

УДК 624.012:69.07

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПУАССОНА ДЛЯ БЕТОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДИКИ ЦИФРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ

Канд. техн. наук Я. З. Бліхарський

DETERMINATION OF THE POISSON'S RATIO IN CONCRETE BY USING DIGITAL IMAGE CORRELATION

PhD (Tech.) Y. Blikharskyu

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень бетонних призм та визначення коефіцієнта Пуассона, використовуючи методику цифрової кореляції зображення. Для визначення деформацій із застосуванням методики цифрової кореляції зображення використано дві камери Grasshopper 3 фірми Flir. Деформації для кореляції зображень записано зі швидкістю 250 мс. Для освітлення використано дві LED лампи. Оскільки прес не має можливості запису навантаження в часі, то для запису навантаження застосовували камеру зі швидкістю 50 кадр./с. У результаті отримано «напруження-деформації» для бетонної призми в поздовжньому та поперечному напрямках і визначено коефіцієнт Пуассона для бетону класу C50/60.

Ключові слова: коефіцієнт Пуассона, кореляція цифрового зображення, експериментальні випробування, відносні деформації, напруження.

Abstract. The article presents the results of the experimental investigation of concrete prisms and determination of the Poisson's ratio using the method of digital image correlation (DIC). To achieve the goals and objectives of the research, a concrete prism measuring 100x100x400 mm of class C50 / 60 was formed. The surface of the prism was cleaned and levelled to a smooth surface with a mechanical device and grinding stone. The surface of the prism is then cleaned with a solvent to remove dust residues. After that, speckles were applied to determine the strain using the DIC method. For determine the strain, by using digital image correlation, were used Two Flir Grasshopper 3 cameras with a Computar F25 / 2.8 lens and a Sigma 70-200 mm f2.8 APO EX DG HSM Macro II lens. Stains for image correlation were recorded at a speed of 250 ms. 2 LED lamps were used for lighting. Since the press is not able to record the load in time, to record the load used a camera at a speed of 50 frames/sec. The load was applied evenly at the same rate to the physical destruction of the test samples. As a result, the images were processed using VIC-2D software to obtain vertical and transverse strains. The advantage of the image correlation method is the ability to obtain deformations and, accordingly, the stress of the full surface of the sample. Thus, if we analyse the horizontal (transverse) stresses for a prism with a concrete strength of C50 / 60, it is possible to see the appearance of internal cracks in the sample before it occurs outside, at a time when cracks cannot be visually fixed. As a result of work the technique of testing of concrete samples with use of digital correlation of the image is developed and presented. The Poisson's ratio from the beginning of loading to the destruction of the sample was determined experimentally by the developed method.

Keywords: Poisson's ratio, digital image correlation, experimental tests, strain, stress.

Вступ. Визначенням повздовжніх і поперечних деформацій бетону вчені займались з 1970-х років [1]. Зокрема, у праці [2] 1964 року для побудови повної діаграми руйнування бетону використовували спеціально попередньо підготовлені циліндри. Для визначення деформацій бетону застосовували мікроіндикатори та спеціально підготовлену установку. Також в Японії у 2004 році опубліковано результати експериментальних досліджень для визначення деформацій бетону [3]. У даному дослідженні використовували LVDT датчики та спеціально підготовлену установку.

За спільної роботи України та Польщі були випробувані бетони класу C50/60 [4] на двох різних пресах з жорстким режимом навантаження. Першу частину досліджень виконували у Варшаві на спеціально підготовленій установці Instron 8806. Ця машина оснащена високожорсткою рамою, що дає змогу високоточного вирівнювання, та гідравлічними пристроями для контролю подачі навантаження. Прес використовує вдосконалені пристрої для цифрового контролю та датчики навантаження, що дає змогу побудови повної діаграми руйнування бетону. Проте всі ці способи вимагають спеціально підготовлених складних високовартісних дослідних машин для таких випробувань. Із введенням нових нормативних документів в Україні [5–7], які базуються на європейських нормах [8], актуальним питанням є вивчення нових способів визначення деформацій бетону. Особливо це актуально для високоміцних бетонів, оскільки руйнування є раптовим і може спричинити пошкодження закріплених приладів на випробувальних зразках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком технологій з'явився новий спосіб для контролю деформацій. На сьогодні стає більш популярною методика використання цифрової кореляції зображення (digital image correlation) [9, 10]. Метод цифрової кореляції зображень (DIC) зазвичай використовують при дослідженні

напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, зокрема широко застосовуються в механіці руйнування сталевих конструкцій [11, 12]. Ведуться дослідження для використання цифрової кореляції зображень при дослідженні бетону та залізобетонних конструкцій [13, 14].

