

НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ПОШКОДЖЕНИХ КАМ'ЯНИХ СТОВПІВ

BEARING CAPACITY OF COMPRESSED PILLARS

Клименко Є.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4502-8504,
Гриньова І.І., к.т.н., ст.. викладач, ORCID: 0000-001-7637-6029, (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Klymenko Y.V., Doctor of Engineering Science, Professor, ORCID: 0000-0002-4502-8504, **Grynyova I.I.**, Assistant, ORCID: 0000-001-7637-6029 (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

Проведені дослідження роботи позацентровостиснутих кам'яних стовпів, які отримали пошкодження в процесі експлуатації. На підставі результатів виконаного планування експерименту, проведених натурних лабораторних досліджень розроблена розроблена методика розрахунку, що базується на основних положеннях чинних норм та розширює їх дію у випадку пошкодження.

The main goal of the research is to develop a calculation model for determining the residual bearing capacity of compressed stone elements of damaged cross-section. In the laboratory, 15 prototypes with pre-modeled damage were manufactured and tested. From the selected variation, factors most affect the carrying capacity proved parameters characterizing element damage eccentricity affects secondary. According to the estimates of the experimental statistical model and single-factor local fields, the depth of damage in the cross section of the column has the greatest impact on the bearing capacity. A calculation model was created to determine the residual bearing capacity of damaged structures of rectangular cross section and the height of the compressed zone (x) and the area of the compressed zone (A_c). At its core, the model is based on the basic assumptions of existing building codes. The article presents two generalized types of damages according to the type of shape: direct damage - when the inclination angle of the damage front is zero and oblique damage - when the inclination angle of the damage front is not zero.

Compound equilibrium equations by a joint solution allow to obtain the residual bearing capacity of damaged stone structures. On the basis of the obtained results it is possible to establish the actual technical condition of structures and the possibility of their further operation by calculation or to establish the need for reinforcement.

Ключові слова: натурні випробування, позацентровий стиск, пошкодження, експлуатація, розрахунок, залишкова несуча здатність
field tests, eccentric compression, damage, operation, calculation, residual carrying capacity.

Вступ. Основною проблемою при визначенні технічного стану пошкоджених конструктивних елементів будівель є надійне визначення їх залишкової несучої здатності.

У чинних нормативних документах немає конкретних рекомендацій щодо розрахунку пошкоджених предметів. У зв'язку з цим виникає ряд проблем, які необхідно вирішити. Однією з проблем є створення методів розрахунку та оцінки несучої здатності пошкоджених ексцентрично стиснених кам'яних стовпів; на основі цієї проблеми приймається та чи інша схема реконструкції або посилення.

Відомо, що існуючий метод розрахунку кам'яних конструкцій для першої групи граничних станів має достатньо високу надійність і базується на експериментально-теоретичних дослідженнях, проведених для центрально та ексцентрично стиснених елементів. Рекомендації щодо розрахунку несучої здатності пошкоджених стиснених елементів у існуючих стандартах відсутні.

Аналіз попередніх досліджень. Існуючі теорії міцності не можуть бути використані через складний напружено-деформований стан кладки, тому майже всі дані базуються на результатах обробки великої кількості експериментальних даних (неруйнівних [1-4, 10-12] та руйнівних метод [7-9, 12-15]) отримав лише емпіричні залежності міцності кладки.

Більшість із них враховують найвпливовіші фактори (міцність каменю та розчину, тип та розміри каменю) [5, 7-9, 15], від яких залежить опір кладки та вплив зміцнення конструкції на несучу ємності [12-14], деякі дослідники моделюють роботу матеріалу в пакетах програмного забезпечення [10-11]. Тим не менш, існуючі залежності міцності кладки мають частковий характер, добре відповідають певним типам кладки та матеріалів і були отримані в ході досліджень на них.

Найбільш вдалимими з них є емпіричні залежності професора Л. І. Оніщика [6], які відображають особливості кладки каменю та розчину, мали найбільше застосування у 30-50-х роках минулого століття. Ці залежності лежать в основі сучасних стандартів і дозволяють отримати точні результати для традиційної кладки на розчинах середньої міцності.

Поява нових типів матеріалів (камінь та розчин), підвищення їх міцнісних характеристик та використання промислових методів виготовлення кладки показали, що залежності професора Л. І. Оніщика не можуть врахувати всіх вищезазначених особливостей.

