

УДК 624.012.35

ВПЛИВ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОГИНИ РИГЕЛІВ ДВОШАРІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РАМ З ШТУЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ЗУСИЛЬ**INFLUENCE OF REPEATED LOADS ON DEFLECTIONS OF LINKS OF DOUBLE-HINGED REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH ARTIFICIAL REGULATION OF FORCES**

Філіпчук С.В. д.т.н., професор., ORCID ID: 0000-0002-4464-4620,
Собіщанський О.Л. аспірант ORCID ID: 0009-0006-2800-7926
(Національний університет водного господарства та природокористування)

Filipchuk S.V. doctor of technical sciences, professor, ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, **Sobishchanskyi O.L.** postgraduate, ORCID ID: 0009-0006-2800-7926 (National university of water and environmental engineering)

Наведені результати аналізу впливу повторних навантажень на прогини ригеля рами з штучним регулюванням зусиль. Встановлено, що при рівнях завантаження $F_{cyc} \approx 0,3 F_u - 0,45 F_u$ стабілізація прогинів ригеля рами з штучним регулюванням зусиль відбувається до п'ятого циклу навантаження-розвантаження. При рівні завантаження $F_{cyc} \approx 0,3 F_u - 0,7 F_u$ стабілізація прогинів рами відбувається до шостого циклу навантаження-розвантаження. Збільшення рівня навантажень (від $0,45 F_u$ до $0,7 F_u$), після стабілізації роботи рами з штучним регулюванням зусиль, призводить до зростання прогинів. Повторна стабілізація прогинів ригелів рам з штучним регулюванням зусиль відбувається протягом наступних п'яти циклів навантаження-розвантаження після збільшення його рівня. Стабілізація ж прогинів відбувається відразу після зменшення рівня навантаження в рамах.

The aim is to analyze the effect of repeated low-cycle loading on deflections in two-hinged reinforced concrete frames with artificial force regulation with similar two-hinged reinforced concrete frames without artificial force regulation. To study U-shaped reinforced concrete frames with artificial force regulation, reinforced concrete frame samples were manufactured, which had the following dimensions in the axes: span $l = 2000$ mm, height $h = 1100$ mm, cross-section of the frame beam – 160×100 mm, cross-section of the frame column 180×100 mm.

The frame crossbar and uprights are reinforced with spatial frames with four symmetrically arranged Ø14A400C rods. The upper rods in the crossbar nodes are rounded and inserted into the uprights beyond the lower edge of the crossbar by 200 mm (twenty diameters). The transverse reinforcement in the uprights and crossbars is made in the form of closed welded frames of Ø5Vr-I rods installed in the crossbar with a pitch of 60, and in the upright 70 and 50 mm in the near-wall zone. The prestressed tightening of the frame is made of Ø18 A400C rod reinforcement. The frame tests were performed according to the scheme of a two-hinged system, loading the crossbar with two concentrated forces at a distance of 75 cm from the axis of the uprights. The forces were created by a hydraulic jack, and the force was measured by a calibrated ring dynamometer.

The results of the analysis of the influence of repeated loads on the deflections of the frame crossbar with artificial force regulation are presented. It was established that at loading levels $F_{cyc} \approx 0.3 F_u - 0.45 F_u$, the stabilization of the deflections of the frame crossbar with artificial force regulation occurs by the fifth load-unload cycle. At loading levels $F_{cyc} \approx 0.3 F_u - 0.7 F_u$, the stabilization of the frame deflections occurs by the sixth load-unload cycle. An increase in the load level (from $0.45 F_u$ to $0.7 F_u$), after stabilization of the frame with artificial force regulation, leads to an increase in deflections. Re-stabilization of frame beam deflections with artificial force regulation occurs during the next five load-unload cycles after increasing its level. Stabilization of deflections occurs immediately after reducing the load level in the frames.

Ключові слова:

Залізобетон, бетон, арматура, рама, зусилля, прогин, розрахунок, деформація, напруження

Reinforced concrete, concrete, reinforcement, frame, force, deflection, calculation, deformation, stress

Залізобетонні рами широко застосовуються у будівництві промислових, цивільних та спеціальних споруд (мости, тунелі, пішохідні переходи, опорні системи нижніх поверхів громадських будівель тощо). Вони сприймають основні навантаження, більшість з яких мають повторний характер [1]. Проте, незважаючи на широке використання залізобетонних рам у будівельній практиці, експериментальних досліджень їх роботи проведено недостатньо [2], це стосується також аналізу прогинів під дією повторних навантажень.