Метод цифрової кореляції зображень (DIC) зазвичай використовується при дослідженнях напруженого стану будівельних конструкцій як один з неінтерферометричних методів [15]. Він широко обговорювався в наукових працях [13–15] як методика поєднання теоретичного підходу з параметрами контрольованої точності та експериментальних даних для поглибленого аналізу конструкції. Таким чином, надійну модель поведінки конструктивного елемента можна отримати для подальших чисельних обчислень або практичного використання.

Загалом метод DIC можна охарактеризувати як оптичне вимірювання з цифровою обробкою зображень та чисельними розрахунками [9, 10, 12]. Його широка доступність може пояснюватися великою кількістю спеціального програмного забезпечення, як VIC (Correlated Solutions Company), ARAMIS (GOM Company) та інші, а також простотою його використання. Для цієї методики потрібна цифрова камера з високою якісною цифровою матрицею та особливий рисунок хаотично розміщених чорних точок на досліджуваній поверхні (спектли). Приклад основної схеми методу DIC для циліндричного зразка, випробуваного на розтяг, наведено на рис. 1 у праці [17].

Як було заявлено в праці [17], метод заснований на порівнянні відносних переміщень точок поверхні, зроблених на конкретному етапі, і дозволяє визначити як відносні компоненти деформацій, так і отримати повне поле переміщень та деформацій в зоні вимірювання.

Хоча існує ціла низка очевидних переваг методу цифрової кореляції зображень, все ж існують певні проблеми,

які необхідно враховувати при виборі такого підходу для експериментального дослідження. Таким чином, праці вчених [18–20], які протягом останніх років проводили дослідження, спрямовані на розроблення методу DIC з метою підвищення його точності. Наприклад, дослідження [18] було спрямоване на виявлення найбільш оптимальної техніки перетворення зображень. Було показано, що власний метод демосайсингу на основі бікубічної кривої перевершує інші методи з точки зору точності та приглушення випадкових помилок.

У роботі [19] автори роблять спробу вдосконалити метод, досліджуючи нову комплексну кореляційну функцію як комбінацію чистої кореляційної функції інтенсивності, функції градієнтної кореляції та гессівської кореляційної функції і масштабів, щоб зменшити випадкову помилку вдвічі. За даними [20], рівняння невизначеності в процесі кореляції можуть бути зменшені шляхом введення механізованої регуляризації. В результаті можна отримати значне спрощення та зменшення помилок.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є визначення експериментальним шляхом зміни коефіцієнта Пуассона для бетону залежно від навантаження. Для досягнення мети роботи було поставлено такі завдання:

- розробити методику визначення коефіцієнта Пуассона для бетону з використанням методу цифрової кореляції зображення;

- виконати експериментальні випробування призм і визначити коефіцієнт Пуассона залежно від навантаження.

Основна частина дослідження

Методика експериментальних досліджень. Для досягнення мети та завдань дослідження було сформовано бетонну призму розміром 100x100x400 мм класу C50/60. Поверхню призми очищено та вирівняно до гладкої поверхні за допомогою болгарки та шліфувального каменю. Потім поверхню призми очищено розчинником для видалення залишків пилу. Після цього аерозольним спреєм (рис. 1) наносились спектли для визначення деформацій за допомогою ЦКЗ методу.



Рис. 1. Нанесені спектли на бетонній призмі

Для визначення деформацій з використанням методики цифрової кореляції зображення застосовано дві камери Grasshopper 3 фірми Flir з об'єктивами Computar F25/2.8 та Sigma 70-200 mm f2.8 APO EX DG HSM Macro II. Деформації для кореляції зображень записували зі

швидкістю 250 мс. Для освітлення використано дві LED лампи. Оскільки прес не має можливості запису навантаження в часі, то для запису навантаження додатково застосовано камеру зі швидкістю 50 кадр./с. Загальний вигляд дослідної установки зображено на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд дослідної установки

Навантаження прикладали рівномірно з однаковою швидкістю до фізичного руйнування дослідних зразків.

