https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.26.183

УДК 624.21

Кот Д. В., *https://orcid.org/0000-0003-2790-1119*

Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ПЛИТ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ МОСТІВ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННИМИ НЕЗНІМНИМИ ОПАЛУБКАМИ МЕТОДОМ ОПТИКО-ЦИФРОВОЇ СПЕКЛ-КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація

Вступ. У статті розглянута методика випробування монолітних плит проїзної частини мостів із незнімними залізобетонними опалубками [1] з використанням методики оптико-цифрової спекл-кореляції зображень [2].

Проблематика. Перспективним напрямком в монолітному мостобудуванні є використання різних типів незнімної опалубки при влаштуванні плити. Проте використання таких опалубок на сьогодні мало досліджене. Тому доцільне проведення випробування натурних моделей плит. У вітчизняній практиці при лабораторних дослідженнях і натурних випробуваннях будівельних конструкцій для вимірювання відносних деформацій і переміщень, а також для візуального спостереження за утворенням і розвитком тріщин використовують механічні прилади, тензодатчики, оптичні мікроскопи тощо. Всі ці прилади потребують постійної повірки та догляду і не завжди є можливість це робити. Проте для потреб лабораторних випробувань методом оптико-цифрової спекл-кореляції зображень переважно вистачає цифрового зображення об'єкта при різних рівнях навантаження. Необхідно лише правильно підібрати оптику відповідно до дослідної ділянки та забезпечити достатнє освітлення.

Мета. Мета роботи полягала у визначенні експериментальним шляхом доцільності застосування методики оптико-цифрової спекл-кореляції зображень при дослідженні моделей.

Матеріали і методи. Проведено експериментальних досліджень моделей проїзної частини мостів.

Результати. Встановлено доцільність використання методу оптико-цифрової спекл-кореляції зображень при дослідженні моделей проїзної частини мостів.

Висновки. Використання методу оптико-цифрової спекл-кореляції зображень дає можливість дослідити зміну відносних деформацій і переміщення окремих точок або ділянок при дослідженні бетонних поверхонь. Це, у свою чергу, дозволяє дослідити місця та характер утворення тріщин і дає змогу практичного використання – при експертизі існуючих конструкцій можливо зафіксувати місця утворення майбутніх тріщин і відносні деформації окремих ділянок.

Ключові слова: залізобетонна плита, зображення, міст, незнімна опалубка, прогонова будова, проїзної частини, оптико-цифрова спекл-кореляція.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом досліджень була залізобетонна плита проїзної частини моста, влаштована по залізобетонній незнімній опалубці. Досліджували дві серії залізобетонних зразків, які відрізнялися між собою конструкцією та армуванням (**табл. 1**).

Для дослідження в даній роботі прийнято 2 типи незнімної опалубки:

– *ПМ-4: плоска плита з просторовою зовнішньою арматурою.* Плита включена в роботу повного перерізу плити проїзної частини, армування її підібране після розрахунку моделі плити проїзної частини по нерозрізній двопрогоновій схемі;

– *ПМ-5: ребриста плита зі звичайною арматурою*. Плита включена в роботу повного перерізу плити проїзної частини, армування її підібране після розрахунку моделі плити проїзної частини по нерозрізній двопрогоновій схемі.

Таблиця 1

Робоча програма досліджень забетонованих по залізобетонних збірних незнімних опалубках плит проїзної частини

Тип зразка	Тип опалубки	Марку-вання	Марка бетону	Кількість зразків	Спосіб випробуван-ня	Методи досліджень, що будуть використо-вуватись
Монолітна плита з врахуванням опалубки	Плоска плита з просторовою зовнішньою арматурою	ПМ-4	В30	2	Одноразовий згин $\eta = 0...1$	Мікроскопія, механ. прилади
Монолітна плита з врахуванням опалубки	Ребриста плита зі звичайною арматурою	ПМ-5	В30	2	Одноразовий згин $\eta = 0...1$	Мікроскопія, механ. прилади

Схема завантаження зразка ПМ-4 вказана на **рис. 1**. Загальна схема випробувальної установки показана на **рис. 2**, а загальний вигляд — на **рис. 3**.

