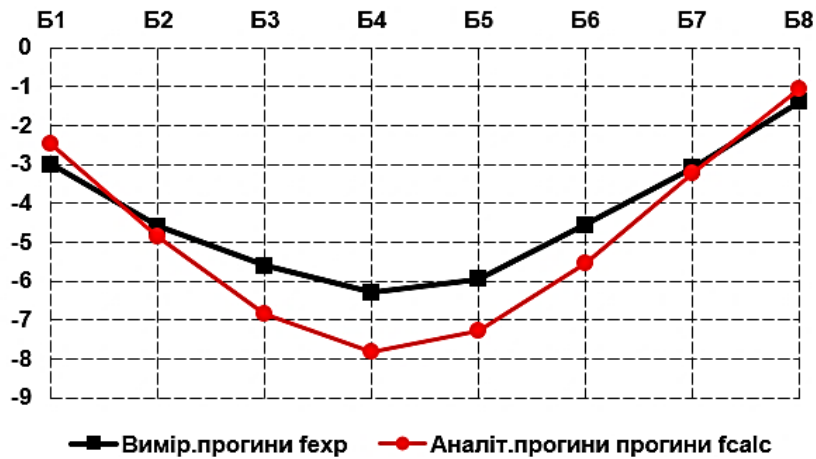
Таблиця 2

Величини виміряних максимальних прогинів f_{exp} , максимальних аналітичних прогинів f_{calc} та конструктивних коефіцієнтів k балок прогонових будов в осях 2-3 правого та 3-4 лівого мостів

Схема (Підсхема)	Прогін	Показники	Показники прогинів балок							
			Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7	Б8
<i>Лівий міст</i>										
5 (5.1)	3-4	f_{exp} , мм	-1,4	-1,7	-1,95	-1,8	-1,28	-0,72	-0,4	-0,1
		f_{calc} , мм	-1,26	-1,99	-2,43	-2,14	-1,37	-0,69	-0,22	0,12
		k	1,11	0,85	0,80	0,84	0,93	1,04	1,82	-0,83
5 (5.2)	3-4	f_{exp} , мм	-1,7	-2,5	-3,12	-3,5	-3,27	-2,5	-1,7	-0,9
		f_{calc} , мм	-1,25	-2,46	-3,53	-4,03	-3,76	-2,85	-1,63	-0,51
		k	1,36	1,02	0,88	0,87	0,87	0,88	1,04	1,76
5 (5.3)	3-4	f_{exp} , мм	-2,7	-3,7	-4,61	-4,9	-4,29	-3,14	-1,9	-0,8
		f_{calc} , мм	-2,35	-4,36	-5,74	-5,98	-5,05	-3,51	-1,85	-0,42
		k	1,15	0,85	0,8	0,82	0,85	0,89	1,03	1,9
5 (1.4)	3-4	f_{exp} , мм	-3,0	-4,6	-5,61	-6,3	-5,94	-4,56	-3,1	-1,4
		f_{calc} , мм	-2,49	-4,84	-6,84	-7,8	-7,29	-5,56	-3,23	-1,05
		k	1,2	0,95	0,82	0,81	0,81	0,82	0,96	1,33
<i>Правий міст</i>										
2 (2.1)	2-3	f_{exp} , мм	-0,2	-0,8	-1,55	-2,36	-2,7	-2,9	-2,5	-1,8
		f_{calc} , мм	0,16	-0,47	-1,25	-2,21	-3,18	-3,57	-3,14	-2,33
		k	1,25	1,7	1,24	1,07	0,85	0,81	0,8	0,77
2 (2.2)	2-3	f_{exp} , мм	-1,4	-2,4	-3,6	-4,5	-4,96	-4,81	-4,1	-3,4
		f_{calc} , мм	-1,13	-2,78	-4,06	-5,28	-5,95	-5,62	-4,45	-2,82
		k	1,24	0,86	0,89	0,85	0,83	0,86	0,92	1,21
2 (2.3)	2-3	f_{exp} , мм	-2,1	-3,8	-5,1	-6,4	-7,02	-6,7	-5,4	-3,9
		f_{calc} , мм	-0,97	-3,15	-5,47	-7,43	-8,48	-8,15	-6,56	-4,37
		k	2,16	1,21	0,93	0,86	0,83	0,82	0,82	0,89
2 (2.4)	2-3	f_{exp} , мм	-2,8	-4,6	-6,56	-8,2	-8,5	-7,9	-6,9	-5,1
		f_{calc} , мм	-2,06	-5,05	-8,01	-10,15	-10,79	-9,7	-7,32	-4,43
		k	1,36	0,91	0,81	0,81	0,79	0,81	0,94	1,15