Результати експериментальних випробувань. В результаті зображення були оброблені за допомогою програмного забезпечення VIC-2D для отримання вертикальних і поперечних деформацій. Перевагою методу кореляції зображення є можливість одержати деформації та відповідно напруження повної поверхні дослідного зразка.

Таким чином, якщо аналізувати горизонтальні (поперечні) напруження для бетонної призми класу C50/60, то можна побачити появу внутрішніх тріщин зразка до її виникнення ззовні, тобто в момент, коли візуально тріщини ще не зафіксуються (рис. 3).

Як наслідок отримано деформації при відповідних напруженнях для бетонної призми в повздовжньому та поперечному

напрямах (табл. 1). Для визначення відносних деформацій, за методикою цифрової кореляції зображення, було встановлено віртуальні екстензометри в програмному комплексі в межах середини зразка та на базі 200 мм.

Коефіцієнт Пуассона визначено як відношення поперечних до повздовжніх деформацій, за ДСТУ Б В.2.7-217:2009.

Експериментальні результати визначення коефіцієнта Пуассона на всіх етапах навантаження подано графічно на рис. 4.

В результаті досліджень встановлено, що коефіцієнт Пуассона для бетону класу C50/60 в діапазоні напружень 0...30 МПа складає 0.25...0.4, в діапазоні 30...40 МПа – 0.4...0.5, а в діапазоні 40...44.8 МПа – 0.5...0.75. Після руйнування на низхідній вітці коефіцієнт Пуассона зростає від 0.75 до 3.0.