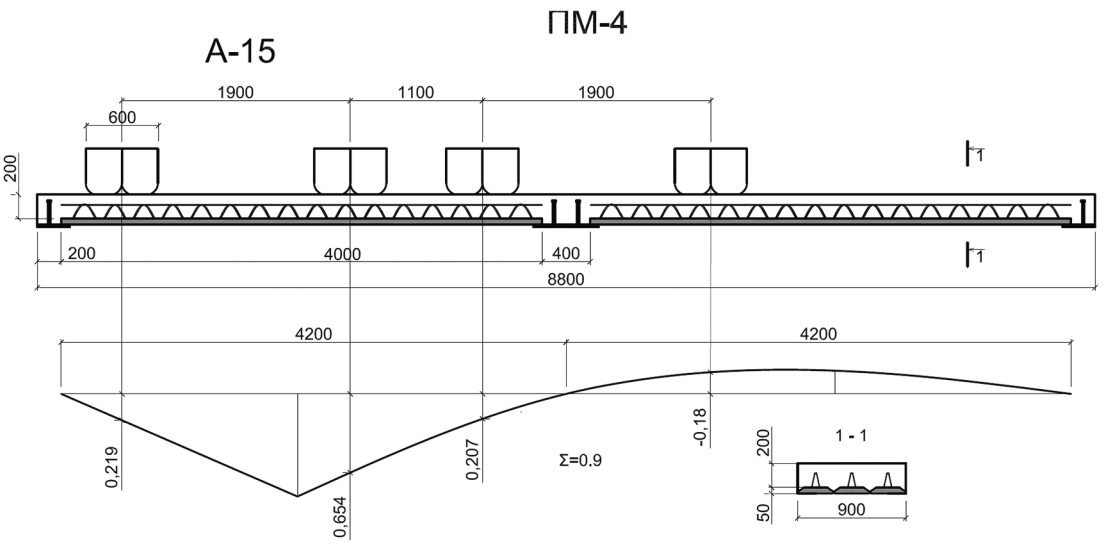
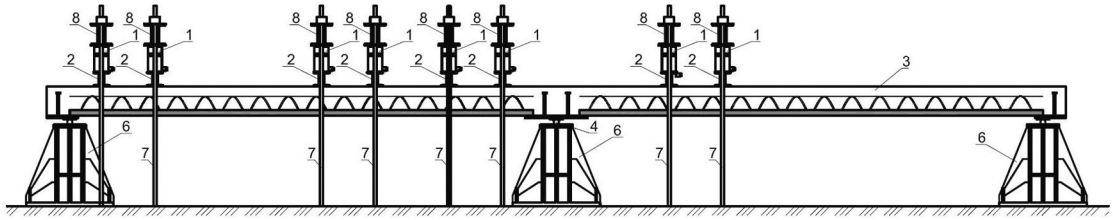


Рисунок 1 — Схема випробувань зразка плити проїзної частини ПМ-4

Випробування здійснене вісьмома зосередженими силами, кожні дві сили моделюють навантаження від одного колеса тандему АК. У результаті змодельоване навантаження від чотирьох коліс, а саме, двох тандемів АК, з відстанню між осями коліс 1 900 мм та відстанню між осями тандемів 3 000 мм. За навантажувальний пристрій правили 50-тонні гідравлічні домкрати у комплекті з насосною станцією. При випробуванні проводили визначення прогинів плити під навантаженням.

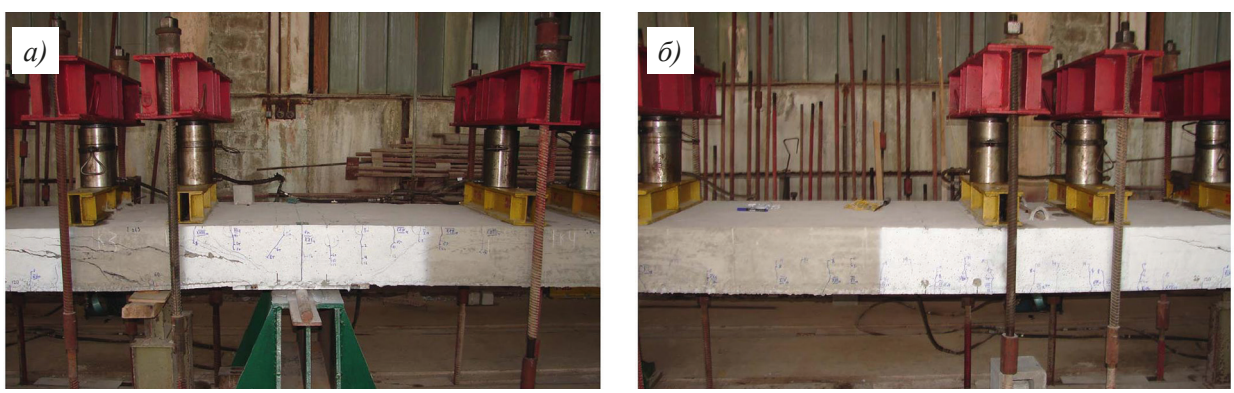
Характер руйнувань показано на **рис. 4**.