Проведені останніми роками в Одеській державній академії будівництва та архітектури дослідження ексцентрично стиснених та пошкоджених під час експлуатації кам'яних конструкцій дозволили нам отримати дані для

подальшого опису їх напружено-деформованого стану та розробити методологію розрахунку залишкового вантажопідйомності [7-9].

Мета роботи. Розробити методику розрахунку позацентрово стиснутих кам'яних стовпів, які отримали пошкодження в процесі експлуатації.

Матеріали та методика дослідження. Для реалізації поставлених завдань досліджень в якості базового об'єкта дослідження була розроблена модель кам'яного стовпа.

Для виготовлення зразків використовувалася цегла керамічна рядова повнотіла з маркою за міцністю 100 та маркою за морозостійкістю F-100 Татарбунарського цегляного заводу. Розчин виготовляли з цементу ПЦ – П – Б – Ш – 400 Одеського цементного заводу і піску з модулем крупності – 1,4. Для визначення характеристик міцності цегли були відібрані зразки з партії, що призначались для виготовлення конструкції А саме, 10 цеглин марки М100 – для визначення границі міцності на стиск; та 5 цеглин – для визначення границі міцності на згин.

Дослідження проводились у лабораторії випробувань будівельних матеріалів і виробів Одеської державної академії будівництва та архітектури відповідно до вимог ГОСТ-8462-85. Як уже зазначалося у [5], варіювання параметрів плану експерименту проводилося в досить широкому (з точки зору випадків експлуатації) діапазоні: кут нахилу фронту пошкодження до однієї з головних осей поперечного перерізу становив $\theta = 0^\circ; 22,5^\circ; 45^\circ$; глибина пошкодження $a = 0 \text{ мм}; 80 \text{ мм}; 160 \text{ мм}$ і відносний ексцентриситет $e_0 = 0 \text{ мм}; 80 \text{ мм}; 160 \text{ мм}$ (рис. 1).

При відомих розмірах поперечного перерізу (a, b), а також розмірах ушкодження (a_1, b_1), ексцентриситеті (e_0), куті нахилу лінії фронту пошкодження ($\theta = 0^\circ$), залишаються невідомими залишкова несуча здатність (N), висота стиснутої зони (x), кут нахилу нейтральної лінії до однієї з головних осей неушкодженого поперечного перерізу (γ).



Рис. 1. Випробування дослідного зразка стовпа С 1 1 -1

Результати досліджень. У цій роботі ми розробили метод визначення залишкової несучої здатності пошкоджених стовпів із ексцентрично стисненого каменю, тобто елементів, які були пошкоджені під час роботи. Такий розрахунок буде апріорі перевірятись, і застосування вищезгаданої передумови щодо рівномірного розподілу напружень по площі стислої зони слід вважати виправданим.

Під час розрахунку несучої здатності кам'яних елементів були взяті такі передумови:

1. Напряга в зоні стиснення рівномірно розподілена.
2. Передня частина пошкодження має прямолінійний контур.
3. Прийнята гіпотеза плоских перетинів, тобто після того, як деформація перерізу залишається плоскою, а по висоті поперечного перерізу деформації змінюються лінійно.
4. Центр мас зони стисненої кладки збігається з точкою прикладання розрахункової поздовжньої сили N .
5. Робота розтягнутої зони у сприйнятті зовнішніх сил не враховувалася.

Обґрунтування перших передумов наведено вище. Друга передумова обґрунтована результатами польових перевірок пошкоджених елементів, як найпоширенішого типу руйнування. Третя, четверта та п'ята передумови були взяті з праць Попова М. М. та Забігаєва А. В. [16]. Для визначення несучої здатності ми використовуємо 2 рівняння рівноваги (1), (2), де f_u – розрахунковий опір кладки стисканню, kH/m^2 . У цьому випадку невідома висота стислої зони (x) та площа стислої зони (A_c) визначаються на основі передумови 3.

Вирішуючи задачу, ми використовуємо такі рівняння та залежності (рис. 2).

