

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ТИМЧАСОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ БАЛКАМИ ПРОЛЬОТНОЇ БУДОВИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ

© Кваша В.Г., Рачкевич В.С., 2008

Наведено порівняння коефіцієнтів поперечного розподілу (КПР) тимчасових навантажень між балками залізобетонної прольотної будови, визначених і розрахованих за вимірними під час випробувань прогинами. Уточнено методику визначення КПР за результатами натурних випробувань прольотної будови

Comparison of coefficients of the transversal distributing (КПР) of the temporal loadings between the beams of reinforced-concrete span structure, certain after bendings measured at tests and expected is resulted in this article. The method of determination of КПР is specified as a result of full-size tests of span structure

Постановка проблеми. Розрахунок розподілу тимчасових навантажень між несучими елементами перехресно- і плитно-ребристих залізобетонних балкових прольотних будов становить основу їх просторового розрахунку. Сьогодні, незважаючи на можливості сучасної обчислювальної техніки, продовжують застосовуватись відомі з початку минулого століття і надійно перевірені практикою проектування методи коефіцієнта поперечного розподілу (КПР) [1, 3, 6], суть яких полягає у визначенні такої величини, як КПР – безрозмірного коефіцієнта, що характеризує максимальну величину силової дії тимчасових навантажень на елементи конструкцій прольотної будови під час врахування умов їх сумісної роботи залежно від характеру взаємних зв'язків (жорсткі, податливі, шарнірні). Максимальні значення КПР для кожної балки прольотної будови одержують, навантажуючи лінії впливу реакцій (тиску) поперечної конструкції на головні балки найбільш не вигідними схемами розташування тимчасових навантажень в поперечному перерізі прольотної будови. Якщо в той чи інший спосіб побудовано лінію впливу, то КПР визначають як суму її ординат під силами з коефіцієнтом 0,5, під час визначення ординат лінії впливу від сил під рядами коліс, і без нього, якщо ординати визначають від рівнодійної тиску на вісь [1, 3]. Отже, методи КПР принципово відрізняються між собою за способом побудови і характером ліній впливу опорних реакцій поперечної розподільної конструкції на головні балки. Серед розроблених методів побудови ліній впливу опорних реакцій з врахуванням пружності опор (пружних прогинів головних балок) доволі розповсюдженим є метод позацентрового стиску, який передбачає найпростіший, лінійний закон розподілу зовнішнього тимчасового навантаження між головними балками.

Прийняті в методах КПР допущення дають змогу складний просторовий розрахунок прольотної будови методами будівельної механіки замінити доволі простим визначенням КПР в декількох поперечних перерізах і подальшим розрахунком згинальних моментів і поперечних сил у головних балках від різних схем тимчасових навантажень.

Ці самі методи застосовують і для перерахунку існуючих прольотних будов, в яких під час тривалої експлуатації виникли істотні дефекти і пошкодження, пов'язані з порушенням поперечних зв'язків між балками. Зокрема це стосується побудованих у великій кількості в різних регіонах України у 50–60-х роках минулого століття збірних залізобетонних прольотних будов за ТП вип. 56 та його модифікаціями [7–9]. Розповсюдженими дефектами цих прольотних будов, які порушують цілісність поперечного перерізу, є розриви металевих накладок у стиках поперечних півдіафрагм суміжних балок, а також збіг в плані цих півдіафрагм до 30–50 мм і більше [2–5, 7].

