

ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ДВОШАРНІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РАМ З ШТУЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ЗУСИЛЬ

CRACK RESISTANCE OF DOUBLE-HINGED REINFORCED CONCRETE FRAMES WITH ARTIFICIAL STRESS REGULATION

Філіпчук С.В. д.т.н., проф., ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, Собіщанський О.Л. аспірант ORCID ID: 0009-0006-2800-7927 (Національний університет водного господарства та природокористування)

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

Наведені результати експериментальних досліджень тріщиностійкості двошарнірних залізобетонних рам та встановлено, що при повторних навантаженнях, з рівнем навантаження до $F_{сус} = 0,7$ від руйнівного (експлуатаційний рівень), ширина розкриття тріщин в середньому збільшується на 30% в порівнянні з одноразовим завантаженням рами. Також штучне регулювання зусиль позитивно впливає на процес тріщиноутворення в залізобетонних рамах, зменшуючи ширину розкриття тріщин до 20%, а стабілізація процесу тріщиноутворення відбувається на п'ятому – сьомому циклах навантаження-розвантаження.

Reinforced concrete frames are widely used in the construction of industrial, civil buildings, and special structures (bridges, tunnels, pedestrian crossings, support systems for the lower floors of public buildings, etc.). To study U-shaped reinforced concrete frames with artificial force control, reinforced concrete frame samples were manufactured with the following dimensions: span $l = 2000$ mm, height $h = 1100$ mm, frame crossbeam cross-section – 160×100 mm, frame upright cross-section 180×100 mm.

The width of cracks in frame elements was measured using indicators located in the stretched zone of concrete at the center of gravity of the reinforcement, based on which cracks were formed. The width of cracks was also measured using an MPB-3 microscope. During the first load cycles of the frames, the tensile deformation of the concrete was taken into account, and during the subsequent cycles, the indicators recorded only the width of the cracks in the concrete. In cases where two or more cracks formed at the base of the indicators, their average width was determined by dividing the absolute elongation recorded by the indicators by the number of cracks.

The results of experimental studies of the crack resistance of double-hinged reinforced concrete frames are presented, and it has been established that under repeated loads, with a load level of up to $F_{cyc} = 0.7$ of the destructive (operational level), the crack width increases by an average of 30% compared to a single load on the frame. After the fifth cycle, the crack width in the frame girder span began to stabilize. Compared to the first cycle, the crack width increased by 20% in the fifth cycle and by 23.8% in the tenth cycle. After the seventh cycle, the crack width in the frame joints began to stabilize. Compared to the first cycle, the crack width increased by 18.8% in the seventh cycle and by 21.2% in the tenth cycle. A significant increase in the residual crack width was observed in the first three load cycles. Thus, the residual crack width was $w_{res} = 0.04$ mm in the span and $w_{res} = 0.12$ mm in the frame joints. Subsequently, the residual crack width practically did not increase, i.e., it stabilized.

Ключові слова:

Залізобетонна рама, напружено-деформований стан, штучне регулювання зусиль, методика розрахунку
Reinforced concrete frame, stressed-deformed a state, artificial regulation of efforts, method of analysis

Залізобетонні рами широко використовуються в будівництві промислових, цивільних будівель та спеціальних споруд (мости, тунелі, пішохідні переходи, опорні системи нижніх поверхів громадських будівель тощо). Вони сприймають основні навантаження, серед яких переважна більшість мають повторний характер [1]. Але не зважаючи на те, що залізобетонні рами мають широке застосування в практиці будівництва, експериментальних досліджень роботи рам з штучним регулювання зусиль виконано недостатньо [2], особливо це стосується вивченню процесів тріщиноутворення при дії повторних навантажень.

Мета даного дослідження – експериментально встановити та порівняти вплив повторних малоциклових навантажень на утворення та ширину розкриття тріщин в двохшарнірних залізобетонних рамах із штучним регулюванням зусиль з аналогічними двохшарнірними залізобетонними рамами без штучного регулювання зусиль.

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).