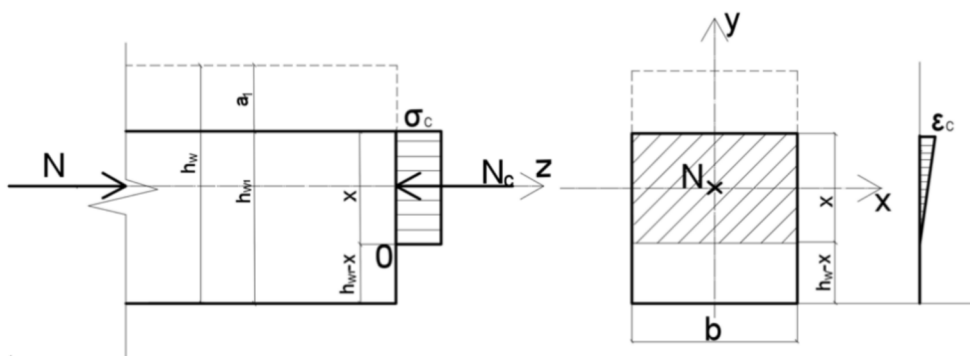


Рис. 2. Схема розрахунку поперечного перерізу ексцентрично стисненого елемента

Умова рівноваги:

$$\sum Z = 0; N - f_u A_c = 0; \quad (1)$$

$$\sum M_0 = 0; N_c \frac{x}{2} = N \frac{x}{2}. \quad (2)$$

В результаті з четвертої передумови приймаються координати центру мас стислої зони щодо основних осей з плоскими пошкодженими перетинами (рис. 3 б, в):

$$x_1 = 0; y_1 = e_0. \quad (3)$$

Центр мас стиснутої зони кам'яного стовпа збігається з точкою докладання зовнішнього стискаючого зусилля.

У даній роботі плоским будемо називати пошкодження, коли фронт його паралельний одній з головних осей перерізу, тобто кут нахилу пошкодження дорівнює нулю (рис. 3, а).

Косе пошкодження має місце тоді, коли фронт пошкодження (в цьому випадку – теж пряма лінія) не паралельний жодній з головних осей перерізу, тобто кут нахилу лінії фронту пошкодження не дорівнює нулю ($\theta \neq 0$) (рис. 4б,в).

Залежно від глибини пошкодження (a_1, b_1) і кута нахилу фронту пошкодження (θ) до осі ($x; y$) розрахунок можна звести до декількох випадків. Випадок I має місце, коли $b_1 < b/2$ (рис.4, б). Якщо $b/2 < b_1 < b$, то це випадок II (рис.4, в).

У цьому випадку, з урахуванням позначення висоти (глибини) пошкодження (a_1) та відстані на якій прикладається зусилля N (e_0), висота стиснутої зони кам'яного стовпа позначена традиційно x . Стиснута зона складної геометричної форми, якщо потрібно поділяється на найпростіші плоскі перерізи. Визначаємо допоміжні геометричні параметри поперечного перерізу (рис. 4а, 4б, 4в).

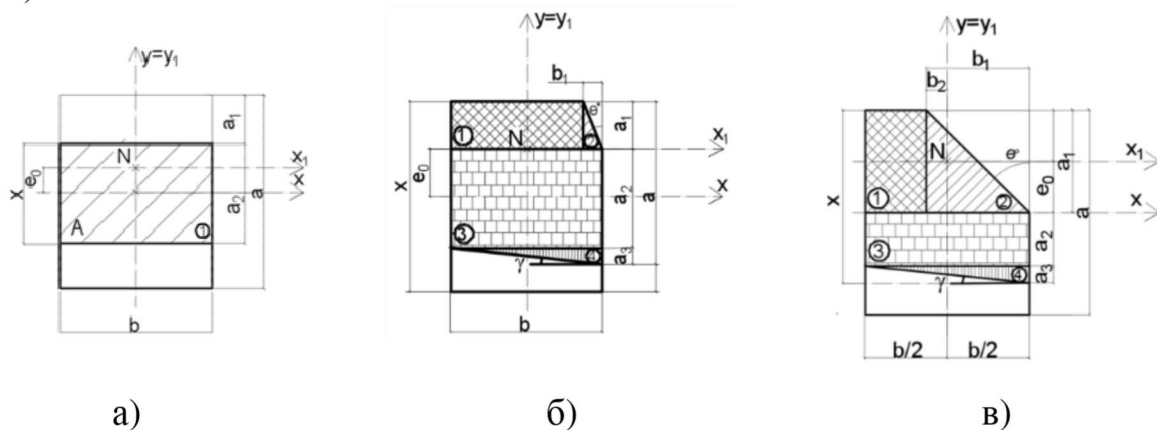


Рис. 4. Поперечний переріз в разі плоского пошкодження:
 а – при $a_1 < a/2, \theta = 0$; б – при $b_1 < b/2, \theta \neq 0$; в – при $b/2 < b_1 \leq b, \theta \neq 0$

