УДК 539.3:620

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ БАЛОК ТА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, О. П. МАКСИМЕНКО, Ю. В. МОЛЬКОВ, П. С. КУНЬ, О. Я. ЧЕПІЛЬ
Фіз.-мех. ін.-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: dep-12@ipm.lviv.ua

Сформульовано методику визначення залишкового ресурсу роботи залізобетонної балки з використанням енергетичного підходу. Розроблено оптико-цифрові засоби для реєстрації переміщень бокової поверхні балки в процесі статичних та циклічних навантажень та алгоритм реєстрації та обробки зображень для визначення величини локальних деформацій та прогину балок. Проведено лабораторні і натурні випробування засобів вимірювання під час досліджень моделі та випробовувань моста. Показано, що результати визначення деформацій та прогинів оптико-цифровими засобами добре корелюють із даними розрахункових величин, отриманих згідно діючих нормативних документів. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: залізобетонна балка, напружено-деформований стан, енергія пружно-пластичного деформування, цифрова кореляція зображень, розподіли переміщень і деформацій

Мости є найбільш вразливими до руйнувань ділянками транспортних магістралей, тому потребують підвищеної уваги. В процесі їх експлуатації відбувається поступове руйнування елементів конструкції та втрата несучої здатності в результаті нагромадження незворотних пошкоджень. В першу чергу це відбувається у місцях з'єднань під впливом періодичних циклічних навантажень, фізико-хімічних процесів корозії бетонів, чинників зовнішнього середовища (температури, вологості) та технологічних дефектів. Періодичні та позапланові огляди мосту трудомісткі і носять суб'єктивний характер, а випробовування мостів вимагає залучення великої кількості вантажного транспорту, встановлення систем вимірювання і тимчасового зупинення руху транспорту.

Розроблення і застосування сучасних мобільних пристроїв для моніторингу технічного стану мостів, які дають можливість проводити вимірювання під час експлуатації споруди та впровадження нових методик оцінки залишкового ресурсу на основі проведених вимірювань є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої забезпечить обґрунтованість встановлення міжремонтних періодів та підвищить безпечну експлуатацію транспортних споруд.

Встановлення міри енергетичної пошкодженості залізобетону. Оцінка залишкового ресурсу конструкції в цілому полягає у знаходженні елементу або вузла, де можуть нагромаджуватись пошкодження, які призводять до появи тріщин та втрати стійкості. Тому важливим є своєчасне встановлення таких місць та моніторинг напружено-деформованого стану у процесі експлуатації. В цьому плані важливим є моделювання процесу нагромадження пошкоджень для оцінювання поточного стану та прогнозування залишкового ресурсу із врахуванням умов навантаження.

Для опису процесу нагромадження пошкоджень у бетоні та досягнення гранично-рівноважного стану вводиться гіпотеза руйнування, яка базується на енергетичному підході, що передбачає встановлення міри енергетичної пошкодженості в панельному об'ємі бетону.

За міру енергетичної пошкодженості бетону прийнято величину:

$$\omega(x,y,t) = W(x,y)/W_c, \qquad (1)$$

де W_c – питома енергія руйнування залізобетонної балки; $W(x,y)$ – енергія пружно-пластичного деформування.

Енергію руйнування залізобетонної балки визначають за статичного навантаження згином. При цьому будують діаграму руйнування в координатах «істинні напруження–істинна деформація». Площа під діаграмою руйнування і буде питомою енергією руйнування.

Енергія пружно-пластичного деформування залізобетону визначається як сума пружної і пластичної складових нижньої розтягнутої частини бетону і арматури за мінусом енергії стиску верхнього поясу балки:

$$W\left(P,x,y\right) = W^e_{\text{БР}} + W^p_{\text{БР}} + W^e_{\text{А}} + W^p_{\text{А}} - \\ - W^{\text{å}}_{\text{Бс}} - W^p_{\text{Бс}}.$$

Враховуючи зв'язок між деформацією за статичного та циклічного навантажень, отримаємо залежності для пружної і пластичної складових:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_u}{E} = \frac{\sigma'_f}{E}\left(2N_f\right)^b, \qquad (2)$$

© Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, Ю. В. Мольков, П. С. Кунь, О. Я. Чепіль, 2016

де σ'_f – істинні напруження руйнування бетону або арматури; E – модуль Юнга; N_f – кількість циклів до руйнування; b – коефіцієнт регресії при пружному деформуванні.