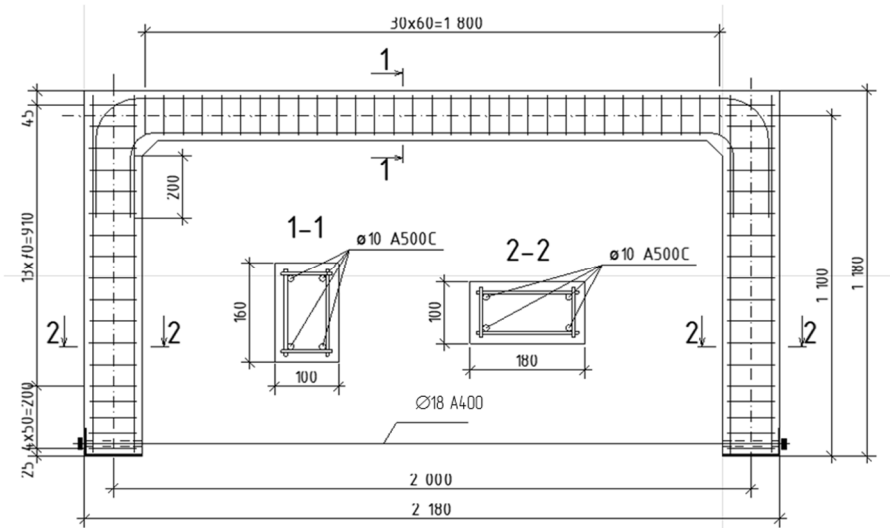


Рис.1. Конструктивна схема дослідних рам

Ригель і стійки рами армовано просторовими каркасами з симетрично розташованими чотирма стержнями $\text{Ø}10\text{A}500\text{C}$. 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 $\text{Ø}5\text{Bp-I}$, встановлених в ригелі з кроком 60, а в стійці 70 та 50 мм в припопній зоні. На торцях стійок влаштовані закладні деталі із пластин $t = 5$ мм. Затяжка рами виконана з стержневої арматури $\text{Ø}18\text{A}400\text{C}$, на одному з кінців затяжки було влаштовано різьбу $\text{Ø}18$. Попереднє напруження в затяжці створювалося за допомогою динамометричного ключа.

При випробуванні призм міцність бетону в віці 28 діб склала: $f_c = 20,31$ МПа, граничні деформації – $\epsilon_{cl} = 143,17 \times 10^{-5}$, початковий модуль пружності $E_c = 24,95 \times 10^3$ МПа. За результатами випробовувань чотирьох арматурних стержнів довжиною 40 см в розривній машині УИМ 50 встановлені такі характеристики: межа текучості $\sigma_y = 509,55$ МПа; межа міцності $\sigma_u = 638,54$ МПа; максимальні деформації, які відповідають σ_y , $\epsilon_{su} = 244,92 \times 10^{-5}$, модуль пружності $E_s = 20,81 \times 10^4$ МПа.

Випробовування рам виконували за схемою двошарнірної системи в спеціальній установці, завантажуючи ригель двома зосередженими силами на віддалі 75 см від осі стійок. Зусилля створювали гідравлічним домкратом, а силу вимірювали тарованим кільцевим динамометром (рис.2, рис.3).