1 — гідравлічний домкрат 50 тонн;
2 — розподільча траверса;
3 — дослідний зразок;
4 — нерухома опора;
5 — рухома опора;
6 — опорна тумба;
7 — тяга;
8 — верхня упорна траверса.

Рисунок 2 — Стенд для випробування зразків залізобетонних плит проїзної частини ПМ-4

Рисунок 3 — Загальний вигляд випробувальної установки



а) розкриття похилої тріщини на центральній опорі;
б) тріщиноутворення по центру прогону 2-1.

Рисунок 4 — Характер руйнування зразків серії ПМ-4

Так само проводились випробування зразків ПМ-5. Характер руйнування показано на **рис. 5**.

а) похилі тріщини в районі опори 1 зі сторони А;
б) руйнування ребра в приопорному перерізі зі сторони Б.

Рисунок 5 — Характер руйнування зразків серії ПМ-5

У вітчизняній практиці при лабораторних дослідженнях і натурних випробуваннях будівельних конструкцій для вимірювання відносних деформацій і переміщень, а також для візуального спостереження за утворенням і розвитком тріщин використовують механічні прилади, тензодатчики, оптичні мікроскопи тощо. При випробуваннях зразків, елементів конструкцій, моделей чи натурних конструкцій для визначення відносних переміщень (а, отже, і напружень) у досліджуваних зразках найчастіше застосовують компаратори, встановлені на базі індикатори годинникового типу та тензорезистори; при цьому їх основним недоліком є те, що відносні деформації вимірюються локально, між двома точками, що не дає можливості аналізу просторового напружено-деформованого стану. Часто фіксувати складний напружено-деформований стан лабораторних зразків та будівельних конструкцій із використанням традиційних методів досліджень досить важко, тому розробляються методи, які б давали можливість у процесі досліджень отримувати повну картину деформування.

Існує метод оптико-цифрової спекл-кореляції зображень, який широко застосовується в різних задачах механіки і дозволяє безконтактно вимірювати повне поле переміщень та деформацію різноманітних об’єктів [3]. Двовимірний метод цифрової кореляції зображень (ЦКЗ) дозволяє вимірювати деформації на площинах і навіть заокруглених поверхнях (за допомогою спеціальних алгоритмів розрахунку) [4].

Як представник неінтерферометричної оптичної техніки (не потребує спеціального освітлення досліджуваної поверхні), метод ЦКЗ отримав визнання і широко використовується як потужний і гнучкий інструмент для вимірювання деформації поверхні в галузі експериментальної механіки деформованого твердого тіла. Він забезпечує отримання повного поля зміщень і деформацій у зоні вимірювань завдяки порівнянню цифрових зображень поверхні зразка недеформованого та деформованого стану відповідно. ЦКЗ є оптичним вимірюванням на основі цифрової обробки зображень і числових обчислень.

Цей оптичний метод ґрунтується на цифровій обробці за відповідним алгоритмом ряду зображень поверхні зразка, отриманих за відомих значень зусилля навантаження за допомогою фотокамери [5]. На кожному наступному зображенні по відношенню до попереднього визначають переміщення поверхні в межах фрагмента, а віднісши величину переміщення до розміру фрагмента, встановлюють значення деформації (**рис. 6**). Метод дозволяє визначати поля деформацій двох складових відносних деформацій ε_{xx} і ε_{yy}.