При пластичному деформуванні величину деформації визначають за формулою:

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_f \left(2N_f\right)^2, \qquad (3)$$

де ε'_f – істинна деформація бетону або арматури.

Величина енергії пружної деформації для бетону розтягнутої зони визначається за формулою:

$$W^e_{\text{БР}} = \frac{\left(\sigma'_f\right)^2}{E}\left(2N_f\right)^{-b}. \qquad (4)$$

Величина пластичної складової енергії деформування буде:

$$W^e_{\text{БР}} = \sigma'_f \varepsilon'_f \left(2N\right)^{-b-c},$$

де b, c – коефіцієнти регресії бетону для залежності $s \sim N$ пружної і пластичної областей відповідно.

Величину енергії руйнування бетону у розтягнутій зоні визначали шляхом випробування балкових зразків 100×100×400 мм на триточковий згин.

Величину деформації бетону у розтягнутій зоні визначають шляхом вимірювання переміщень на боковій поверхні зразка методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Величину деформацій у стиснутій зоні бетону визначали таким же методом.

Величину напружень визначали за формулою:

$$\sigma_{b,tm} = \frac{M_{\max}}{W}. \qquad (5)$$

За результатами цих випробувань будували істинні діаграми руйнування бетону. Площа під діаграмою «істинні напруження $\sigma_{b,tm}$ – істинна деформація $\varepsilon_{b,t}$» рівна питомій енергії руйнування бетону (рис. 1).

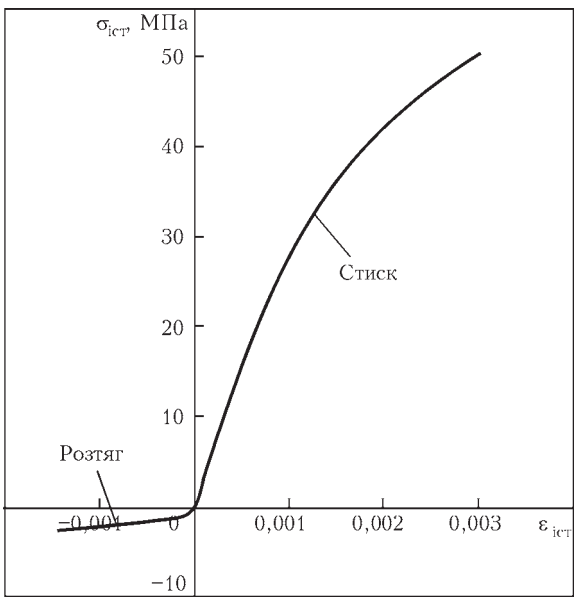

Рис. 1. Істинна діаграма руйнування бетону

Енергію руйнування арматури визначали при випробуванні розтягом арматурних зразків. За результатами випробувань арматури будували діаграму «істинні напруження $s_i \sim$ істинна деформація ε_i» (рис. 2). Величину істинної деформації визначали шляхом вимірювання переміщень методом ЦКЗ та наступним обчисленням за формулою:

$$\varepsilon_i = \ln(1/(1 - \psi_i)), \qquad (6)$$

де ψ_i – відносне звуження зразка.

Величину істинних напружень визначали з врахуванням звуження поперечного перерізу арматури в момент утворення шийки за формулою:

$$\sigma_i = \frac{P}{F_{\text{о}} - F_{\delta}}, \qquad (7)$$

де P – зусилля навантаження; F_0 – початкова площа поперечного перерізу арматури; F_{δ} – біжуча площа перерізу арматури.

Зміну діаметра арматурного стержня в процесі навантаження вимірювали методом ЦКЗ.

Загальна формула, яка описує зміну енергетичної пошкодженості від кількості циклів для балки, навантаженої зусиллями $P_{\min}$ і $P_{\max}$ (рис. 3), має вигляд:

$$\sigma_{\max}\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\left(\sigma''_f\right)^2}{E_{\text{б}}}\left(2N_f\right)^{-2b} + \sigma'_f\varepsilon'_f\left(2N_f\right)^{-b-c} + \frac{\left(\sigma''_f\right)^2}{E_{\text{A}}} + \sigma''_f\varepsilon''_f\left(2N_f\right)^{-d-k} - \frac{\left(\sigma'''_f\right)^2}{E}\left(2N_f\right)^{-2b} - \sigma'_f\varepsilon'_f\left(2N_f\right)^{-b-c} \qquad (8)$$

