

УДК 624.012.25

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРОК З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗУСИЛЬ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Д.Я. Кислюк¹,

канд. техн. наук, доцент

В.І. Савенко²,

д-р техн. наук (ФРН), професор

О.А. Ужегова¹,

канд. техн. наук, доцент

В.П. Самчук¹,

канд. техн. наук, доцент

Н.В. Нінічук¹,

канд. техн. наук, доцент

¹Луцький національний технічний університет м. Луцьк²Київський національний університет будівництва і архітектури

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.195-204

Експериментально досліджено роботу двошарнірних залізобетонних арок, що дає можливість дослідити особливості напружено-деформованого стану перерізів поясу та характер перерозподілу зусиль арки між верхнім поясом та затяжкою, розвитку прогинів та тріщин при одноразових та повторних короткочасних статичних навантаженнях. Наведено методiku розрахунку внутрішніх зусиль двошарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях.

Ключові слова: залізобетон, двошарнірна арка, перерозподіл зусиль, попереднє напруження, напружено-деформований стан.

Актуальність теми. Залізобетонні арки широко використовуються в будівництві різноманітних будівель і споруд. Вони бувають дво-, тришарнірними та безшарнірними. Горизонтальний розпір сприймається затяжкою, але може також передаватись на інші конструкції (рами, фундаменти). Найпоширеніші двошарнірні арки з затяжкою. При великих прольотах застосовуються тришарнірні арки. Безшарнірні арки найлегші, але найчутливіші до осідань, потребують влаштування потужних опор для сприйняття розпору і в покриттях застосовуються рідко.

У двошарнірних арках шляхом регулювання зусилля в затяжці можна зменшити максимальні значення згинальних моментів у поперечних перерізах при певних навантаженнях та розмірах конструкції. Суцільні двошарнірні арки можна виготовляти як на заводах залізобетонних конструкцій, так і безпосередньо на будівельних майданчиках залежно від розмірів конструкції, можливості транспортування, їхньої кількості та інших факторів. Такі арки застосовують у конструкціях покриття промислових та громадських будівель, мостових конструкціях, просторових покриттях споруд (діафрагми оболонок). При цьому істотне значення має також архітектурна привабливість аркових покриттів [1].

У процесі експлуатації арки у складі покриттів промислових і цивільних будівлях та спорудах можуть піддаватись повторним навантаженням, інколи перевантаженням та пошкодженням, які суттєво впливають на напружено-деформований стан перерізів арки і затяжки [2, 3, 4]. В двошарнірних арках може відбуватися перерозподіл зусиль між верхнім поясом арки та затяжкою, який впливає на їх міцність і жорсткість [5, 6]. Вплив повторних (малоциклових) навантажень та можливий перерозподіл зусиль при розрахунках залізобетонних арок чинними нормативними документами не розглядаються. Не розроблено методики розрахунку арок з урахуванням перерозподілу зусиль між верхнім поясом арки та затяжкою.

Виходячи з наведеного, дослідження роботи нормальних перерізів двошарнірних залізобетонних арок при дії повторних навантажень є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Сабір Юсіф Бакір у своїй науковій роботі [7], під керівництвом Пушкар Н.В., досліджував несучу здатність арок з урахуванням технологічної пошкодженості бетону. В роботі було поставлено: експериментально-теоретичним шляхом обґрунтувати вплив технологічної пошкодженості на напружено-деформований стан арокних конструкцій з важкого бетону. Встановлено, що на ступенях завантаження перші силові тріщини розвивались по траєкторіям технологічних тріщин на висоту до $0,25h$. Автор рекомендує розраховувати двошарнірні арки за деформаційною схемою.

Каравн Б.В. виконав дослідження в результаті експериментальних досліджень встановив, що зі збільшенням класу високоміцного бетону, міцність двошарнірних арок збільшується, тріщиностійкість арок з високоміцних бетонів вища ніж арок з важкого бетону звичайної міцності С20/25. Тріщини, що утворились і розвивались у поясі арок з високоміцного бетону на 50% менші ніж в арках зі звичайного бетону, а момент тріщиноутворення на 25% вищий. Залежність прогину в середині прольоту арки від навантажень до руйнування має лінійний характер[8].

A. Pournaghshband, у своїй роботі на здобуття ступеня доктора філософії в University of Warwick (Ковентрі, Велика Британія) [9], досліджував двошарнірні арки з метою знаходження оптимальної безмоментної форми конструкції. Для числового аналізу трьох найпоширеніших форм арок був використаний метод скінченних елементів, реалізований за допомогою програмного забезпечення GSA.