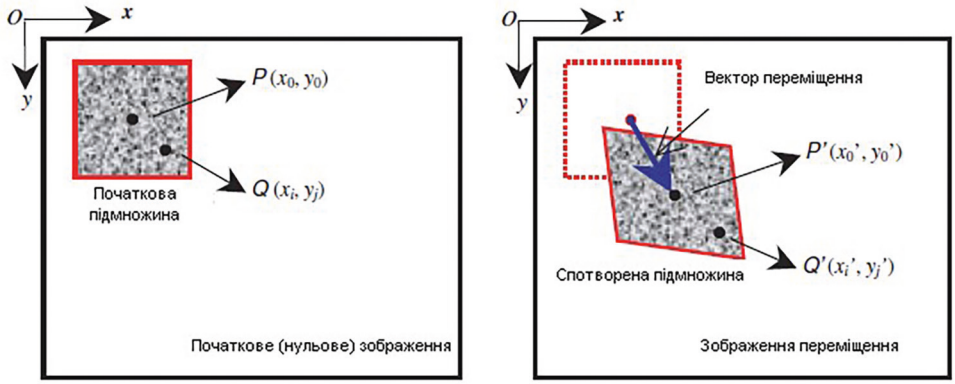


Рисунок 6 — Схематичне зображення розрахункової підмножини дослідної ділянки до і після деформації: *P*, *Q* — точки підмножини з координатами *x*, *y*

Приклад нанесеного на поверхню призми рисунка із маркерами показано на **рис. 7**.

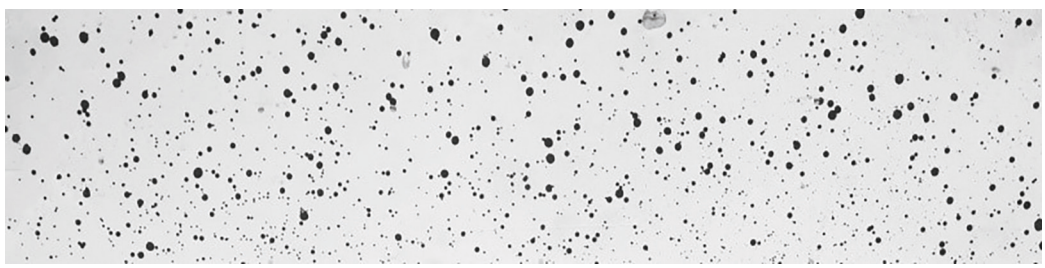


Рисунок 7 — Приклад нанесеного на поверхню призми рисунка із маркерами

Для потреб лабораторних випробувань переважно вистачає двовимірного ЦКЗ. Необхідно лише правильно підібрати оптику відповідно до дослідної ділянки та забезпечити достатнє освітлення.

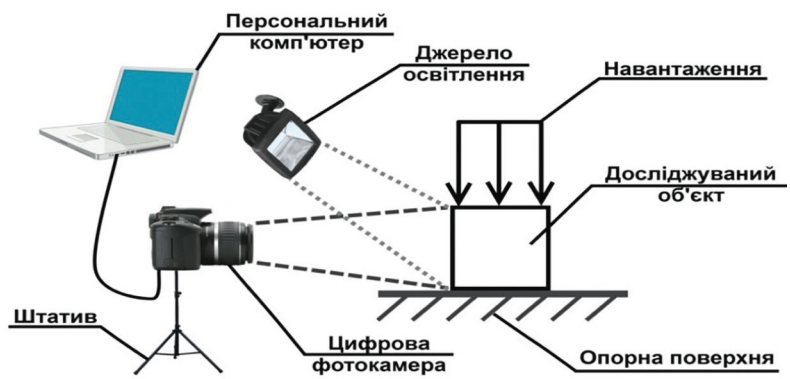


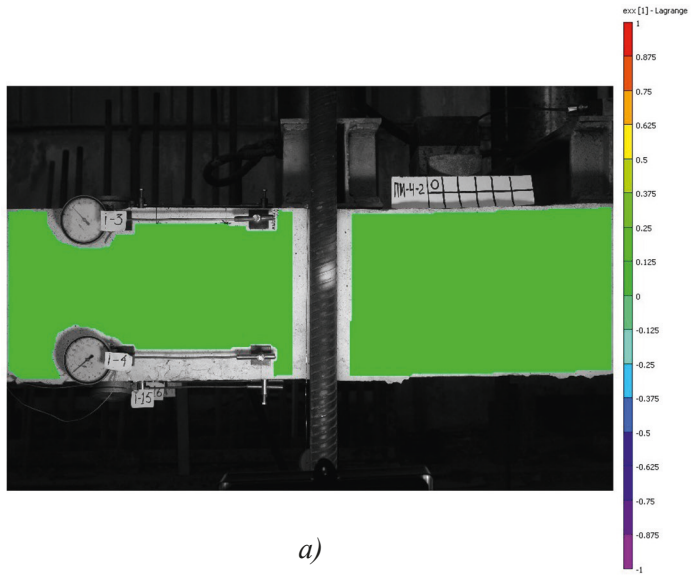
Рисунок 8 — Схема застосування методу цифрової кореляції зображень