де σ'_f, σ'''_f – істинні напруження руйнування бетону за розтягу та стиску, які визначають із діаграми; σ''_f – істинне напруження руйнування арматури за статичного розтягу; $E_{\text{б}}$ – модуль пружності бетону; E_a – модуль пружності арматури; ε''_f – істинна критична деформація за статичного руйнування арматури; b – коефіцієнт регресії за пружного циклічного навантаження; c – коефіцієнт регресії циклічного навантаження бетону у пружнопластичній області; d – коефіцієнт за циклічного навантаження арматурної сталі у пружній області; k – коефіцієнт регресії стальної арматури; N – кількість циклів навантаження.

Таким чином, провівши експериментальні дослідження за статичного навантаження, визначають механічні характеристики бетону та арматури та, підставивши їх у формулу, можна розв'язати

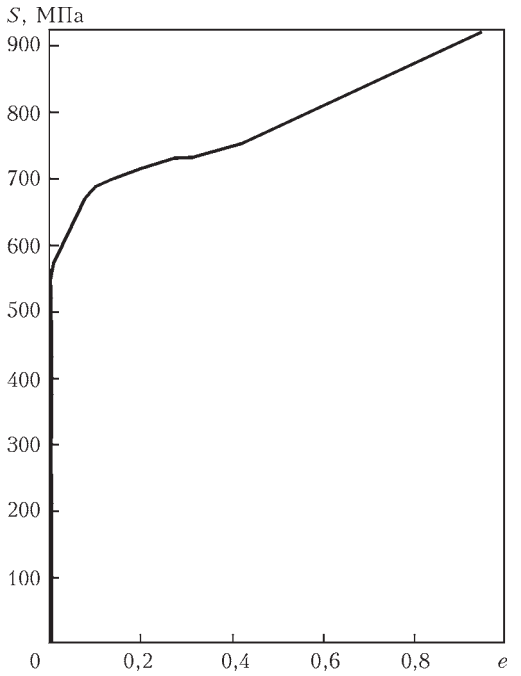

Рис. 2. Істинна діаграма руйнування арматурного стержня

трансцендентне рівняння відносно N і визначити кількість циклів до руйнування. При проведенні досліджень в лабораторних умовах необхідно визначити розмах деформацій та напружень за заданого навантаження. У пропонованій методиці ці величини визначають методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Для цього розроблено обладнання для ЦКЗ та створено алгоритми обробки зображень.

Встановлення локальних деформацій конструктивних елементів мостів. Враховуючи великі розміри мостів, доцільно спочатку розрахунковим шляхом з застосуванням методу кінцевих елементів або експериментально встановити найбільш навантажені місця конструкції, після чого визначити локальні деформації на вибраних ділянках.

Для визначення деформацій мостових балок до цього часу використовують тензометричні і механічні індикатори. Вимірювання переміщень такими приладами є достатньо трудомістким. Для забезпечення оперативного заміру деформацій у часі та підвищення точності при визначенні залишкового ресурсу конструкцій використовують сучасні безконтактні оптичні методи.

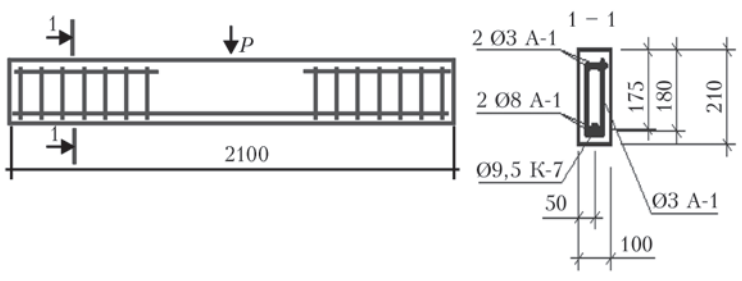

Рис. 3. Конструкція дослідних зразків

Найбільш простим у реалізації оптико-цифровим методом встановлення деформацій поверхні є ЦКЗ. Цей метод використовують в лабораторіях під час досліджень призматичних зразків бетону [1], вимірювання прогину балкових зразків [2, 9] та циклічних і динамічних випробовувань мостів [5]. Основною перевагою цього методу є безконтактність, мобільність та можливість встановити розподіл деформацій на усій поверхні балки [3].