Метою роботи було встановити вплив одноразових та повторних навантажень на напружено-деформований стан і несучу здатність двошарнірних залізобетонних арок з урахуванням штучного регулювання зусиль та удосконалення розрахунку таких арок.

Для досягнення мети намічено вирішити такі задачі:

- встановити особливості роботи нормальних перерізів двошарнірних залізобетонних арок при дії одноразового та повторних (малоциклових) навантажень без та зі штучним регулюванням зусиль;

Арки були окреслені по колу, мали наступні розміри: проліт – $L = 200$ см; стріла підйому – $f = 40$ см; радіус дуги арки ($f/L = 1/5$) – $R = 145$ см, висота – $h = 52$ см. Розміри поперечного перерізу прийняті рівними 10×14 см (рис. 1). Експериментальні арки являють собою моделі найбільш поширених арок у промисловому будівництві. Залізобетонні арки в покриттях є вигідними при прольотах більше 30 м.

Армування поперечних перерізів обох серій арок прийнято однаковим та виконано у вигляді просторового каркасу.

На опорних ділянках арки влаштовували закладні деталі із двох зварених пластин $\delta = 8$ мм. Для затяжки використовували стержень АІІ Ø 28 мм,

До кожної серії зразків відповідно виготовлялись куби та призми, завдяки яким були отримані дані про кубикову та призмову міцність бетону.

Випробування двошарнірних залізобетонних арок проводилось в гідравлічному пресі, обладнаному спеціальними траверсами. Навантаження прикладали двома зосередженими силами на відстані 40 см від центру симетрії арки. Для розкриття статичної невизначеності арки в затязці вимірювали розпір динамометром розтягу ДПУ 50-2 500 кН (рис. 2).

У процесі випробування арок вимірювались: деформації бетону, арматури, прогини арок, можливе переміщення опор, за допомогою механічних та тензометричних приладів (рис. 2). Дані отримані з тензорезисторів, які були розміщені на арматурі та бетоні вимірювали багатоканальною тензометричною системою ВНП-8 [10].

Арка 1А-1 навантажувалась одноразово ступенями до руйнування; арка 1А-2 та 1А-3 піддавалась десятикратному повторному навантаженню до рівня $F_{св} = 0,6F_u$, а на одинадцятому циклі були доведені до руйнування. В другій серії дослідів арка 2А-1 та 2А-2 випробовувалась одноразовим навантаженням до руйнування. Однак в арці 2А-2 було виконано попередній натяг зтяжки $\Delta H = 8,0$ кН (попереднє напруження). Значення додаткового зусилля визначали за розрахунком із врахуванням перерозподілу зусиль від максимального навантаження на арку 2А-1. Створене зусилля в затязці обумовлювало виникнення додаткової епюри зусиль.