Метою є аналіз впливу повторних малоциклових навантажень на прогини в двохшарнірних залізобетонних рамах із штучним регулюванням зусиль з аналогічними двохшарнірними залізобетонними рамами без штучного регулювання зусиль [3 - 9].

Конструкція дослідних рам. Для дослідження П-подібних залізобетонних рам з штучним регулюванням зусиль були виготовлені залізобетонні зразки рам, які мали розміри в осях: проліт $l = 2000$ мм, висота $h = 1100$ мм,

поперечний переріз ригеля рами – 160 × 100 мм, поперечний переріз стійки рами 180 × 100 мм (рис.1, рис.2).

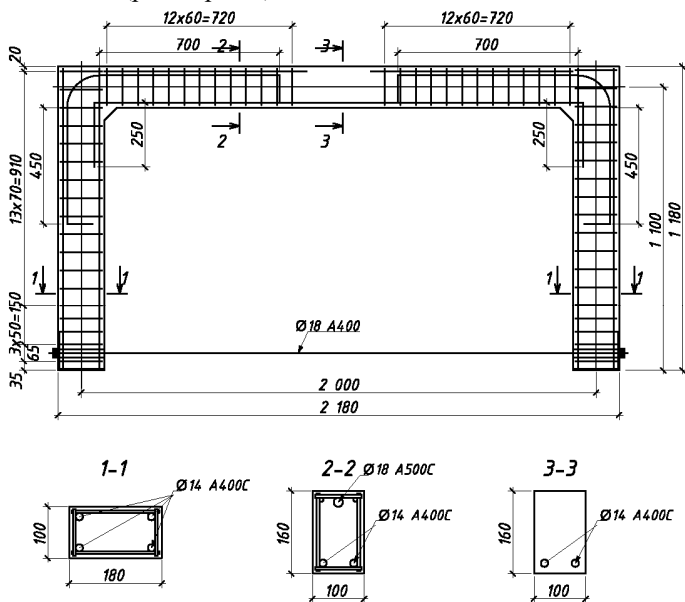


Рис.1. Конструктивна схема дослідних рам

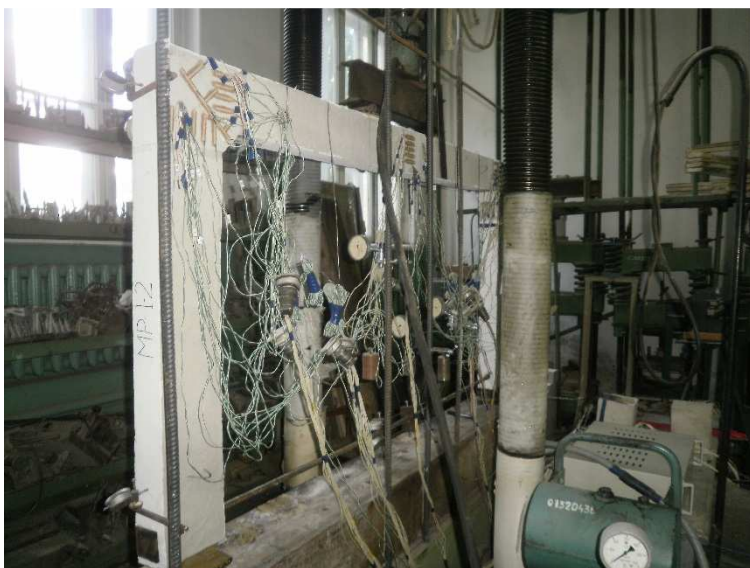


Рис.2. Загальний вигляд випробування дослідних рам

Ригель і стійки рами армовано просторовими каркасами з симетрично розташованими чотирма стержнями Ø14A400С. Верхні стержні у вузлах ригеля заокруглені і заведені в стійки за нижню грань ригеля на 200 мм (двадцять діаметрів). Поперечна арматура в стійках і ригелі виконана у вигляді замкнених зварених рамок із стержнів Ø5Вр-І, встановлених в ригелі з кроком 60, а в стійці 70 та 50 мм в приопній зоні. Попередньо напружена затяжка рами виконана з стержневої арматури Ø18 А400С.