Крім того, за тривалий період експлуатації змінюються фізико-механічні характеристики бетону, виникають і розвиваються силові тріщини, а також непружні деформації стиснутого бетону, змінюються умови сумісної роботи бетону і арматури. Ці явища призводять до непрогнозованого зменшення жорсткості перерізів як в межах довжини однієї балки, так і в різних балках прольотної будови. Врахувати вплив цих чинників за вибору методів просторового розрахунку і створення математичної моделі, яка б реально відображала взаємодію між елементами просторової системи прольотної будови, доволі складно, а часто і неможливо [3, 4]. У таких випадках ДБН В.2.3-6-2002 [2] рекомендує визначати коефіцієнт поперечного розподілу тимчасових навантажень між балками за виміряними під час натурних випробувань прольотних будов прогинами балок, допускаючи пружну роботу і приймаючи, що розподіл тимчасового навантаження між ними пропорційний до їх прогинів:

$$h_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}, \quad (1)$$

де h_i – фактичний коефіцієнт поперечного розподілу для i -ї балки; f_i – величина пружного прогину i -ї балки, що вимірюється під час випробувань; n – кількість балок в поперечному перерізі прольотної будови, прогини яких вимірювали під час випробувань.

Фактичний напружено-деформований стан залізобетонних балок з тріщинами має багато специфічних особливостей, зокрема, нелінійний характер деформування, тому прийняте в [2] допущення про їх пружну роботу під час випробувань є доволі умовним і потребує додаткового експериментального обґрунтування, що і визначило мету цієї роботи – експериментальну перевірку прийнятої у [2] методики визначення КПр за виміряними під час натурних випробувань прольотної будови прогинами балок.

Досліджувана прольотна будова і методика випробувань. Випробовували перехресно-ребристу прольотну будову моста через р. Прут на км. 33+173 автодороги Яблунів-Делятин, виконану у монолітному залізобетоні, але зі збереженням конструктивної схеми, геометричних розмірів і армування за збірним варіантом типового проекту вип. 56 [8, 9]. Її поперечний переріз складений з п'яти таврових балок завдовжки 22,16 м (розрахунковий прольот 21,6 м) з кроком поперек прольоту – 1,4 м, об'єднаних між собою в просторову систему монолітними поперечними діафрагмами через 2,7 м вздовж прольоту і монолітною залізобетонною плитою проїзної частини завтовшки 10–12 см. Армування балок повністю відповідає ТП вип. 56 під нормовані на час проектування тимчасові навантаження Н-18 і НК-80 [9]. Випробування проводили під час реконструкції моста після демонтажу всіх елементів мостового полотна за мінімального постійного навантаження тільки від власної ваги балок.

Прольотну будову випробовували за двома схемами тимчасових навантажень: схема I – одна колона з двох або трьох автомобілів КАМАЗ, максимально наближених почергово до осі лівої і правої крайніх балок; схема II – двома колонами з двох автомобілів КАМАЗ кожна, максимально зближених між собою і наближених до осі крайніх балок, аналогічно як і за схеми I. Поперек і вздовж прольоту колони автомобілів встановлювали в найневигідніше положення за відповідними лініями впливу. Для одержання максимальних згинальних моментів в крайній і суміжній з нею балках задні, найнавантаженіші осі автомобілів на ділянці лінії впливу з максимальними ординатами зводили задніми бортами [6, 7].

За характерну, контрольовану під час випробування деформацію приймали прогини балок в середині прольоту, оскільки вони являють собою найбільш узагальнену (інтегральну) характеристику напружено-деформованого стану перерізів і враховують практично всі фактори впливу на характер просторової роботи прольотної будови: фізичну нелінійність деформування балок, вплив на напружено-деформований стан і жорсткість перерізів нелінійних деформацій бетону і арматури, тріщин, тривалості і повторності навантажень, зміну фізико-механічних характеристик бетону за

період експлуатації, статичну схему прольотної будови, дефекти поперечних зв'язків між балками тощо. За характером розподілу прогинів між балками встановлювали закономірності просторової роботи прольотної будови, а також, за рекомендаціями [2, 4] визначали фактичний розподіл зусиль між балками від тимчасових навантажень, тобто відповідність фактичної і прийнятої для розрахунку моделі просторової роботи прольотної будови.

Теоретичні розрахунки КПП від випробувальних навантажень. Розрахунок теоретичних КПП від схем I і II випробувального навантаження в середній частині прольоту кожної балки прольотної будови виконаний за методом позацентрового стиску, який, як відомо з досвіду його застосування, дає задовільні результати під час розрахунків вузьких прольотних будов зі співвідношенням довжини L до ширини B $L/B \geq 2$, що існує в цьому випадку.