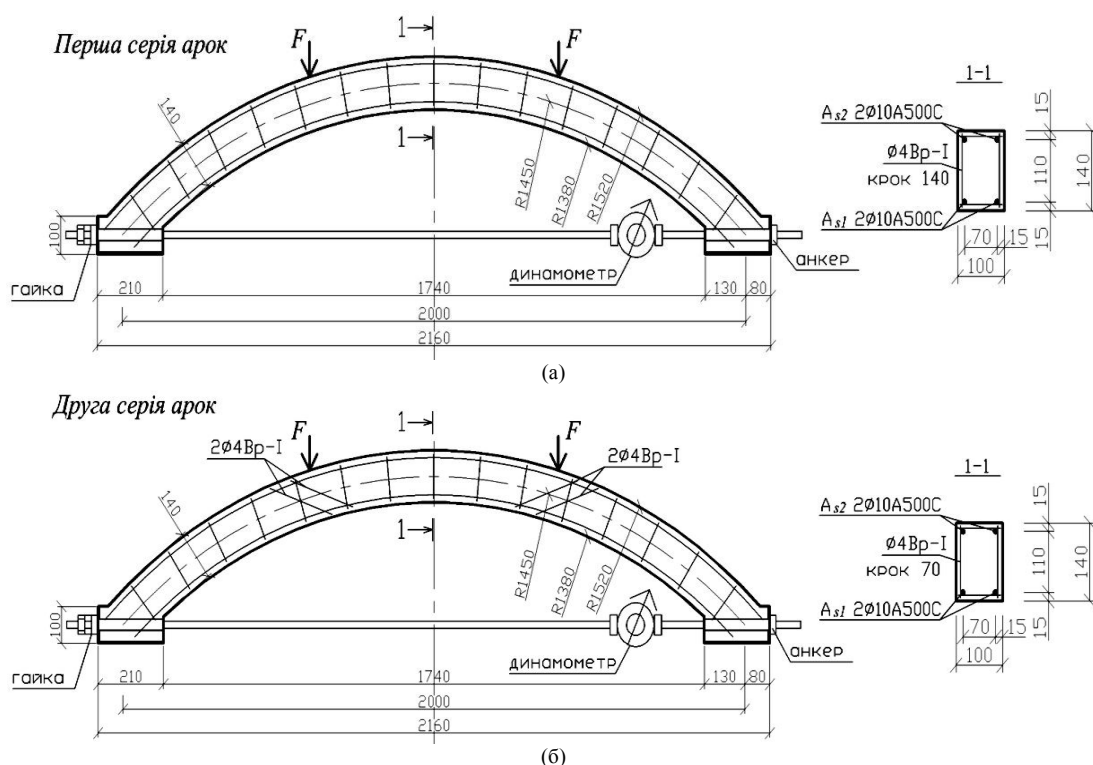


Рис. 1. Конструктивна схема дослідних арок: (а) – арки першої серії; (б) – арки другої серії

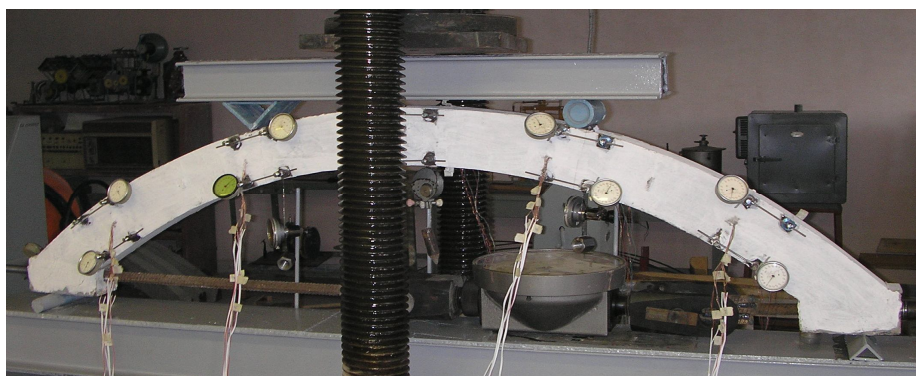


Рис. 2. Схема випробовування арок та розташування вимірювальних приладів на них

Арки 2А-3 та 2А-4 піддавались повторним короткочасним навантаженням, рівень яких складав 60 % від руйнівного. На початку навантаження було напружено зтяжку відповідно як і в арці 2А-2. На одинадцятому напівциклі вони були довантажені до руйнування.

Результати експериментальних досліджень. Заміряні значення зусиль у зтяжці дозволили розкрити статичну невизначеність арки та обчислити значення згинальних моментів у перерізах арки. При прийнятій схемі навантаження зусилля в зтяжці дорівнює $H_{pi}=1,41F$, при коефіцієнті податливості зтяжки $k_{th}=0,928$. Експериментальне значення коефіцієнта податливості зтяжки в арках 1А-1 та 2А-1 при монотонному навантаженні виявилось на 5 % менше, ніж теоретичне. Відповідно, значення згинальних моментів збільшилось.

Повторні навантаження вплинули на характер зміни зусиль в зтяжці на циклах навантаження до руйнування. На перших ступенях експериментальні значення були більшими, ніж теоретичні, коефіцієнт податливості збільшується до $k_{exp} = 1$ (до 10%). На рівні повторних навантажень розпір відповідав теоретичному значенню. При перевищенні рівня навантаження

$F > 70,0$ кН зусилля в затяжках почало зменшуватися. Така зміна розпору свідчить про те, що вже на першому циклі відбувся перерозподіл зусиль, на наступних арка працювала більш пружно. Збільшення розпору пояснюється стабілізацією пластичних деформацій та розвитком існуючих тріщин.

Відповідно до зміни зусиль у затяжках змінювалися значення згинальних моментів (рис. 3). Внаслідок дії повторних навантажень вони зменшувалися. При подальшому навантаженні арки до руйнування, починають переважати пластичні деформації та відбувається збільшення згинального моменту. На останньому ступені навантаження відбувається приріст пластичних деформацій та тріщин, утворився пластичний шарнір, а згинальний момент наближається до теоретичного значення.