Основні положення методу цифрової кореляції зображень. Для встановлення розподілу деформацій бокової поверхні балки методом ЦКЗ необхідно зареєструвати послідовно декілька цифрових зображення поверхні – перше без навантаження і наступне після прикладання навантаження. Після цього зареєстровані зображення за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбиваються на однакову кількість фрагментів, які відтворюють в певному масштабі відповідні елементарні площадки поверхні балки. Відносні переміщення фрагментів першого і наступного зображення визначаються за алгоритмом ЦКЗ, реалізованим у спеціалізованій програмі [7]. Для реалізації вимірювань методом ЦКЗ розроблено оптико-цифровий корелятор (ОЦК), який являє собою цифрову фотокамеру з механізмом позиціонування і світлодіодним освітлювачем досліджуваної ділянки. До складу ОЦК входить також ПК із спеціалізованою програмою.

Послідовність роботи ОЦК.

1. Калібрування оптичної системи для виправлення геометричних спотворень об'єктива. Для цього використовують тестове зображення і спеціальну процедуру обробки, після якої отримують коефіцієнти для корегування геометричних спотворень [7].

2. Виділення ділянки на зображеннях, в межах якої необхідно встановити поле деформацій. Після чого програма автоматично ділить її на фрагменти і розраховує їх відносні переміщення та локальні деформації поверхні балки за різного навантаження.

3. Фіксація результатів вимірювань полів переміщень і деформацій. Локальні деформації поверхні балки визначались за допомогою співвідношень:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2\right],$$
$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]. \quad (9)$$

Вимірювання локальних деформацій елементів моста за допомогою стаціонарного ОЦК. Для отримання кількісних

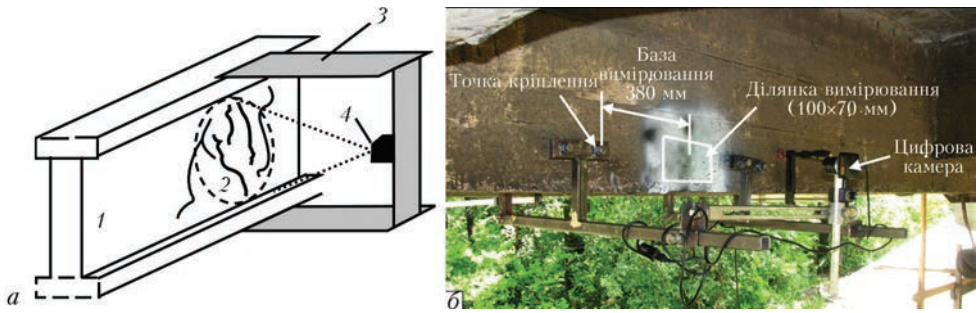

Рис. 4. Розміщення стаціонарного ОЦК на конструктивному елементі моста

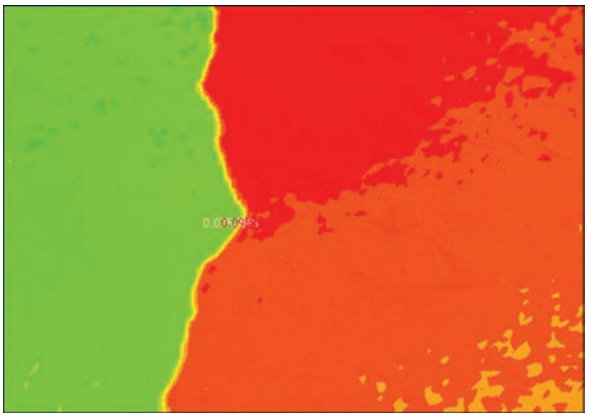

Рис. 5. Розподіл переміщень за максимального навантаження

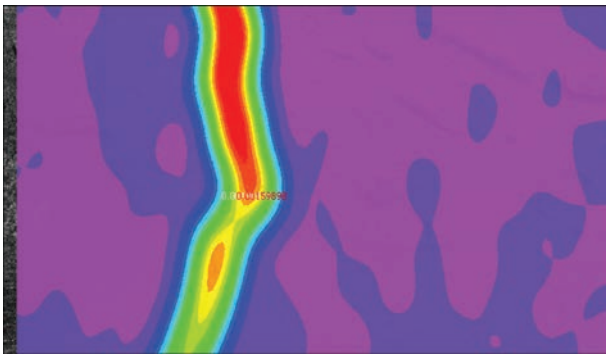

Рис. 6. Розподіл локальної деформації за максимального навантаження

показників енергетичної пошкодженості необхідно проводити постійний моніторинг стану конструкції в небезпечних місцях. Для цього в місцях виявлення небезпечних тріщин пропонується встановлювати ОЦК для реєстрації змін, які відбуваються під час експлуатації [8].