При випробуванні призм міцність бетону в віці 28 діб складала: $f_c = 28,77$ МПа, граничні деформації – $\epsilon_{cl} = 206,0 \times 10^{-5}$, початковий модуль пружності $E_c = 23,2 \times 10^3$ МПа. За результатами випробувань арматурних стержнів встановлені такі характеристики: межа текучості $\sigma_y = 406,1$ МПа; межа міцності $\sigma_u = 506,2$ МПа; максимальні деформації, які відповідають σ_y , $\epsilon_{su} = 256,2 \times 10^{-5}$, модуль пружності $E_s = 2,08 \times 10^5$ МПа.

Випробування рам виконували за схемою двошарнірної системи завантажуючи ригель двома зосередженими силами на віддалі 75 см від осі стійок. Зусилля створювали гідравлічним домкратом, а силу вимірювали тарованим кільцевим динамометром (рис.2).

Прогини ригелів рам Р2-К і Р2-КР розвивалися практично пропорційно зростанню навантаження (рис. 3). При навантаженні $F = 20$ кН прогин ригеля рами Р2-К склав 8,97 мм, а рами Р2-КР відповідно 8,46 мм.

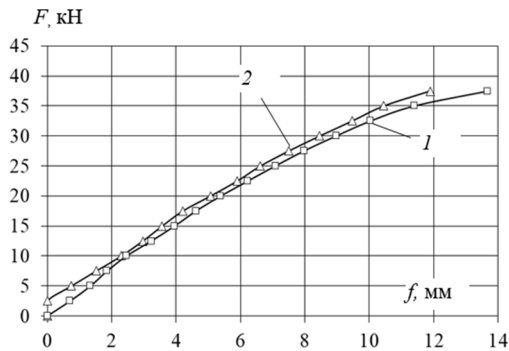


Рис.3. Зміна прогинів ригеля рами: 1 – Р2-К; 2 – Р2-КР

Прогин ригеля рами Р2-К при навантаженні $F = 37,5$ кН, становив 13,68 мм. Прогин ригеля рами з штучним регулюванням зусиль, при цьому ж навантаженні становив 11,89 мм, що на 13,1% менше прогину ригеля рами без штучного регулювання зусиль.

Характер розвитку прогинів на першому циклі навантаження рами Р2-ПР1 ідентичний характеру розвитку прогинів в рамі Р2-КР. Після розвантаження після першого циклу в ригелі рами виник залишковий прогин, рівний $f_{cyc, res} = 3,29$ мм, що складає 81,2% від максимального прогину в циклі при рівні розвантаження до $F_{cyc} = 12$ кН (рис. 4). З наступними циклами навантаження залишкові прогини дещо зростали. На другому циклі вони збільшилися до

$f_{cyc, res} = 3,37$ мм, а на п'ятому – до $f_{cyc, res} = 3,43$ мм (79,4% від максимального прогину на п'ятому циклі і 84,7 % від максимального прогину на першому циклі).

В рамі Р2-ПР1 після стабілізації рівень навантаження був збільшений до $F_{cyc} = 24$ кН, що викликало утворення нових тріщин і виникнення пластичних деформацій в бетоні стиснутої зони. Після розвантаження виник значний залишковий прогин $f_{cyc, res} = 4,57$ мм (64,4% від повного прогину). Протягом наступних п'яти циклів приріст прогину не перевищував $\Delta f_{cyc, res} = 0,15$ мм і до десятого циклу стабілізувався.