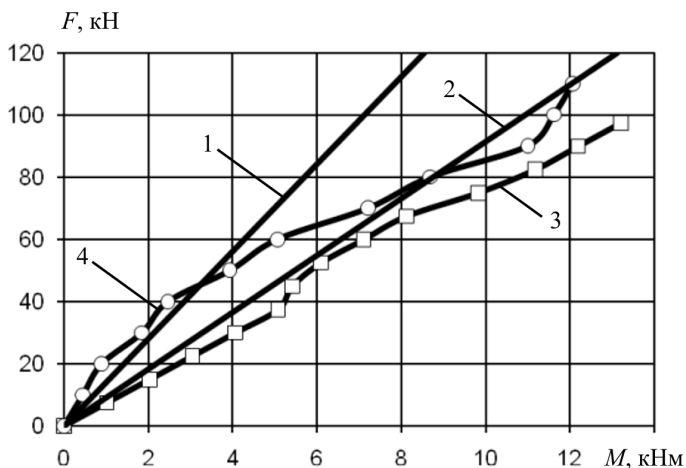


Рис. 3. Зміна згинальних моментів M :

1 – теоретичне при $k_{th} = 1,0$; 2 – теоретичне при $k_{th} = 0,928$; 3 – в арці 1а-1; 4 – середнє для арок 1а-2 і 1а-3

Характер зміни зусиль в арці 2А-1 схожий до арки 1А-1. Попереднє напруження затяжки в арці 2А-2 дозволило відразу перерозподілити зусилля в перерізах арки та зменшити згинальний момент на 28%.

Значення згинального моменту в арці 2А-2 з невеликим відхиленням відповідає теоретичному значенню. Після дії повторних навантажень в арках 2А-3 2А-4 моменти зменшуються до пружного значення, а на стадії руйнування збільшуються до теоретичного значення (працюють, як арки першої серії 1А-2 і 1А-3) (рис. 4).

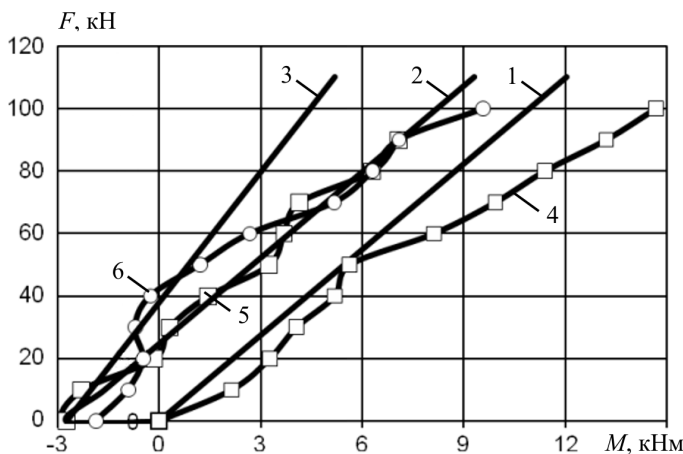


Рис. 4. Зміна згинального моменту M при повторного навантаження арок другої серії:

1 – теоретичне при $k_{th} = 0,928$; 2 – теоретичне при $k_{th} = 0,928$ з $\Delta H = 8$ кН; 3 – теоретичне при $k_{th} = 1,0$ з $\Delta H = 8$ кН; 4 – в арці 2А-1; 5 – в арці 2А-2; 6 – середнє для арок 2А-3 і 2А-4

Розвиток деформацій у бетоні і арматурі, показав вплив на них дію повторних навантажень. Після дії повторних навантажень залишкові деформації в розтягнутій арматурі та стиснутому бетоні складають до 38 % від деформацій на десятому циклі навантаження. Після збільшення навантаження у верхньому поясі арок почалися виникати додаткові пластичні деформації бетону та нові тріщини. Після попереднього напруження затяжки в арці 2А-2 відбувся вигин протилежний до напрямку навантаження, деформації бетону та арматури набули від'ємних значень. Деформування арок 2А-3 та 2А-4 на першому циклі відповідає зміні деформацій в арці 2А-2; на другому циклі відбувається різкий приріст деформацій. В подальшому деформації збільшувалися поступово та перевищили значення деформацій в арці 2А-1 на рівні $F = 60$ кН, оскільки позовжня сила збільшилась. При подальшому навантаженні до $F=100$ кН деформації бетону та арматури аналогічні значенням, визначеним в арці 2А-1, що випробовувалась без натягу затяжки (див. рис. 5).