Стаціонарний ОЦК, який жорстко кріпиться до елемента конструкції, на невеликій відстані від досліджуваної ділянки, схематично показано на рис. 4, *а*: *1* – частина конструкційного елемента моста; *2* – область спостереження за тріщиноподібними дефектами; *3* – кріплення відеокамери до конструкційного елемента; *4* – відеокамера. Фото діючого ОЦК, встановленого на мостовій балці, наведено на рис. 4, *б*.

Величина виносу камери ОЦК від точки кріплення відповідає базі вимірювання відносної деформації мостової балки і складає 380 мм.

Такий пристрій дозволяє з високою точністю (в даному випадку ±0, 3мкм) виміряти переміщення поверхні, що потрапляє в поле зору камери, і обчислити відносну деформацію – відношення величини переміщення ділянки спостереження на поверхні балки до величини бази.

Розроблений пристрій апробовано в ході випробувань реконструйованого моста на кільцевій дорозі (м. Львів). За допомогою розробленого ОЦК одер-

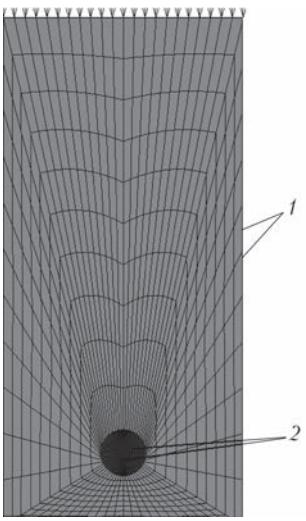

Рис.7. Поперечний переріз бетонної балки (*1*) із вмонтованою арматурою (*2*)

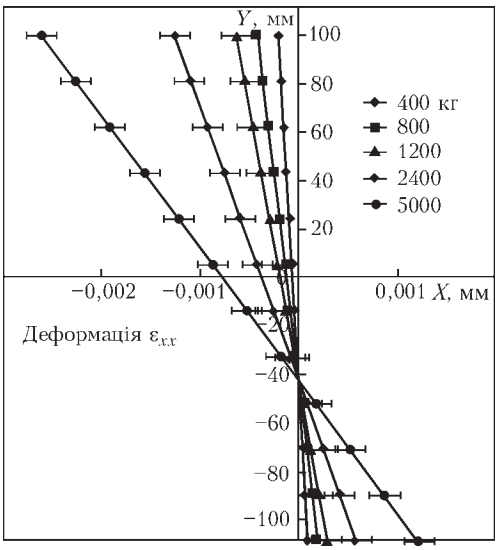

Рис. 8. Розподіл деформацій по висоті балки: крапки – одержано за допомогою ОЦК, лінії – розрахунок за методом скінченних елементів (МСЕ)

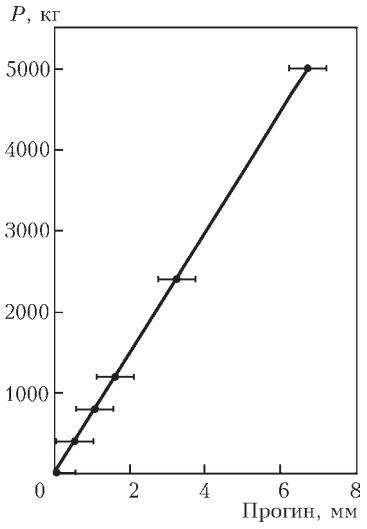

Рис. 9. Прогин центральної частини балки в залежності від навантаження: пряма – розрахунок за МСЕ, крапки – вимірювання за методом ЦКЗ

Таблиця 1. Результати вимірювання переміщень і деформацій

Навантаження (кількість автомобілів)	Вимірювання 1		Вимірювання 2	
	Переміщення, мм	Деформація, %	Переміщення, мм	Деформація, %
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0053	0,0014	–0,0046	–0,0012
2	0,0615	0,0162	–0,0082	–0,0021
4	0,0985	0,0259	–0,0071	–0,0019
2	0,0798	0,0210	–0,0095	–0,0025
1	0,0767	0,0202	–0,0079	–0,0021
0	0,0355	0,0093	–0,0062	–0,0016