а)



б)

а) схема 2 правого мосту;
б) схема 5 лівого мосту.

Рисунок 6 — Порівняння максимальних значень вимірених прогинів f_{exp} та аналітичних прогинів f_{calc} по правому проїзду

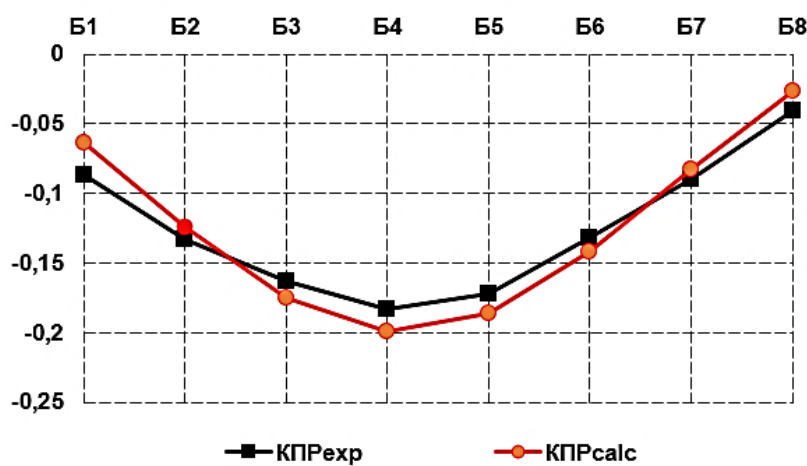
Таблиця 3

Значення максимальних експериментальних прогинів прогонових будов, приведені до нормативного навантаження

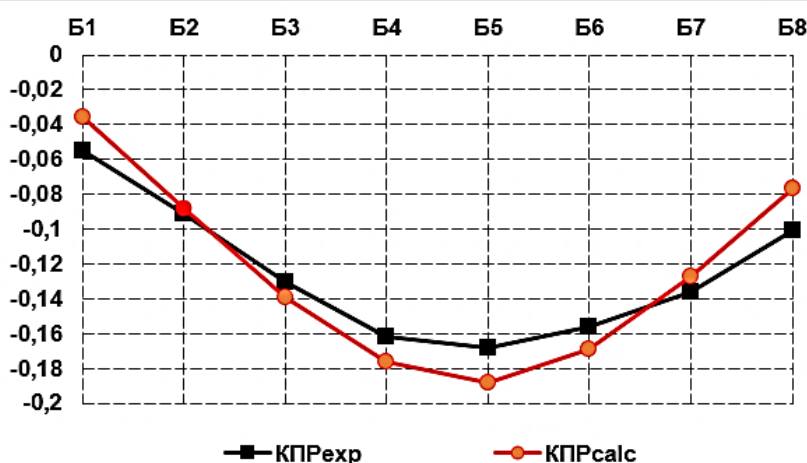
Схема	Коефіцієнт приведення, K_p	Максимальні виміряні прогини f_{exp} , мм	Виміряні приведені прогини $f_{exp,l} = f_{exp}/K_p$, мм	$f_{exp,l}/P$	
Лівий міст					
5	Середина 3-4	0,62	4,5	7,26	1/3223
Правий міст					
2	Середина 2-3	0,54	6,7	12,41	1/2611

Для балок прогонових будов прогону 2–3 правого мосту та 3–4 лівого мосту були визначені коефіцієнти поперечного розподілу (КПР) та проведений аналіз натурної та аналітичної просторової роботи конструкцій. На **рис. 7** наведено відповідні графіки зміни КПР по балкам прогонових будов.