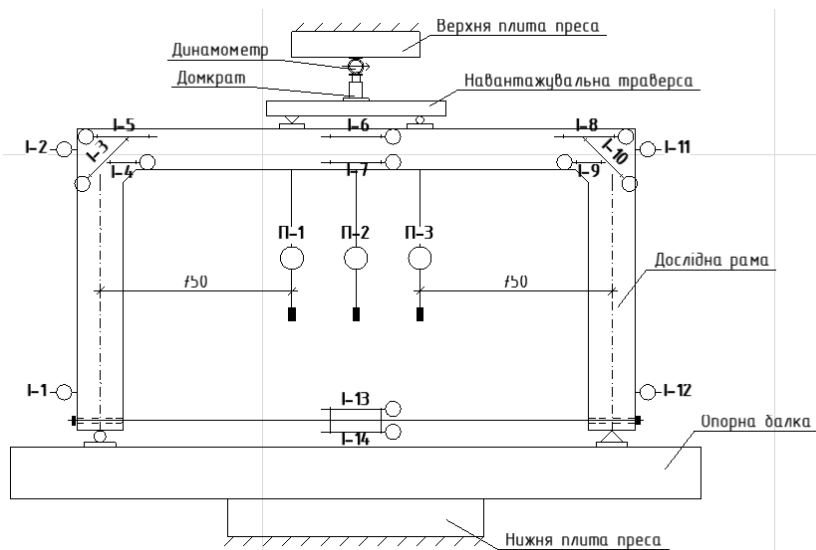


Рис.2. Схема випробування рам та розташування приладів (I – індикатори, П – прогиноміри)



Рис.3. Загальний вигляд випробування дослідних рам

В рамках Р1-К та Р1-П не здійснювалося попереднє напруження зтяжки, а в зтяжці рам Р1-КР та Р1-ПР-1 було попередньо створене зусилля в 3 кН. Рами Р1-К та Р1-КР завантажувалися одноразово до руйнування, а рами Р1-П та Р1-ПР піддавалися повторному навантаженню. За результатами випробувань Р1-К та Р1-КР визначався рівень повторних навантажень для рам, що навантажувалися повторно. Навантажування та розвантажування рам виконувалося ступенями, величина яких складала $\Delta F \approx 0,1 F_u$. Рами Р1-П та Р1-ПР піддавалися десятикратному навантаженню до рівня $F_{cyc} \approx 0,725 F_u$, а на одинадцятomu циклі вони довантажувалися до руйнування.

Ширину розкриття тріщин в елементах рами вимірювали за допомогою індикаторів, розташованих в розтягнутій зоні бетону на рівні центра ваги арматури і на базі вимірювання яких утворювалися тріщини. Також виконувалося дублювання вимірювання ширини розкриття тріщин за допомогою мікроскопа МПБ-3.

Максимальна абсолютна величина розтягання бетону знаходиться в межах $(10 - 20) \times 10^{-5}$ і є на порядок менше, ніж ширина розкриття тріщин. Це дає підстави деформаціями розтягання бетону на базі встановлених індикаторів нехтувати і вважати, що ними вимірювалась ширина розкриття тріщин. Проте, до моменту утворення тріщин необхідно враховувати деформації розтягання бетону. Тому на перших циклах навантаження рам деформації розтягання бетону враховувались, а на наступних циклах індикатори фіксували тільки ширину розкриття тріщин в бетоні. У випадках, коли на базі індикаторів утворювалось дві і більше тріщин, середня ширина їх розкриття визначалась шляхом ділення абсолютного подовження, зафіксованого індикаторами, на кількість тріщин [3 - 5].

Результати експериментальних досліджень. Під час випробування рами Р1-К, при навантаженні в 10 кН у прольоті ригеля рами ширина розкриття тріщини становила $w = 0,04$ мм, а у вузлі рами – $w = 0,06$ мм. Зі збільшенням навантаження збільшувалася ширина розкриття тріщин. Так, при $F = 25$ кН ширина розкриття тріщин у ригелі рами була рівна $w = 0,2$ мм, а у вузлі – $w = 0,64$ мм (табл.1). Рама зруйнувалася при навантаженні $F_u = 29,4$ кН.

В рамі Р1-КР (рама Р1-КР піддавалася попередньому напруженню) при навантаженні в 10 кН у прольоті ригеля рами ширина розкриття тріщини становила $w = 0,02$ мм, а у вузлі рами – $w = 0,06$ мм. При $F = 25$ кН ширина розкриття тріщин у ригелі рами була рівна $w = 0,14$ мм, а у вузлі – $w = 0,38$ мм (табл.1). Рама зруйнувалася при навантаженні $F_u = 31,05$ кН.

Рама Р1-П піддавалася короткочасним повторним навантаженням. На першому циклі повторних навантажень, при $F = 10$ кН, ширина розкриття тріщин становила: $w = 0,08$ мм – у вузлі рами, та $w = 0,04$ мм – у прольоті ригеля рами. При збільшенні навантаження на першому циклі до рівня $F = 22,5$ кН ширина розкриття тріщин зросла в прольоті ригеля рами – до $w = 0,18$ мм, а у вузлі рами – до $w = 0,28$ мм (рис.4).