Таблиця 2. Механічні характеристики бетону та арматури

Напруження, МПа			Деформації $\varepsilon\times10^{-5}$			Постійні матеріалу			
σ'_f	σ''_f	σ'''_f	ε'_f	ε''_f	ε'''_f	B	c	d	k
2,63	950	33	1,55	0,95	2,5	0,02	0,2	0,07	0,5

жано розподіл переміщень і локальної деформації на всій ділянці вимірювання в полі зору камери (рис. 5, 6). В межах ділянки вимірювання виявлено тріщини, розкриття яких за максимального навантаження складали в середньому 0,01мм. Результати вимірювання відносної деформації для другої від краю балки середнього прогону моста наведено в табл.1. Міст навантажували шляхом встановлення на відповідній ділянці прогону автомобілів, навантажених піском. Вимірювання 1 відповідає встановленню навантаження безпосередньо над балкою, а вимірювання 2 проведено при встановленні автомобілів на протилежному боці прогону моста.

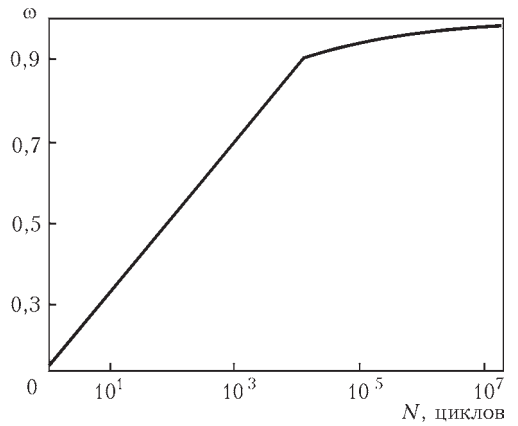

Рис. 10. Нагромадження пошкодженості в бетонній балці

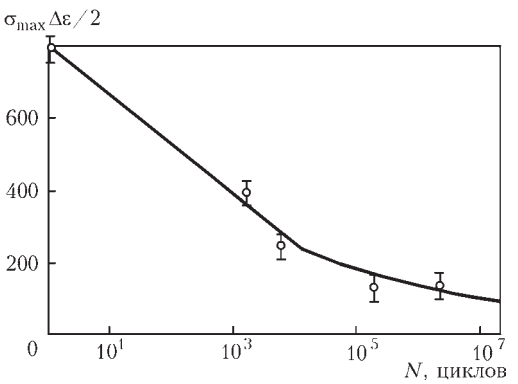

Рис. 11. Залежність енергії руйнування від кількості циклів навантаження

Експериментальне визначення енергії пошкоджуваності залізобетонної балки за циклічного навантаження. Дослідження здійснювали за циклічного навантаження залізобетонної балки (див. рис. 3) наступним чином. Балку навантажували ступенями статичним зусиллям і реєстрували ОЦК поле переміщень на боковій поверхні. Після цього здійснювали обробку зображень і визначали розподіл деформацій по висоті балки. Розподіл деформацій, отриманий методом ОЦК, порівнювали із результатами розрахунку МКЕ. При розрахунку тіло балки і арматури розбивали на 70000 паралелепіпедних восьмивузлових елементів (див. рис. 7). Розрахунок здійснено для п'яти ступенів навантаження: P_1 = 4000 Н; P_2 = 8000 Н; P_3 = 12000 Н; P_4=24000Н; P_5=50000Н. Результати обчислень представлено на рис. 8.

Аналогічно здійснено порівняння результатів величин прогину балки в центральній її частині (рис. 9).

Проведене зіставлення результатів, отриманих МСЕ та зареєстрованих за допомогою ОЦК, показує добру збіжність результатів. Це дає підстави стверджувати, що визначивши правильно величину істинних деформацій при згині балки у найбільш навантаженому місці та знаючи величину істинних напружень відповідно в розтягнутій і стиснутій зонах бетону, а також в арматурі можна встановити енергію руйнування залізобетонної балки. Величину істинних напружень бетону стиснутої і розтягнутої зон, а також арматури визначають на основі відповідних істинних діаграм руйнування для кожного окремого випадку. Такі дослідження проведено і встановлено, що енергія руйнування залізобетонної балки W_c = 800 МПа.

Дослідження втомної міцності балки здійснювали при циклічному асиметричному навантаженні.