Результати розрахунку наведено на рис. 1, де показані побудовані за методом позацентрового стиску лінії впливу опорних реакцій (тиску) для всіх головних балок $R_5 \dots R_1$, ординати ліній впливу $y_1 \dots y_4$ під силами випробувального навантаження та розраховані КПП' $_{5 \dots 1}$ і КПП $_{5 \dots 1}$ відповідно для схем I і II випробувального навантаження як півсума ординат ліній впливу – $0,5 \sum y_i$ (рисунок, а). Там теж показані епюри згинальних моментів всередині прольоту у балках 1–5 для обох схем випробувального навантаження (рисунок, б). Числові значення КПП і згинальних моментів всередині прольоту зведені у таблицю. Варто звернути увагу, що сума КПП усіх балок за однієї колони навантаження дорівнює одиниці, а за двох – двом, тобто під час розрахунку КПП як півсуму ординат ліній впливу за одиницю навантаження приймали тиск осей одного автомобіля.

Теоретичні і експериментальні КПП і згинальні моменти у балках досліджуваної прольотної будови від випробувальних навантажень

| Розраховувані і досліджувані величини | Номери балок прольотної будови | | | | | Σ |
|---|--------------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
| Схема I (2 КАМАЗи) | | | | | | |
| 1. – f , мм | 12,73 | 9,49 | 6,46 | 3,42 | 0,27 | 32,37 |
| 2 а – КПП _т (розрахований) | 0,4035 | 0,3018 | 0,2000 | 0,0982 | -0,0035 | 1,00 |
| 2 б, 4 а – КПП _е = КПП _м = $f_i / \sum f_i$ | 0,3933 | 0,2932 | 0,1996 | 0,1056 | 0,0083 | 1,00 |
| 3 – M , кН·м | 632,57 | 473,13 | 313,54 | 153,95 | -5,49 | 1567,7 |
| 4 б – КПП _м | 0,4035 | 0,3018 | 0,2000 | 0,0982 | -0,0035 | 1,00 |
| 5,6 – $\Delta_1 = \Delta_2$ | -2,53 | -2,85 | -0,2 | 7,54 | - | - |
| Схема II (2 КАМАЗи – 2 колони) | | | | | | |
| 1. – f , мм | 15,74 | 15,46 | 14,88 | 14,41 | 13,98 | 74,47 |
| 2 а – КПП _т (розрахований) | 0,4257 | 0,4128 | 0,400 | 0,3872 | 0,3743 | 2,000 |
| 3 – M , кН·м | 667,37 | 647,15 | 627,08 | 607,01 | 586,79 | 3135,4 |
| 4 а – КПП _м = $M_i / \sum M_i$ | 0,2128 | 0,2064 | 0,2000 | 0,1936 | 0,1872 | 1,00 |
| 4 б – КПП _м = $\eta = f_i / \sum f_i$ | 0,2114 | 0,2076 | 0,1998 | 0,1935 | 0,1877 | 1,00 |
| 2 б – КПП _е = 2η | 0,4228 | 0,4152 | 0,3996 | 0,3870 | 0,3754 | 2,00 |
| 5 – Δ_1 , % | -0,7 | 0,6 | -0,1 | 0,0 | 0,3 | |
| 6 – Δ_2 , % | -0,05 | 0,6 | -0,1 | 0,0 | 0,3 | |

Примітки: 1 – прогин f , мм (вимірний); 2 – коефіцієнт поперечного розподілу навантаження: а – КПП_т – теоретичний, б – КПП_е – експериментальний; 3 – згинальний момент M , кН·м; 4 – коефіцієнт поперечного розподілу згинальних моментів: а – КПП_м – теоретичний; б – КПП_м – експериментальний;

$$D_1 = \frac{KPP_e - KPP_m}{KPP_m} \times 100\%; \quad D_2 = \frac{KPPM_e - KPPM_m}{KPPM_m} \times 100\% .$$