Виходячи з умов (1-2), для реалізації четвертої передумови записуємо рівняння статичних моментів та площі стиснутої зони A_c відносно точки прикладання сили, у загальному вигляді для плоского пошкодження:

$$S_x = A_1 y_1 + A_2 y_2 = (x - a_1 - a_3) b \left(\frac{a}{2} - a_1 - \frac{a_2}{2} \right) + \frac{a_2 b}{2} \left(- \left(\frac{a}{2} - (a - x) + e_0 - \frac{2a_3}{3} \right) \right) = 0. \quad (4)$$

$$S_y = A_1 y_1 + A_2 y_2 = \frac{a_3 b}{2} \left(\frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) = 0; \quad (5)$$

$$A_c = A_1 + A_2 = (x - a_1 - a_3) b + \frac{a_3 b}{2}. \quad (6)$$

Виходячи з умов (1), (2), для реалізації четвертої передумови записуємо рівняння статичних моментів та площі стиснутої зони A_c відносно точки прикладання сили, у загальному вигляді при косому пошкодженні:

– при $b_1 < b/2$, $\theta \neq 0$;

$$S_{x_1} = (b - b_1) a_1 \left(\frac{a_1}{2} - e_0 \right) + \left(\frac{a_1 b_1}{2} \left(\frac{a_1}{3} - e_0 \right) \right) + (a_2 b) (a_2 + e_0) + \left(\frac{a_3 b}{2} \left(x - a_1 + e_0 - \frac{2a_3}{3} \right) \right) = 0; \quad (7)$$

$$S_{y_1} = (b - b_1) a_1 \frac{b - (b - b_1)}{2} + \frac{a_1 b_1}{2} \left(\frac{b}{2} - \frac{2b_1}{3} \right) + \frac{a_3 b}{2} \left(\frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) = 0; \quad (8)$$

– при $b/2 < b_1 \leq b$, $\theta \neq 0$;

$$S_{x_1} = (b - b_1) a_1 \left(\frac{a_1}{2} - e_0 \right) + \frac{a_1 b_1}{2} \left(\frac{a_1}{3} - e_0 \right) + a_2 b \left(x - \frac{a_2}{2} - a_3 - (a_1 - e_0) \right) + \frac{a_3 b}{2} \left(x - (a_1 - e_0) - \frac{2a_3}{3} \right) = 0; \quad (9)$$

$$S_{x_1} = (b - b_1) a_1 \frac{b - (b - b_1)}{2} + \frac{a_1 b_1}{2} \left(b_1 - b_2 - \frac{2b_1}{3} \right) + \frac{a_3 b}{2} \left(\frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) = 0. \quad (10)$$

Площа стиснутої зони в обох випадках, знаходиться за виразом:

$$A_c = (b - b_1) a_1 + \frac{a_1 b_1}{2} \left(b_1 - b_2 - \frac{2b_1}{3} \right) + \frac{a_3 b}{2} \left(\frac{b}{2} - \frac{b}{3} \right) \quad (11)$$

Вирішуючи спільно три рівняння, отримаємо площу стиснутої зони A_c . Згідно з першим рівнянням рівноваги (1) знаходимо N , несучу здатність пошкоджених кам'яних стовпів.

Висновки. Сформульовано основні передумови для розрахунку пошкоджених стислих елементів з різними типами пошкоджень та застосування зовнішньої сили. Існують пропозиції щодо розрахунку несучої здатності, що наблизить до справжньої роботи конструкції. Таким чином, необхідно враховувати глибину пошкодження елемента, а також ексцентриситет, до якого прикладена сила. Це стосується визначення положення нейтральної лінії і, отже, висоти стислої зони бетону. Висвітлюються основні справи щодо врегулювання та описуються їх відмінності. Розрахунок за розробленою методикою показав коефіцієнт варіації 8,9%. Таким чином, метод визначення несучої здатності пошкоджених стовпів, описаний у цій роботі.