Специфічне програмне забезпечення дозволяє порівнювати фотографії досліджуваної поверхні і визначати абсолютні та відносні переміщення маркерів, будуючи відповідні ізополя переміщень, та (при потребі) отримувати відомості про переміщення вказаних точок на досліджуваній поверхні. Для зручності ізополя будуються на базі вказаної користувачем фотографії. При випробуваннях бетонних призм на одноосьовий стиск та чотириточковий згин

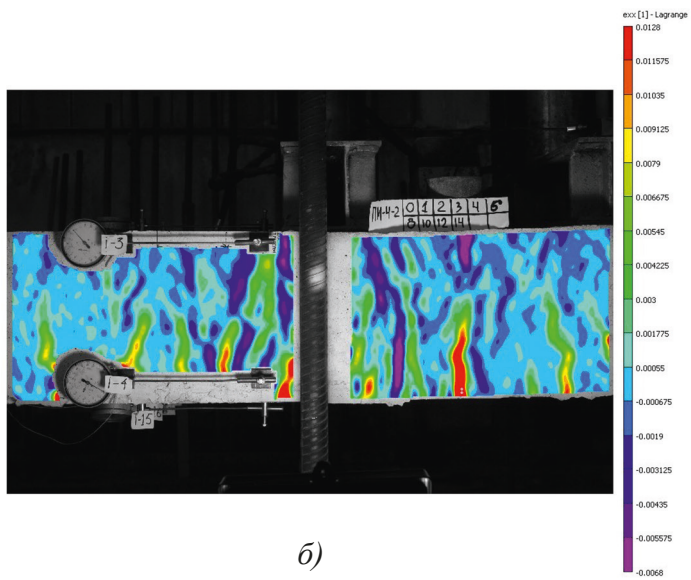
це дозволяє отримати уточнені дані про напружено-деформований стан та побудувати уточнену діаграму «$\sigma - \varepsilon$».

Первинна обробка отриманих даних велась у програмному комплексі Ncorr, створеному в середовищі MathLab [6]. Аналіз отриманих результатів первинної обробки дозволив зробити висновок про збіжність цих результатів із даними, отриманими за допомогою індикаторів годинникового типу, встановлених на досліджувані зразки, та із загальною картиною руйнування зразків (наприклад, концентрація максимальних переміщень у зонах тріщиноутворення). Приклади первинної обробки — порівняння «першої» фотографії (при нульовому навантаженні) та «останньої» (при останньому зафіксованому рівні навантаження).

Приклад використання цього методу на зразках ПМ-4 та ПМ-5 показано на **рис. 9** та **рис. 10**.



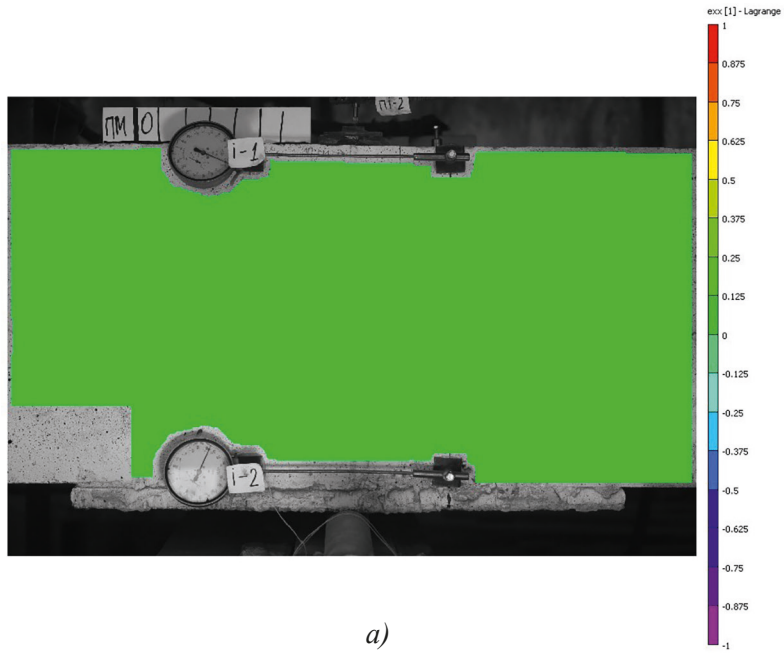
а)