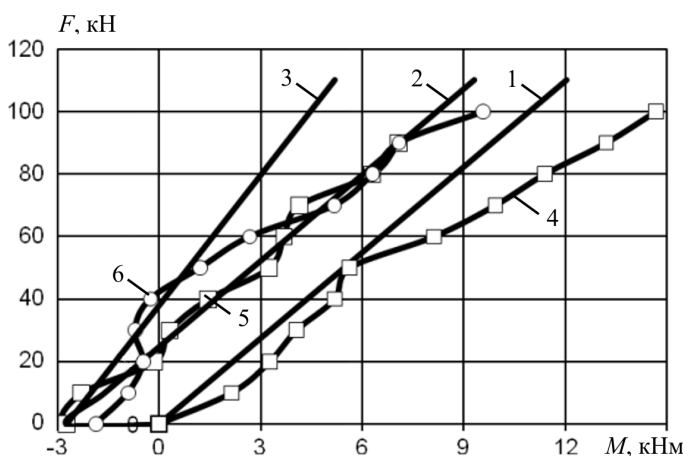


Рис. 4. Зміна згинального моменту M при повторного навантаження арок другої серії:

1 – теоретичне при $k_{th} = 0,928$; 2 – теоретичне при $k_{th} = 0,928$ з $\Delta H = 8$ кН; 3 – теоретичне при $k_{th} = 1,0$ з $\Delta H = 8$ кН; 4 – в арці 2А-1; 5 – в арці 2А-2; 6 – середнє для арок 2А-3 і 2А-4

Інтегральним показником впливу пластичних деформацій у бетоні можуть бути прогини криволінійного бруса. Внаслідок дії повторних навантажень залишкові прогини в арках 1А-2 і 1А-3 склали 1,85 та 1,75 мм (в середньому 1,8 мм), що складає 19 % від середнього прогину на першому циклі навантаження. Повторні навантаження змінили характер кривих залежностей прогинів арки.

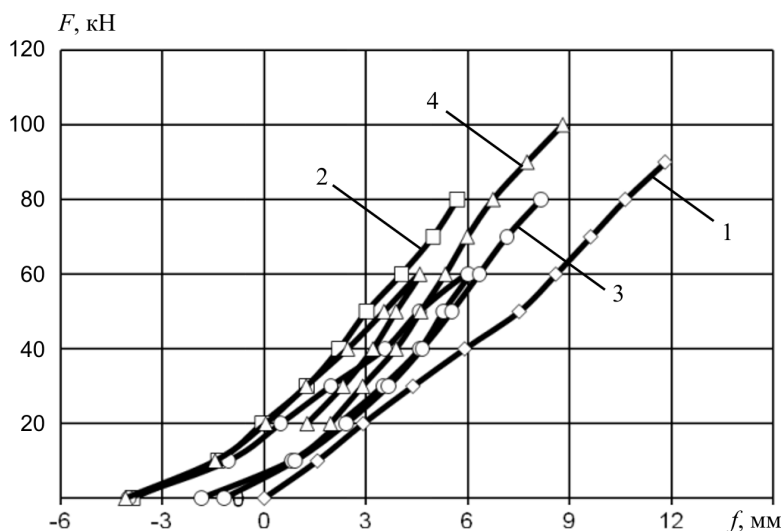


Рис. 6. Зміна прогинів при повторних навантаженнях арок другої серії:

1 – арка 2А-1; 2 – арка 2А-2; 3 – арка 2А-3 (1-й, 11-й цикли); 4 – арка 2А-4 (1-й, 11-й цикл)

В арках другої серії при напруженні зтяжки до $\Delta H = 8$ кН зафіксовано початковий вигин арки $f_0 = 3,89; 4,01; 4,1$ мм. Внаслідок повторних навантажень залишкові прогини складають 20 % від середнього прогину на першому циклі навантаження. Прогин в арках при повторних навантаженнях, що піддавались напруженню зтяжки на перших ступенях навантаження значно переважають прогинам в арках без попереднього натягу, а сумарний прогин близький один до одного. За рахунок початкового вигину арки кінцевий прогин зменшився на 35 % при монотонному навантаженні та на 14,7 % після повторних навантажень (див. рис. 6).