1. Binda L., Lualdi M., Saisi A. Non-destructive testing techniques applied for diagnostic investigation: Syracuse cat hedralin Sicily, Italy. *International Journal of Architectural Heritage*, 2007. no. 1. P. 380-402.

2. Valente. M., & Milani G. (2016). Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy. *Engineering structures*, 114, 241-270. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.02.004

3. Lacidogna G., Manuello A., Niccolini G., & Carpinteri A. (2015). Acoustic emission monitoring of Italian historical buildings and the case study of the Athena temple in Syracuse. *Architectural Science Review*, 58(4), 290-299. doi: 10.1080/00038628.2012.720246

4. Зимин С.С., Беспалов В.В., Казиминова А.С. Расчетная модель каменной арочной конструкции. Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, 2015. №3(113). С. 33–37.

5. Деркач В.Н. Каменное заполнение каркасных зданий: прочность, жесткость и силовое взаимодействие с каркасом: дис. д-ра тех. наук: 05.23.01. Брест, 2016. 260 с.

Derkach V.N. Kamennoe zapolnenye karkasnykh zdaniy: prochnost, zhestkost y sylovoe vzaymodeistviye s karkasom: dys. d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Brest, 2016. 260 s.

6. Оницкий Л.И. Каменные конструкции промышленных и гражданских зданий. Москва: Государственное издательство строительной литературы, 1939. 215 с.

Onyshchuk L.Y. Kamennyye konstruksyy promyshlennykh y hrazhdanskykh zdaniy. Moskva: Gosudarstvennoe yzdatelstvo stroytelnoy lyteratury, 1939. 215 s.

7. Клименко Є.В., Шаповал С.Л. Експериментальні дослідження кам'яної кладки при її місцевому стиску. Галузеве машинобудування, будівництво, 2001. №7. С. 58-64.

Klymenko Ye.V., Shapoval S.L. Eksperymentalni doslidzhennia kamianoї kladky pry yїi mistsevomu stysku. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo, 2001. №7. С. 58-64

8. Гриньова І.І. Методика проведення експериментального дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених кам'яних стовпів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017. №67. С. 20-26.

Hrynova I.I. Metodyka provedennia eksperymentalnoho doslidzhennia napruzhenodeformovanoho stanu poshkodzhennykh kamianykh stovpiv. Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 2017. №67. С. 20-26.

9. Klymenko E., Grynyova I., & Pents V. (2018). The work of stone pillars damaged during operation. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.8), 174-179. doi: 10.14419/ijet.v7i4.8.27235

10. Milani G. Upper bound sequential linear programming mesh adaptation scheme for collapse analysis of masonry vaults. *Advances in Engineering Software*, 2015. no. 79. P. 91-110.

11. Surianinov, M., Shylyayev, O. Calculation of plate-beam systems by method of boundary elements (2018) *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7 (2), pp. 238-241.

12. Li Z., Chen L., Fang Q., Chen W.S., Hao H., Zhu R., & Zheng K. (2019) Experimental and numerical study on CFRP strip strengthened clay brick masonry walls subjected to vented gas explosions. *International journal of impact engineering*, 129, 66-79. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.02.013

13. Albert, M.L., Elwi, A.E., & Cheng, J.J.R. (2001) Strengthening of unreinforced masonry walls using FRP. *Journal of composites for construction*, 5(2), 76-84 doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:2(76)

14. Krainskyi, P., Bliharshyy, Y., Khmil, R., & Vejera, P. (2018). Influence of loading level on the bearing capacity of RC columns strengthened by jacketing. *MATEC Web of Conferences*. doi: 10.1051/matecconf/201823002013

15. Vasconcelos G., Lourenco. P. B. (2009). Experimental characterization of stone masonry in shear and compression. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3337-3345. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.045

16. Попов Н.Н., Забегаев А.В. Проектирование и расчет железобетонных и каменных конструкций. Москва. Высшая школа, 1989. 400 с.

Popov N.N., Zabehaev A.V. Proektyrovanye y raschet zhelezobetonnykh y kamennykh konstruksyy. Moskva. Vysshaya shkola, 1989. 400 s.