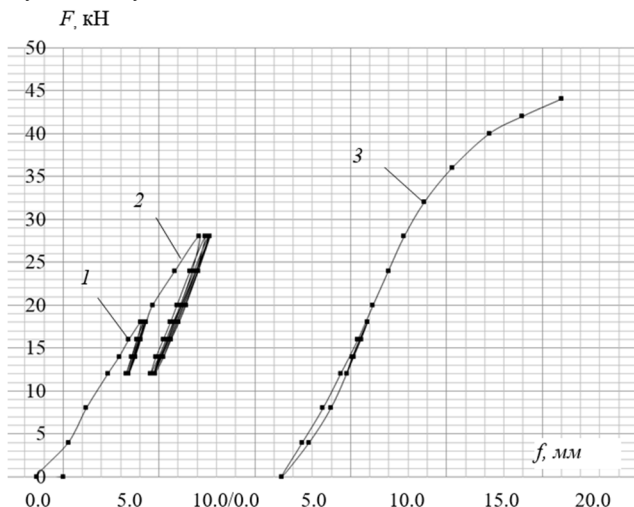


Рис. 4. Зміна прогинів ригеля рами Р2-ПР1 при повторних навантаженнях: 1 – на першому циклі навантаження; 2 – на шостому циклі навантаження; 3 – на чотирнадцятому циклі навантаження до руйнування

Повний прогин ригеля рами Р2-ПР1 на першому циклі при навантаженні $F_{cyc} = 18$ кН склав $f_{cyc} = 4,05$ мм. На другому циклі повний прогин збільшився на 1,9%, а на п'ятому – на 6,2% по відношенню до повного прогину на першому циклі. При збільшенні рівня навантаження рами до $F_{cyc} = 24$ кН значення абсолютного прогину теж зросло. Максимальний прогин на шостому циклі склав $f_{cyc} = 7,09$ мм з поступовим збільшенням на десятому циклі до $f_{cyc} = 7,66$ мм. Після зменшення рівня навантаження як повні, так і залишкові прогини практично не збільшувалися, а криві навантаження і розвантаження фактично зливалися. Тобто, як і значення залишкових прогинів, так і значення повних прогинів стабілізувалися до п'ятого циклу кожного рівня навантаження.

На чотирнадцятому циклі рама була навантажена до руйнування. За навантаження $F = 35$ кН крива прогину змінила напрям випуклості, тобто

стала обернена до осі навантаження. Максимальний прогин рами Р2-ПР1 при $F = 44,05$ кН склав $f = 16,01$ мм.

В рамі Р2-ПР2 вже на першому циклі навантаження при $F_{cyc} = 28$ кН в значній мірі відбулися процеси тріщиноутворення, а залежність між прогинами і навантаженням мала криволінійний характер. А на шостому циклі криві прогинів при навантаженні і розвантаженні майже співпадали, а випуклість обох кривих направлена до осі деформацій (рис. 5).

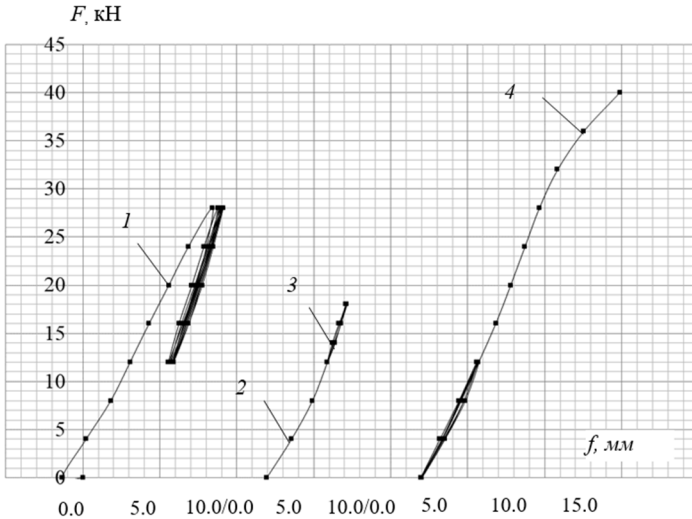


Рис. 5. Зміна прогинів ригеля рами Р2-ПР2 при повторних навантаженнях: 1 – на першому циклі навантаження; 2 – на шостому циклі навантаження; 3 – на дев'ятому циклі розвантаження; 4 – на тринадцятому циклі навантаження до руйнування

Після розвантаження після першого циклу в ригелі рами залишковий прогин склав $f_{cyc, res} = 5,57$ мм при неповному розвантаженні рами до $F_{cyc} = 12$ кН, що складає 33,7% від максимального прогину в циклі. Протягом наступних п'яти циклів приріст прогину не перевищував $\Delta f_{cyc, res} = 0,13$ мм і до шостого циклу стабілізувався. Повний прогин на шостому циклі склав $f_{cyc} = 17,12$ мм, що складає 47,8% від максимального прогину рами.