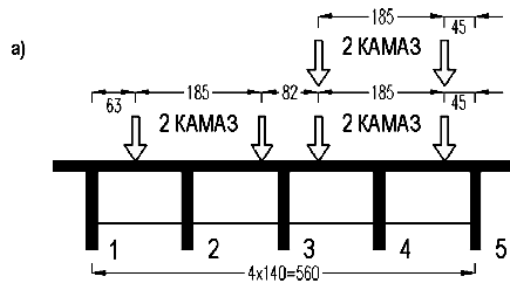
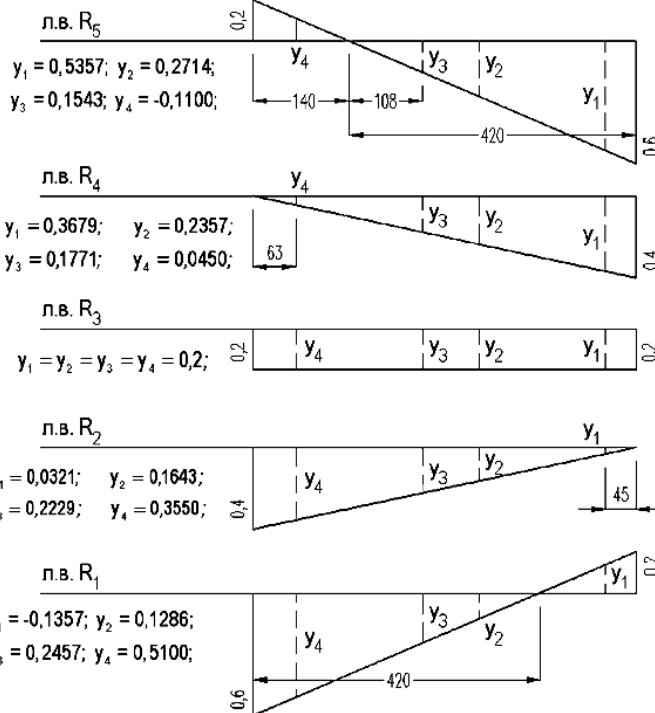


схема I

схема II



$$K_{1,2} = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 0,4035;$$

$$K_{1,2} = \frac{1}{2} \sum y_i = 0,4257$$

$$KPR'_4 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 0,3018;$$

$$KPR_4 = \frac{1}{2} \sum y_i = 0,4128.$$

$$KPR'_3 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 0,2;$$

$$KPR_3 = \frac{1}{2} \sum y_i = 0,4.$$

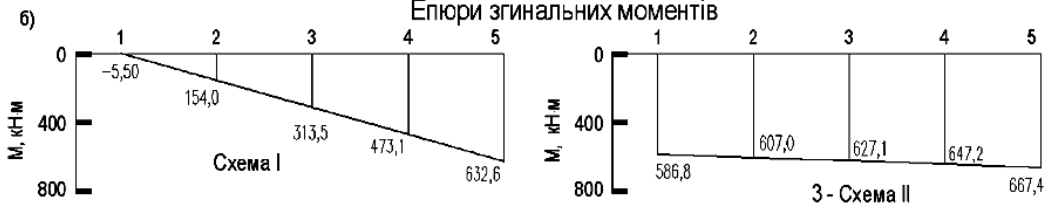
$$KPR'_2 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 0,0982;$$