Ширина розкриття тріщин в рамах P1-K та P1-KP
при навантаженні 25 кН.

F = 25 кН	Ширина розкриття тріщин, мм	
	P1-K	P1-KP
У вузлі рами	0,64	0,38
В прольоті ригеля рами	0,20	0,14

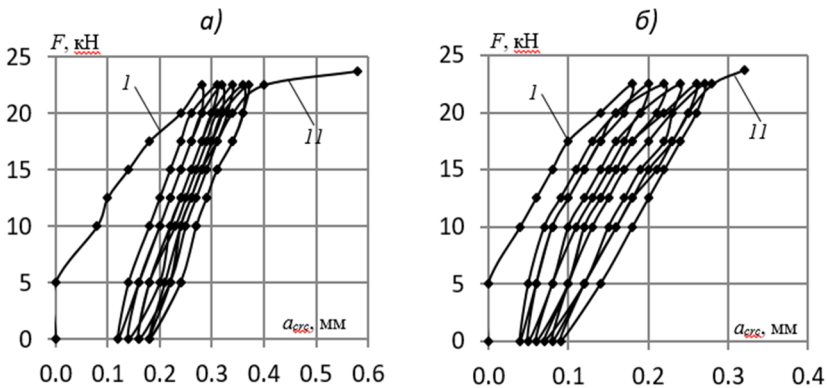


Рис.4. Зміна ширини розкриття тріщин в рамі P1-П при короточасних повторних навантаженнях а) – у вузлі рами; б) – у прольоті ригеля рами (цифрами показані номери циклів).

Зі збільшення кількості циклів повторних навантажень – збільшувалася ширина розкриття тріщин. Так на п'ятому циклі ширина розкриття тріщин становила: у вузлі рами $w = 0,34$ мм, а у прольоті ригеля – $w = 0,24$ мм. На сьомому циклі $w = 0,36$ мм – у вузлі та $w = 0,26$ мм – в прольоті ригеля рами. На десятому циклі $w = 0,37$ мм – у вузлі та $w = 0,27$ мм – в прольоті ригеля рами. Після сьомого циклу розпочалася стабілізація ширини розкриття тріщин. Порівняно з першим циклом на сьомому циклі ширина розкриття тріщин збільшилась на 22,2% у вузлах та 30,8% в прольоті ригеля, а на десятому на 24,3% у вузлах та 33,3% в прольоті ригеля. Залишкова ширина розкриття тріщин складала – $w_{res} = 0,06$ мм в прольоті та $w_{res} = 0,16$ мм – у вузлах рами.

На одинадцятому циклі рама P1-П довантажувалася до руйнування. Ширина розкриття тріщин перед руйнуванням становила: $w = 0,58$ мм – у вузлі

та $w = 0,32$ мм – в прольоті ригеля рами. Рама зруйнувалася при навантаженні $F_u = 23,75$ кН.

Рама Р1-ІІР піддавалася короткочасним повторним навантаженням з штучним регулюванням зусиль. На першому циклі повторних навантажень, при $F = 10$ кН, ширина розкриття тріщин становила: $w = 0,06$ мм – у вузлі рами, та $w = 0,04$ мм – у прольоті ригеля рами. При збільшенні навантаження на першому циклі до рівня $F = 22,5$ кН ширина розкриття тріщин зростає в прольоті ригеля рами – до $w = 0,16$ мм, а у вузлі рами – до $w = 0,26$ мм (рис.5).