Після стабілізації рівень навантаження був зменшений до $F_{cyc} = 18$ кН, внаслідок чого залишкові прогини практично не збільшувалися.

На тринадцятому циклі рама була довантажена до руйнування. При перевищенні навантаження $F_{cyc} = 30$ кН прогини ригеля рами почав стрімко збільшуватися. При навантаженні $F_{cyc} = 40$ кН прогин ригеля рами склав $f_{cyc, res} = 14,88$ мм.

Висновки. При рівнях завантаження $F_{cyc} \approx 0,3 F_u - 0,45 F_u$ стабілізація прогинів ригеля рами з штучним регулюванням зусиль відбувається до п'ятого циклу навантаження-розвантаження. При рівні завантаження $F_{cyc} \approx 0,3 F_u - 0,7$

F_u стабілізація прогинів рами відбувається до шостого циклу навантаження-розвантаження.

Збільшення рівня навантажень (від $0,45 F_u$ до $0,7 F_u$), після стабілізації роботи рами з штучним регулюванням зусиль, призводить до зростання прогинів.

Повторна стабілізація прогинів ригелів рам з штучним регулюванням зусиль відбувається протягом наступних п'яти циклів навантаження-розвантаження після збільшення його рівня. Стабілізація ж прогинів відбувається відразу після зменшення рівня навантаження в рамах.

1. Філіпчук С. В. Робота замкнутих залізобетонних рам при повторних малоциклових навантаженнях: дис. к-та наук. Полтава, 2009. 287 с.

Filipchuk S. V. Robota zamknutykh zalizobetonnykh ram pry povtornykh malotsyklovykh navantazhenniakh: dys. k-ta nauk. Poltava, 2009. 287 s.

2. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.:Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

DBN V.2.6–98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. – К.:Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

3. Бабич В.Є., Ковальчук Ю.Т. Напружено-деформований стан залізобетонних П-подібних рам, розрахованих за пружною стадією роботи та стадією з урахуванням перерозподілу зусиль. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, Рівне: Видавництво НУВГП, 2023. Випуск 44, С. 120-132.

Babych V.Ie., Kovalchuk Yu.T. Napruzheno-deformovanyi stan zalizobetonnykh P-podibnykh ram, rozrakhovanykh za pruzhnoiu stadiieiu roboty ta stadiieiu z urakhuvanniam pererozpodilu zusyul. Resursoekononni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, Rivne: Vydavnytstvo NUVHP, 2023. Vypusk 44, S. 120-132.

4. Filipchuk S.V., Sobishchanskyi O.L., Kovalchuk Y.T. Methodology for testing double-hinged reinforced concrete frames with artificial regulation of forces. [Resource-saving materials, structures, buildings and structures](#), Rivne, NUWM, 2025. Issue 47, pp. 425-430.

5. Tunc G., Othman M., Mertol H. Finite Element Analysis of Frames with Reinforced Concrete Encased Steel Composite Columns // Buildings. – 2022. – Vol. 12(3). – P. 375.

6. Savin S., Piushchenko T. Calculation of reinforced concrete frames with discrete crack modeling // Reinforced Concrete Structures. – 2024. – Vol. 1. – P. 45–54.

7. Karaton M., Sayin E. Failure analysis of reinforced concrete frames using finite element modeling // Engineering Structures. – 2014. – Vol. 74. – P. 87–97.

8. MacGregor J. G., Wight J. K. Reinforced Concrete: Mechanics and Design. – 6th ed. – Upper Saddle River : Pearson Education, 2012. – 1152 p.

9. Фролов В. В. Сучасні тенденції проектування залізобетонних рам. // Вісник будівництва, №3, 2020.

Frolov V. V. Suchasni tendentsii proektuvannia zalizobetonnykh ram. // Visnyk budivnytstva, №3, 2020.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	13.04.2026	Received	13.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	14.04.2026	Received in revised form	14.04.2026
Прийнято	20.04.2026	Accepted	20.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.