$$KPR_2 = \frac{1}{2} \sum y_i = 0,3872.$$

$$KPR'_1 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = -0,0035;$$

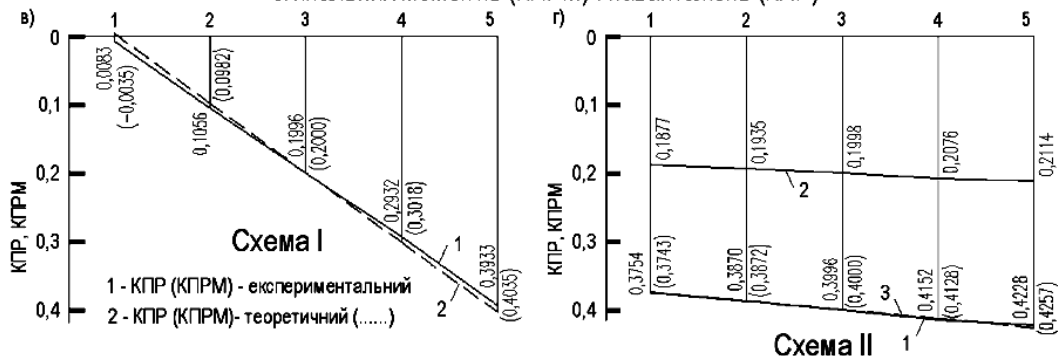
$$KPR_1 = \frac{1}{2} \sum y_i = 0,3743$$

Епюри згинальних моментів



Коефіцієнт поперечного розподілу

згинальних моментів (КПРМ) і навантажень (КПР)



Визначення теоретичних КПРм за методом позacentрового стиску та порівняння їх з експериментальними КПРм і КПРе під час навантаження прольотної будови за схемами I і II

Експериментальні прогини, КПП та їх порівняння з теоретичними. Розподіл прогинів між балками за обох схем навантаження прольотної будови був близький до лінійного. Це свідчить про те, що діафрагмова конструкція прольотної будови з монолітними діафрагмами і об'єднаною з ними головними балками монолітною плитою проїзної частини, через які тимчасові навантаження розподіляються між балками поперек прольоту, має доволі значну поперечну жорсткість і умовно може бути віднесена до типу прольотних будов з жорстким поперечним перерізом, початкова форма якого без істотних деформацій зберігається і після навантаження. Отже, дійсна робота прольотної будови на досягнутому рівні навантаженості, який в реальних умовах близький до експлуатаційного, відповідає лінійному характеру розподілу зусиль між балками, тобто теоретичним передумовам методу позацентрового стиску, який і був прийнятий для теоретичного розрахунку КПП від випробувального навантаження.

Можливість його застосування для розрахунку розподілу тимчасових навантажень між балками перевіряли порівнянням теоретичних і експериментальних коефіцієнтів поперечного розподілу тимчасового навантаження (КПП), які за рекомендаціями ДБН [2] визначали за (1).

Порівняння показало, що під час навантаження прольотної будови однією колоною автомобілів за схемою I, розраховані за методом позацентрового стиску і експериментально визначені за співвідношенням прогинів коефіцієнти поперечного розподілу, фактично збігаються. Різниця між ними знаходиться в межах точності вимірювання прогинів і становить лише декілька відсотків, що наочно видно з показаних на рисунку, в графіків зміни теоретичних і експериментальних КПП, а також з порівняння їх величин, наведених у таблиці. Одержаний результат випробувань переконливо свідчить, що спосіб позацентрового стиску достовірно відображає дійсну просторову роботу середньої частини прольоту діафрагмової прольотної будови, яка має значну кількість поперечних діафрагм і відношення $L/B \geq 2,0$.

Під час навантаження прольотної будови двома колонами автомобілів (схема II), визначений за співвідношенням прогинів експериментальний КПП, виявився у два рази меншим, ніж розрахований за методом позацентрового стиску (див. рисунок, з та порівняння КПП в таблиці). Практично повну збіжність експериментальних і розрахованих КПП одержуємо під час перемноження експериментальних КПП на два, тобто на кількість колон автомобілів поперек прольоту (рисунок, з).