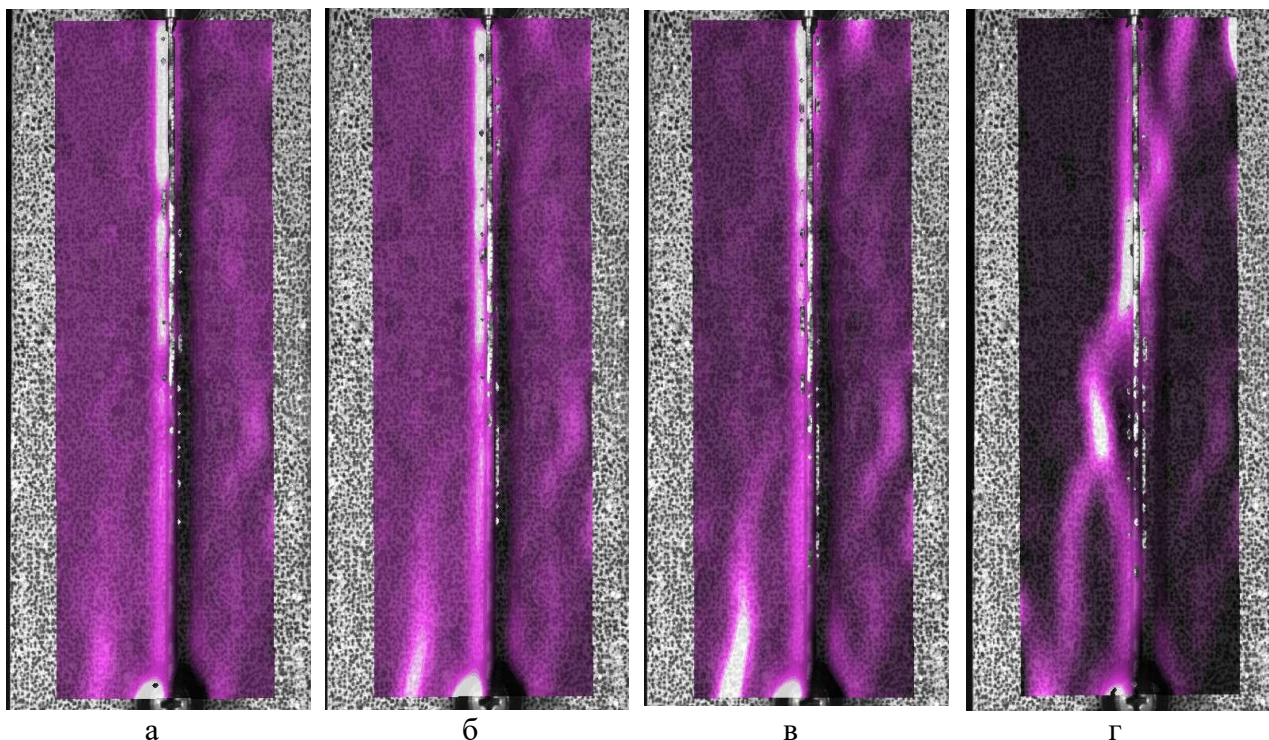


Рис. 3. Характер розподілу поперечних деформацій та появи внутрішніх тріщин: а – при навантаженні 40 МПа; б – при навантаженні 40.5 МПа; в – при навантаженні 41 МПа; г – при навантаженні 42 МПа

Таблиця 1

Напруження-деформації дослідної бетонної призми

Напруження, МПа	Вертикальні деформації, ε_1	Поперечні деформації, ε_2	Коефіцієнт Пуассона, ν
0	0	0	0
9.375	0.00033	0.000128	0.387379
15	0.000499	0.000188	0.376633
20.5	0.000677	0.00018	0.266284
24.625	0.000811	0.000307	0.378676
30.875	0.000995	0.000418	0.419885
34.125	0.001139	0.000483	0.423959
38	0.001247	0.000607	0.486824
40.5	0.001317	0.00072	0.546663
42.75	0.001487	0.000769	0.517011
44.75	0.001642	0.001184	0.720981
44.875	0.001719	0.001399	0.81416

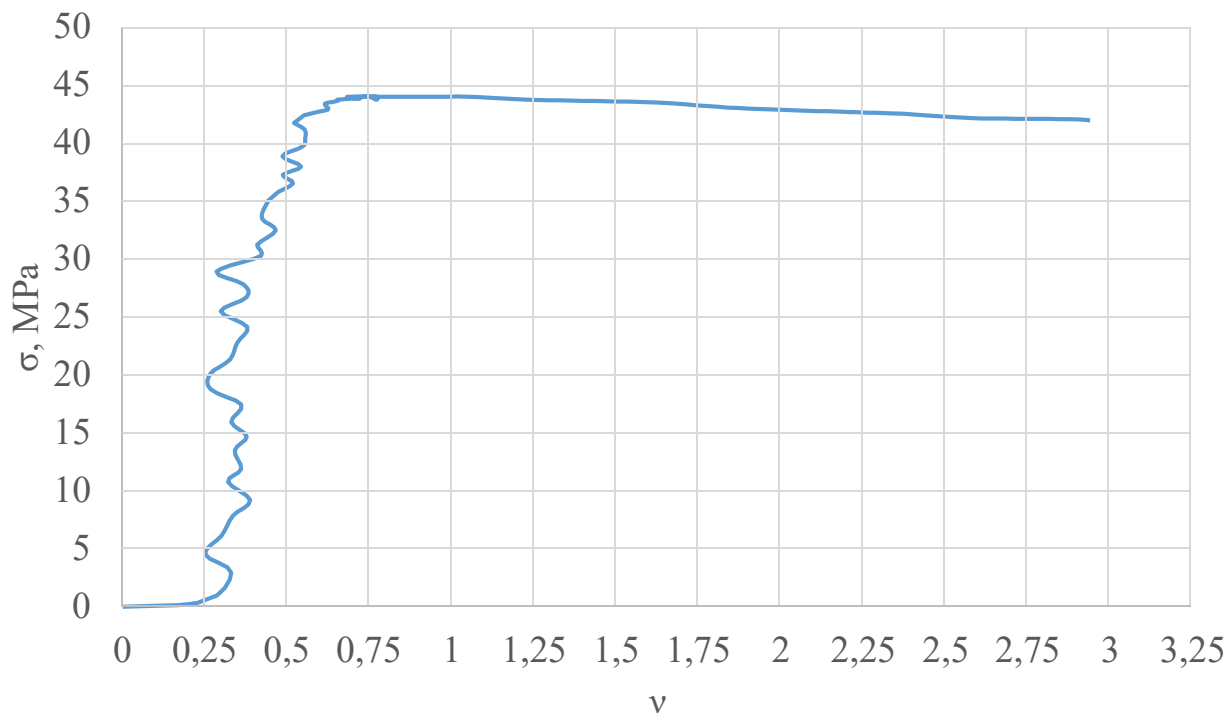


Рис. 4. Графік зміни коефіцієнта Пуассона залежно від навантаження

Висновки. В результаті дослідження розроблено та апробовано методику випробування бетонних зразків з використанням цифрової кореляції

зображення. Експериментальним шляхом за розробленою методикою визначено коефіцієнт Пуассона бетону від початку навантаження до руйнування зразка.