У результаті аналізу визначених коефіцієнтів поперечного розподілу встановлено в цілому однаковий характер просторової роботи прогонових будов споруди. Найменш навантажені балки мають найбільшу різницю у відсотках між експериментальними та аналітичними значеннями коефіцієнтів поперечного розподілу, при цьому менша різниця в найбільш навантажених балок.



а)



б)

- а) прогін 3–4 лівого мосту,
б) прогін 2–3 правого мосту

Рисунок 7 — Порівняння експериментально встановлених KPP_{exp} та аналітичних KPP_{calc} коефіцієнтів поперечного розподілу

Висновки

Результати аналітичних та експериментальних досліджень конструкцій збірно-монолітних прогонових будов мостів засвідчили їх хорошу просторову жорсткість, рівномірний розподіл навантажень на балки в поперечному напрямку споруди. Виміряні експериментально та аналітичні величини прогинів не перевищують гранично допустимих значень. Під час навантаження прогонових будов статичним навантаженням не було виявлено відхилень в їхній роботі.

За результатами випробувань споруда може використовуватися для пропуску транспорту та відповідає вимогам чинних норм за навантаженням за схемами А-15, НК 100.

Список літератури

1. Коваль П. М., Фаль А. Є., Стоянович С. В. Ефективні конструкції залізобетонних збірно-монолітних прогонових будов автодорожніх мостів з використанням попередньо напружених балок. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Теорія і практика будівництва*. 2010. № 664. С. 44–52.
2. Коваль П. М., Стоянович С. В. Збірні залізобетонні балки для автодорожніх мостів типу «3 Бет-90» та «3 Бет-120». *Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка*. 2009. Вип. 33. С. 128–134.
3. Коваль П. М., Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних попередньо напружених балок мостів при дії сучасних навантажень. *Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій*. 2009. Вип. 11. С. 55–62.
4. Коваль П. М., Стоянович С. В. Деформативність і тріщиностійкість попередньо напруженої залізобетонної балки при дії одноразового навантаження та високих рівнів повторного навантаження. *Ресурсоekonomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Вип. 20. С. 233–238.
5. Коваль П. М., Стоянович С. В. Напруження у збірно-монолітних залізобетонних прогонових будовах мостів при врахуванні стадійності роботи. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2011. Вип. 39. С. 61–65.
6. Коваль П. М., Стоянович С. В. Алгоритми розрахунку збірно-монолітних прогонових будов автодорожніх мостів з урахуванням стадійності їх виготовлення та монтажу. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 3 (33). С. 106–114.

References

1. Koval P. M., Ye. Fal, S. V. Stoyanovych. Efektyvni konstruktsiyi zalizobetonnykh zbirno-monolitnykh prohonovykh budov avtodorozhnikh mostiv z vykorystannyam poperedn'o napruzhenykh balok [Effective designs of reinforced concrete precast-monolithic spans of highway bridges using prestressed beams]. *Visnyk Natsional'noho universytetu «Lvivska politekhnika»* [Bulletin of the National University «Lviv Polytechnic»]. 2010. No. 664: Teoriya i praktyka budivnytstva [Theory and practice of construction]. P. 44–52 [in Ukrainian].
2. Koval P.M., Stoyanovich S.V. Zbirni zalizobetonni balky dlya avtodorozhnikh mostiv typu «3 Bet-90» ta «3 Bet-120» [Prefabricated reinforced concrete beams for road bridges of the «3 Bet-90» and «3 Bet-120» types]. *Budivel'ni materialy, vyrobly ta sanitarna tekhnika*. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. [Building materials, products and sanitary equipment. Scientific and technical collection]. 2009. Issue 33. P. 128–134 [in Ukrainian].
3. Koval P.M., Stoyanovich S.V. Doslidzhennya napruzhenno-deformovanoho stanu zalizobetonnykh poperedn'o napruzhenykh balok mostiv pry diyi suchasnykh navantazhen' [Research of the stress-strain state of reinforced concrete prestressed bridge beams under the action of modern loads]. *Diahnostyka, dovhovichnist' ta rekonstruktsiya mostiv i budivel'nykh konstruktsiy: zb. nauk. pr. FMI im. H. V. Karpenka NAN Ukrayiny* [Diagnostics, durability and reconstruction of bridges and building structures: collection of scientific works of the G. V. Karpenko Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Ukraine]. 2009. Issue 11. P. 55–62 [in Ukrainian].
4. Koval P. M., Stoyanovich S. V. Deformability and crack resistance of prestressed reinforced concrete beams under single loading and high levels of repeated loading [Deformatyvnist' i trishchynostiykist' poperedn'o napruzhenoyi zalizobetonnoyi balky pry diyi odnorazovoho navantazhennya ta vysokyykh rivniv povtornoho navantazhennya]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats'* [Resource-saving materials, structures, buildings and structures: collection of scientific works]. 2010. Issue 20. P. 233–238 [in Ukrainian].