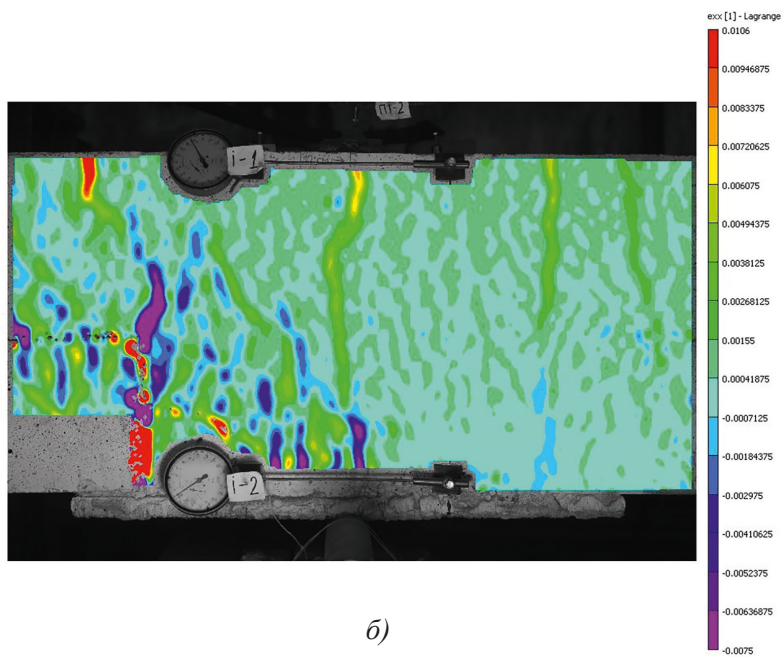
б)

а) початкові переміщення;
б) переміщення при навантаженні 14 т на домкрат.

Рисунок 9 — Приклад побудови ізополів переміщень зразка ПМ-4



а)



б)

а) початкові переміщення;
б) переміщення при навантаженні 14 т на домкрат.

Рисунок 10 — Приклад побудови ізополів переміщень зразка ПМ-5

Результати випробувань корелюються з натурними вимірами за деформаціями, а також за розкриттям тріщин. Деякі тріщини навпаки можна було відстежити тільки за допомогою використаного методу, що, у цілому, дає можливість широкого його застосування.

Використання методу оптико-цифрової спекл-кореляції зображень дає можливість дослідити зміну відносних деформацій і переміщення окремих точок або ділянок при дослідженні бетонних поверхонь. Це, у свою чергу, дозволяє дослідити місця та характер утворення тріщин і дає змогу практичного використання — при експертизі існуючих конструкцій можливо зафіксувати місця утворення майбутніх тріщин і відносні деформації окремих ділянок.

На прикладі зразка плити ПМ-4 за допомогою методу визначено, що розрахункова міцність контактного шва збірної незнімної опалубки із зовнішнім армуванням забезпечена, що не зовсім можна сказати про плити ПМ-5 (ребриста плита, що об'єднується з монолітним бетоном тільки за рахунок шорсткості поверхні збірної плити), на **рис. 9, б**) при максимальному навантаженні видно відрив контактного шва по контуру збірної плити. Хоча треба зауважити, що максимальне руйнівне навантаження майже вдвічі перевищує розрахункове.