Подальший аналіз показав, що за двох колон автомобілів одержані за співвідношенням прогинів КПП практично збігаються з коефіцієнтами розподілу згинальних моментів, одержаних як співвідношення згинального моменту у кожній балці, визначеного за розрахованими за методом позацентрового стиску КПП навантаження, до сумарного згинального моменту на прольотну будову (рисунок, в), тобто:

$$K_{ППМ} = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (2)$$

де M_i – розрахований згинальний момент від двох колон випробувального навантаження в i -й балці прольотної будови під час визначення КПП за методом позацентрового стиску; $\sum M_i$ – сумарний згинальний момент на прольотну будову від тієї самої схеми навантаження за $K_{ППМ}=1,0$.

Цей самий висновок підтверджується і аналізом загальновідомої узагальненої формули визначення максимальних прогинів:

$$f = S \frac{Ml^2}{B}, \quad (3)$$

де S – безрозмірний коефіцієнт, що враховує статичну схему балки і схему навантаження; M – згинальний момент; l – розрахунковий прольот балки; $B=EI$ – жорсткість у допущенні пружної роботи балок.

Якщо за пружної стадії роботи балок S , l , B – сталі величини, то вираз $k = \frac{Sl^2}{B}$ також буде постійним, а прогин балки $f = kM$ у цьому випадку буде пропорційним до згинального моменту.

Підставляючи його значення в (1), одержимо

$$h_i = \frac{kM_i}{k \sum_{i=1}^n M_i} = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i}. \quad (4)$$

З наведеного перетворення формули (1) випливає висновок, що за вимірними прогинами визначають не коефіцієнти розподілу тимчасового навантаження, а експериментальний коефіцієнт розподілу згинальних моментів (КПРМ) між балками прольотної будови від цього самого навантаження.

Отже, методика порівняння збіжності теоретичних розрахунків з результатами випробувань повинна ґрунтуватися на порівнянні розрахованих і експериментальних величин коефіцієнтів поперечного розподілу згинальних моментів, тобто не коректно порівнювати розраховані коефіцієнти поперечного розподілу тимчасового випробувального навантаження (КПР) з експериментальними коефіцієнтами поперечного розподілу згинальних моментів, визначеними за вимірними прогинами, оскільки вони мають різну природу і принципово є незіставними. КПР – умовна характеристика, що визначає частку навантаження, яку сприймає кожна балка прольотної будови. Вона залежить від способу побудови ліній впливу реакцій головних балок (методу просторового розрахунку), місцеположення навантаження поперек прольотної будови, кількості смуг навантаження, кількості балок у складі прольотної будови, їх жорсткості тощо. КПРМ характеризує величини згинальних моментів, що сприймаються балками, і є функцією прогинів балок.

Тому пропонується така методика порівняння теоретичного розподілу зусиль між балками прольотної будови з експериментальним, визначеним за прогинами балок:

- теоретично визначити КПР випробувального навантаження для кожної балки прольотної будови за відповідними лініями впливу реакцій головних балок;
- за одержаними КПР навантаження розрахувати максимальні згинальні моменти у кожній балці за заданої схеми розташування випробувального навантаження;
- від абсолютних значень визначених згинальних моментів (теоретичних) перейти до КПРМ_т за (2);
- за вимірними прогинами балок визначити експериментальні КПРМ_е за (1).

Задовільна збіжність теоретичних і експериментальних КПРМ_е і свідчатиме про можливість застосування прийнятої методики розрахунку розподілу зусиль для перевіркових розрахунків випробуваної прольотної будови як на випробувальні, так і нормовані та інші тимчасові навантаження.

Експериментальний КПР навантаження за вимірними прогинами можна визначити зі співвідношення (4), якщо у ньому замінити

$$M_i = КПР_i \cdot M_I \text{ і } \sum_{i=1}^n M_i = nM_I. \quad (5)$$

У цих виразах M_I – згинальний момент на прольотну будову від однієї колони автомобілів за $КПР=1,0$; n – кількість колон автомобілів на прольотній будові поперек прольоту; $КПР_i$ – експериментальний коефіцієнт розподілу навантаження для i -ї балки прольотної будови.