5. Koval P. M., Stoyanovich S. V. Napruzhennya u zbirno-monolitnykh zalizobetonnykh prohonovykh budovakh mostiv pry vrakhuvanni stadiynosti roboty [Stresses in precast-monolithic reinforced concrete span structures of bridges taking into account the staged nature of work]. *Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. 2011. Issue 39. P. 61–65 [in Ukrainian].

6. Koval P. M., Stoyanovich S. V. Alhorytmy rozrakhunku zbirno-monolitnykh prohonovykh budov avtodorozhnikh mostiv z urakhuvannyam stadiynosti yikh vyhotovlennya ta montazhu [Algorithms for calculating precast-monolithic span structures of highway bridges taking into account the stages of their manufacture and installation]. *Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo: zbirnyk naukovykh prats'* [Industrial mechanical engineering, construction: collection of scientific papers]. 2012. Issue 3 (33). P. 106–114 [in Ukrainian].

Sergii Stoianovych, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1363-7356>

Roman Poliuga, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-3729-0577>

National Academy Of Fine Arts And Architecture (NAFAA), Kyiv, Ukraine

RESEARCH OF THE WORK OF REINFORCED CONCRETE PRECAST-MONOLITHIC PRESTRESSED SPANS OF BRIDGES UNDER THE ACTION OF STATIC LOADS

Abstract

Introduction. To date, reinforced concrete precast-monolithic spans have gained considerable popularity during the construction of new and reconstruction of existing bridges and overpasses in Ukraine. This is especially noticeable in the last 10–15 years, when improved materials and new effective structural solutions began to be used during the construction of bridges.

To achieve greater efficiency of such constructions, improve their technical and economic indicators, it is important to have more information about their operation, stress-strain state. These data can be obtained during the inspection of constructions, their load testing and comparison with analytical studies.

Purpose. Research of the stress-strain state of reinforced concrete precast-monolithic spans of the structure: analysis of deflections, analysis of spatial work of the structure under the action of static loading.

Materials and Methods. When writing the article, materials from tests of precast-monolithic spans of the structure across the Irpin River at km 21+140 of the public highway of state importance R-30 Approach to the city of Irpin in the Kyiv region were used.

The following research methods were used: information analysis, mathematical modeling, methods of full-scale and theoretical research.

Results. As a result of the conducted research, experimental and analytical values of deflections of elements of spans of the structure were established, their comparison was performed and constructive coefficients were determined. Experimental and theoretical coefficients of transverse load distribution of spans were determined and the nature of spatial work of the structure was established.

Conclusion. The results of analytical and experimental studies of the structures of precast-monolithic bridge spans have shown their good spatial rigidity, uniform distribution of loads on the beams in the transverse direction of the structure. The experimentally and analytically measured deflection values do not exceed the maximum permissible values. When loading the spans with static loads, no deviations in their operation were detected.

According to the test results, the structure can be used for traffic and meets the requirements of current load standards according to schemes A-15, NK 100.

Keywords: bridge, reinforced concrete precast-monolithic span, deflections, stressed-deformed state, static loads.