В процесі циклічного навантаження ОЦК реєстрували поле переміщень при максимальному

P_{max} і мінімальному P_{min} зусиллі циклу. Визначали розмах деформацій Δe циклу навантаження та величину максимального напруження із істинних діаграм руйнування.

Для залізобетонної балки поперечного перерізу 100×210×21000 мм побудовано графічну залежність зміни енергетичної пошкодженості від кількості циклів навантаження (рис. 10). Механічні характеристики бетону та арматури подано у табл. 2.

Результати експериментальних досліджень у вигляді залежності величини енергії деформування за один цикл від кількості циклів до руйнування подано на рис. 11. Лінією показано залежність, отриману за розрахунковою формулою (8), а крапками – результати експериментальних даних за циклічного деформування залізобетонної балки.

Висновки

Розроблено методику визначення залишкового ресурсу роботи залізобетонної балки з використанням енергетичного підходу.

Розроблено обладнання та програмне забезпечення для встановлення локальних деформацій залізобетонних балок у відповідальних місцях. Проведена експериментальна апробація розробленої апаратури на модельній та реальній конструкції моста та під час випробовування балок. Розроблений пристрій і програмне забезпечення знайде застосування у системах моніторингу залізобетонних конструкцій у реальному часі.

Проведені експериментальні дослідження, які передбачають точне вимірювання величини переміщень з роздільною здатністю 0,0001 мм при циклічному навантаженні та розрахунок розмаху деформацій і визначення енергії пружно-пластичного деформування, що дає змогу прогнозувати кількість циклів до руйнування.

1. Choi S. Measurement of Deformations on Concrete Subjected to Compression Using Image Correlation / S. Choi, S. P. Shah // Experimental Mechanics. – 1997. – Vol. 37, №. 3. – P. 307–313.
2. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних попередньо напружених балок методом цифрової кореляції зображень / П. М. Коваль, Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков [та ін.] : Зб. наук. пр. Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 3. – С. 75–79.
3. Оптико-цифровий метод визначення полів деформацій на локальних ділянках залізобетонних мостів / Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, Р. М. Запоточний [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – № 2. – С. 104–108.
4. Noncontact Photogrammetric Measurement of Vertical Bridge Deflection / D. V. Jauregui, K. R. White, C. B. Woodward [et al.] // Journal of bridge engineering. – 2003. – P. 212–221.
5. Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method / P. Olaszek // Measurement. 1999. – № 25. – P. 227–236.
6. The measurement of deformation of a bridge by moire photography and photogrammetry / C. Forno, S. Brown, R. A. Hunt [et al.] // Strain. – 1991. – P. 83–87.
7. Максименко О. Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів / О. Максименко, Л. Франкевич, О. Сахарук // Електроніка та інформаційні технології. – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.
8. Моніторинг деформаційних процесів об'єктів тривалої експлуатації методом цифрової кореляції спекл-зображень / О. П. Максименко, І. С. Голинський, О. Г. Куць [та ін.] // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій: зб. наук. праць. – Львів, 2009. – Вип. 14. – С. 163–170.
9. Digital image correlation technique for thin beam specimen deformation and material moduli of elasticity measurements / «Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity» O. Maksymenko, O. Sakharuk, B. Ilchyshyn [et al.] // Proceedings of 5th International Conference (June 24–27, 2014, Lviv, Ukraine) / Ed. V. V. Panasyuk. – Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2014. – 880 p. P. 367–372.

Procedure for determination of residual operating life of a concrete beam with application of energy approach was formulated. Optico-digital means for recording beam lateral surface displacements during static and cyclic loading and an algorithm for image recording and processing to determine the magnitude of local deformations and sagging of beams were developed. Laboratory and full-scale testing of measuring tools were conducted during model investigations and bridge testing. It is shown that the results of determination of deformations and sagging by optico-digital means correlate with the data on design values, derived in keeping with existing normative documents.

K e y w o r d s : concrete beam, stress-strain state, energy of elastic-plastic deformation, digital correlation of images, distribution of displacements and deformations

Надійшла до редакції
26.04.2016

ExpoWELDING 2016

18–20 октября 2016 г. г. Сосновице, Польша

Экспо Силезия и Институт сварки Польши
проводят очередную сварочную выставку ExpoWELDING 2016
http://exposilesia.pl
Приглашаем посетить объединенный стенд украинских компаний № 111