Тоді одержимо

$$\frac{КПР_i \cdot M_I}{nM_I} = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}. \quad (6)$$

Звідси експериментальний коефіцієнт розподілу навантаження:

$$КПР_e = \frac{nf_i}{\sum_{i=1}^n f_i}. \quad (7)$$

Знайдені за цим способом експериментальні величини КПР_е можна використати для перерахунків прольотної будови на нормовані тимчасові навантаження лише за умови, що схема розташування випробувального навантаження поперек прольоту буде максимально наближеною до схеми розташування нормованого тимчасового навантаження.

Для прийнятих схем розташування випробувального навантаження з однієї (схема I) і двох (схема II) колон автомобілів на рисунку, *в*, *г* показано порівняння КПР, визначених за методом позацентрового стиску, з експериментальними (1) і теоретичними (2) КПРМ, визначеними за запропонованою методикою. Числові значення порівнюваних величин наведено у таблиці. З порівняння зрозуміло, що за навантаження однією колоною автомобілів експериментальні і теоретичні КПР мають задовільну збіжність між собою, а КПР і КПРМ мають однакові значення. Навпаки, за навантаження двома колонами КПРМ є в два рази меншими від КПР, а експериментальні КПР_е, визначені за співвідношенням прогинів з врахуванням кількості колон автомобілів поперек прольоту (7), практично збігаються з теоретичними (рисунок, *г*). З наведеного прикладу можна зробити висновок, що за формального дотримання рекомендацій ДБН В. 2.3-6-2002 [2], приймаючи формулу (1) за КПР навантаження незалежно від кількості його колон поперек прольоту, а не КПРМ (згинальних моментів), можна істотно недооцінити фактичну навантаженість балок і зробити хибні висновки щодо вигідного режиму їх роботи, ніж передбачали теоретичні розрахунки.

Висновки: 1. Наведений аналіз показав, що за співвідношенням вимірних під час випробувань прогинів (1) визначається коефіцієнт поперечного розподілу між балками згинальних моментів КПРМ, а не навантажень КПР. Для визначення КПР навантажень у (1) необхідно врахувати кількість колон навантаження поперек прольоту (7).

2. Для використання експериментальних КПР під час перерахунку існуючих прольотних будов схема розташування випробувальних навантажень поперек прольоту повинна бути максимально наближеною до розрахункової схеми нормованих тимчасових навантажень.

3. Метод позацентрового стиску можна застосовувати для розрахунку розподілу тимчасових навантажень між балками під час перерахунку існуючих прольотних будов зі співвідношенням розмірів $L/B \geq 2$.

1. Гибишман М.Е., Попов В.И. Проектирование транспортных сооружений. – М.: Транспорт, 1988. – 467 с. 2. ДБН В. 2.3-6-2002. Мости та труби. Обстеження і випробування. – К.: Держбуд України, 2002. – 25 с. 3. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений автодорожных мостов. ВСН 32-78. – М.: Трансиздат, 1979. – 142 с. 4. Инструкция по уширению автодорожных мостов и путепроводов. ВСН 51-88. – М.: Транспорт, 1990. – 90 с. 5. Кваша В.Г., Іваник І.Г. Просторовий розрахунок існуючих залізобетонних мостів при врахуванні виявлених дефектів // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: РДТУ, 1999. – Вип. 3. – С. 145–150. 6. Кваша В.Г. Ефективні системи розширення і підсилення залізобетонних балкових прольотних будов автодорожніх мостів: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук. – К.: КНУБА, 2002. – 33 с. 7. Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Рачкевич В.С., Семанів Л.Я. Відновлення автодорожнього моста після наслідків повені з розширенням і підсиленням прольотної будови // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 16, ч. 1. – С. 342–350. 8. Матаров И.А., Смирнова Л.С., Шилина А.П. Сборные железобетонные мосты с многорядной сварной арматурой. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 186 с. 10. Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. – М., 1958. – Вып. 56: Пролетные строения железобетонные сборные с каркасной арматурой периодического профиля. – 56 с.