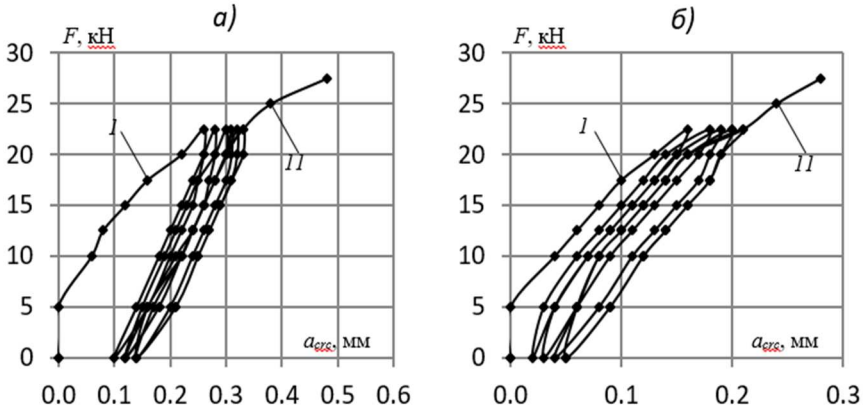


Рис.5. Зміна ширини розкриття тріщин в рамі Р1-ІІР при короткочасних повторних навантаженнях а) – у вузлі рами; б) – у прольоті ригеля рами (цифрами показані номери циклів)

Аналогічно, як і в рамі Р1-ІІ, зі збільшення кількості циклів повторних навантажень – збільшувалася ширина розкриття тріщин. Так, на п'ятому циклі ширина розкриття тріщин становила: у вузлі рами $w = 0,31$ мм, а у прольоті ригеля – $w = 0,2$ мм. На сьомому циклі $w = 0,32$ мм – у вузлі та $w = 0,2$ мм – в прольоті ригеля рами. На десятому циклі $w = 0,33$ мм – у вузлі та $w = 0,2$ мм – в прольоті ригеля рами. Після п'ятого циклу розпочалася стабілізація ширини розкриття тріщин у прольоті ригеля рами. Порівняно з першим циклом на п'ятому циклі ширина розкриття тріщин збільшилась на 20%, а на десятому – 23,8%. Після сьомого циклу розпочалася стабілізація ширини розкриття тріщин у вузлах рами. Порівняно з першим циклом на сьомому циклі ширина розкриття тріщин збільшилась на 18,8%, а на десятому на 21,2%.

Суттєве зростання залишкової ширини розкриття тріщин спостерігалось на перших трьох циклах навантаження. Так залишкова ширина розкриття тріщин складала – $w_{res} = 0,04$ мм в прольоті та $w_{res} = 0,12$ мм – у вузлах рами. Надалі залишкова ширина розкриття тріщин практично не зростала, тобто, відбувалася її стабілізація.

На одинадцятому циклі рама Р1-ПР довантажувалася до руйнування. Ширина розкриття тріщин перед руйнуванням становила: $w = 0,48$ мм – у вузлі та $w = 0,28$ мм – в прольоті ригеля рами. Рама зруйнувалася при навантаженні $F_u = 29,8$ кН.

Висновки. При повторних навантаженнях, з рівнем навантаження до $F_{сус} = 0,7$ від руйнівного (експлуатаційний рівень), ширина розкриття тріщин в середньому збільшується на 30% в порівнянні з одноразовим навантаженням рами.

Штучне регулювання зусиль позитивно впливає на процес тріщиноутворення в залізобетонних рамах, зменшуючи ширину розкриття тріщин до 20%.

Стабілізація процесу тріщиноутворення відбувається на п'ятому – сьомому циклах навантаження-розвантаження.

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. – K.:Minrehionbud Ukrainy, 2011. – 71 s.

3. Філіпчук С.В. Дослідження тріщиностійкості замкнутих залізобетонних рам при повторних навантаженнях. Ресурсоекономні конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Рівне: Видавництво НУВГП, 2008. – Випуск 17 – С. 282 – 287.

Filipchuk S.V. Doslidzhennia trishchynostiikosti zamknutykh zalizobetonnykh ram pry povtornykh navantazhenniakh. Resursoekonomni konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. Rivne: Vydavnytstvo NUVHP, 2008. – Vypusk 17 – S. 282 – 287.

4. 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. Napruzhenno-deformovanyi stan zalizobetonnykh P-podibnykh ram, rozrakhovanykh za pruzhnoiu stadiieiu roboty ta stadiieiu z urakhuvanniam pererozpodilu zusyul. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, Rivne: Vydavnytstvo NUVHP, 2023. Vypusk 44, S. 120-132.

5. 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.