Список літератури

1. Кот Д.В., Коваль М.П. Незнімна залізобетонна опалубка для плит проїзної частини мостів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник*. Вип. 93. Київ, 2015. С. 98–115.
2. Бліхарський, Я. З., Павлів, А. П. Побудова повної діаграми напруження-деформації бетону, використовуючи кореляцію цифрового зображення. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(7 (111). P. 37–44. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234131.
3. Malesa M., Szczepanek D., Kujawińska M., Świercz A., Kołakowski P. Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique. DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014.
4. Максименко О. П. Вимірювання деформацій циліндричних зразків методом цифрової кореляції спекл-зображень. *Information Extraction and Process*. 2009. Issue 31 (107). Київ. 2009. С. 4–25.
5. Schreier H. W. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics . USA. 2003. 348 p.
6. J. Blaber, Antonia Antoniou. Ncorr. Instruction Manual. Version 1.1, 1/6/2014. *Georgia Institute of Technology.* URL: http://www.ncorr.com/download/ncorrmanual_v1_1.pdf (дата звернення: 27.07.2022).

References

1. Kot D.V., Koval M.P. Neznimna zalizobetonna opalubka dlia plyt proiznoi chastyny mostiv [Fixed reinforced concrete formwork for the slabs of the carriageway of bridges]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. Iss*. 93. Kyiv, 2015. P. 98–115 [in Ukrainian].
2. Blikharskyi, Ya. Z., Pavliv, A. P. Pobudova povnoi diahramy napruzhennia-deformatsii betonu, vykorystovuiuchy koreliatsiiu tsyfrovoho zobrazhennia. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(7 (111). P. 37–44. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.2341313 [in Polish].
3. Malesa M., Szczepanek D., Kujawińska M., Świercz A., Kołakowski P. Monitoring of civil engineering structures using Digital Image Correlation technique. DOI: https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014 [in English].
4. Maksymenko O. P. Vymiriuvannia deformatsii tsylindrychnykh zrazkiv metodom tsyfrovoi koreliatsii spekl-zobrazhen [Measurement of deformations of cylindrical samples by the method of digital correlation of speckle images]. *Information Extraction and Process*. 2009. Issue 31 (107). Kyiv. 2009. P. 14–25 [in Ukrainian].

5. Schreier H. W. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics . USA. 2003. 348 p. [in English].

6. J. Blaber, Antonia Antoniou. Ncorr. Instruction Manual. Version 1.1, 1/6/2014. *Georgia Institute of Technology.* URL: http://www.ncorr.com/download/ncorrmanual_v1_1.pdf (Last accessed: 27.07.2022) [in English].

Dmytro Kot, *https://orcid.org/0000-0003-2790-1119*

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

TESTING OF MODELS OF BRIDGE DECK SLABS OF BRIDGES WITH REINFORCED CONCRETE FIXED FORMWORK BY THE METHOD OF OPTICAL-DIGITAL SPECKLE-CORRELATION OF IMAGES

Abstract

Introduction. The article examines the testing method of monolithic slabs of bridges deck with permanent reinforced concrete formwork [1] using the method of optical-digital speckle-correlation of images [2].

Problem statement. A promising direction in cast-in-situ bridge construction is using of various types of permanent formwork during slab concreting. However, using of such formworks has not been studied much till today. Therefore, it is advisable to conduct a test of full-scale models of slabs. In domestic practice, mechanical devices, strain gauges, optical microscopes, etc. are used during laboratory studies and field tests of building structures to measure relative deformations and movements, as well as to visually observe the formation and development of cracks. All these devices require constant checking and maintenance and it is not always possible to do this. However, for the needs of laboratory tests with the method of optical-digital speckle correlation of images, a digital image of the object at different load levels is mostly sufficient. It is only necessary to choose the right optics according to the experimental area and ensure sufficient lighting.

Purpose. The purpose of the work was in experimentally determining of the expediency of using the optical-digital speckle-correlation method of images in the models testing.

Metods of study. According to the results of exploratory researches, it is proposed to apply the method of optical-digital speckle correlation of images.

Results. The expediency of using the method of optical-digital speckle-correlation of images in the investigation of bridges deck models has been established.

Conclusions. Using the method of optical-digital speckle-correlation of images makes possible to investigate the change of relative deformations and the movement of individual points or areas during the study of concrete surfaces. This, in turn, allows to investigate the places and nature of the formation of cracks and enables practical use - during the examination of existing structures, it is possible to record the places of future cracks and the relative deformations of individual areas.

Keywords: bridge span, reinforced concrete bridge deck slab, fixed formwork, optical-digital speckle-correlation.