Список використаних джерел

1. Popovics S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*. 1973. № 3(5). P. 583–599. doi:10.1016/0008-8846(73)90096-3.
2. Barnard P. R. Researches into the complete stress-strain curve for concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1964. № 16(49). P. 203–210. doi:10.1680/mac.1964.16.49.203.
3. Watanabe K., Niwa J., Yokota H., Iwanami M. Experimental Study on Stress-Strain Curve of Concrete Considering Localized Failure in Compression. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004. № 2(3). P. 395–407. doi:10.3151/jact.2.395.
4. Дослідження деформативних властивостей бетону класу C50/60 з урахуванням низхідної вітки деформування / М. Дохойда, Є. М. Бабич, С. В. Філіпчук, В. В. Савицький. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2019. № 37. С. 175–183.
5. Babych E. M. Calculation and construction of reinforced concrete beams. NUVGP. 2017. № 2. 191 p.
6. Розрахунок позакентрово стиснутих гнучких залізобетонних елементів за методом реальної кривизни / А. М. Бамбура, О. В. Дорогова, І. Р. Сазонова, В. М. Богдан. *Наука та будівництво*. 2018. № 3. С. 10–20.

7. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
8. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings [Final Draft, Dec. 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p.
9. Lavatelli A., Turrisi S., Zappa E. A motion blur compensation algorithm for 2D DIC measurements of deformable bodies. *Measurement Science and Technology*. 2018. № 30(2). 025401. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf31a>.
10. Zappa E., Hasheminejad N. Digital image correlation technique in dynamic applications on deformable targets. *Experimental Techniques*. 2017. № 41(4). P. 377–387. URL: <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0184-3/>
11. Mai B. V., Pham C. H., Hancock G. J., Nguyen G. D. Block shear strength and behaviour of cold-reduced G450 steel bolted connections using DIC. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. № 157. P. 151–160. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.025>.
12. Tung S. H., Shih M. H., Kuo J. C. Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing. *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. № 48(5). P. 636–641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.09.011>.
13. Fayyad T. M., Lees J. M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture. *Procedia Materials Science*. 2014. № 3. P. 1585–1590. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>.
14. Kozicki J., Tejchman J. Application of DIC technique to concrete-study on objectivity of measured surface displacements. *Experimental Mechanics*. 2013. № 53(9). P. 1545–1559. URL: <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9781-y>.
15. Sutton M. A., Cheng M., Peters W. H., Chao Y. J., McNeill S. R. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*. 1986. № 4(3). P. 143–150.
16. Ústav materialov a mechaniky strojov. Slovenska Akademia. URL: <http://www.umms.sav.sk/6606-sk/deformation-behaviour-of-materials-studied-by-digital-image-correlation-method/> (Accessed on 05.02.2020).
17. Schreier H. W. Investigation of two and three-dimensional image correlation techniques with applications in experimental mechanics. *University of South Carolina*. 2003. 348 p.
18. Forsey A., Gungor S. Demosaicing images from colour cameras for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2016. 86. P. 20–28.
19. Sjö Dahl M. Gradient Correlation Functions in Digital Image Correlation. *Applied Sciences*. 2019. № 9(10). P. 21-27.
20. Tomicevic Z., Roux S., Hild F. Mechanics-Aided Digital Image Correlation. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design SAGE Publications*. 2013. № 48. P. 330–343.

Бліхарський Ярослав Зіновійович, канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка». ORCID ID: 0000-0002-3374-9195. Тел.: (099) 74-54-550. E-mail: yaroslav.z.blikharskyu@lpnu.ua.

Blikharskyu Yaroslav, PhD CEng, associate prof. of department of highways and bridges, Lviv Polytechnic National University. ORCID ID: 0000-0002-3374-9195. Tel.: (099) 74-54-550. E-mail: yaroslav.z.blikharskyu@lpnu.ua.

Статтю прийнято 10.03.2021 р.