Арка 1А-1 зруйнувалась внаслідок руйнування бетону на ділянці прикладання навантаження, рівного $F = 125,0$ кН. Арки 1А-2 і 1А-3 після десятикратного навантаження, на одинадцятому циклі довантажувались до руйнування. В арці 1А-2 руйнівне навантаження склало $F = 107,0$ кН, а для арки 1А-3 – $F = 124,5$ кН.

Для арки 2А-1 руйнівна сила склала $F = 106,5$ кН. Арка 2А-2 випробовувалась, з попереднім напруженням зтяжки. Руйнівне навантаження склало $F = 98,0$ кН. Арки 2А-3 і 2А-4 піддавались десятикратному малоциклового навантаженню. Для арки 2А-3 руйнівне навантаження склало $F = 100,8$ кН, а для арки 2А-4 $F = 109,5$ кН (рис. 7).

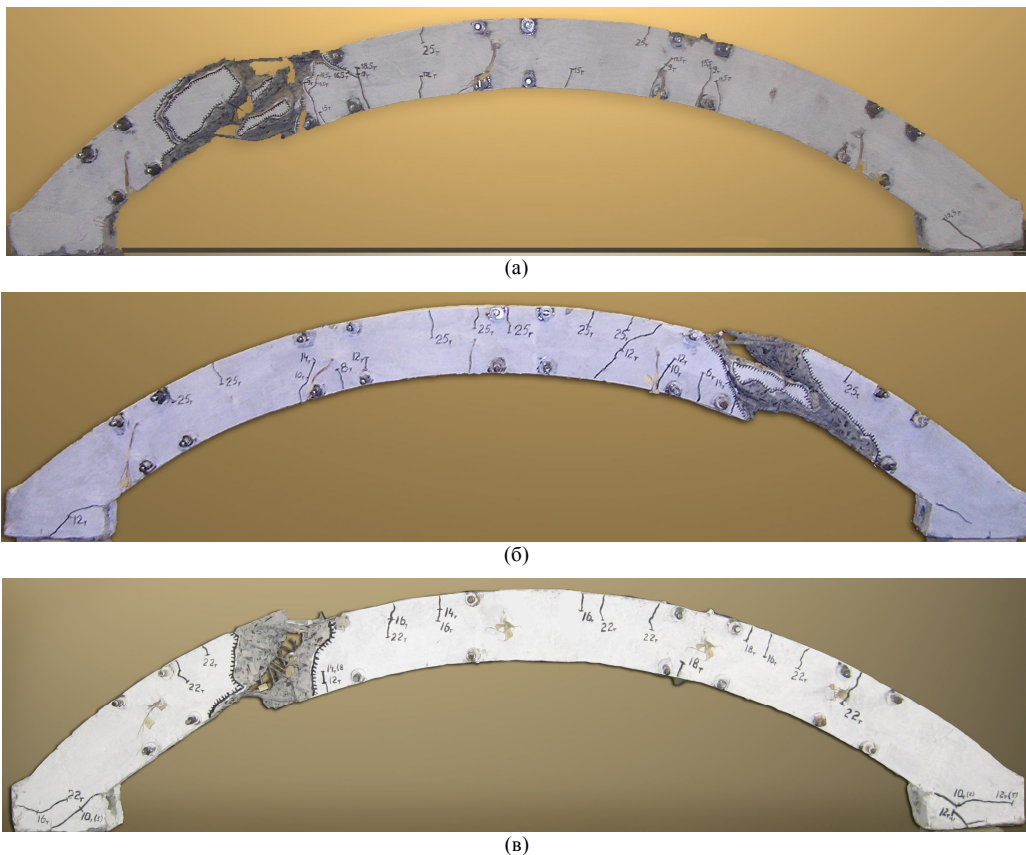


Рис. 7. Характер руйнування арок: (а) – 1А-1, (б) – 1А-3, (в) – 2А-4

В двохарнірних арках перерозподіл зусиль відбувся в перерізах верхнього поясу арки і зтяжці. Аркана рівні повторних навантажень працює пружно, коефіцієнт податливості наближається до $k_r = 1,0$. Штучне регулювання зусиль, шляхом попереднього напруження зтяжки, дає змогу вплинути на перерозподілу зусиль.

Внаслідок перерозподілу зусиль та регулюванні зусиль в зтяжці можна вирівняти максимальне значення згинального моменту під зосередженими силами та протилежні значення моментів (рис. 8). Це дає змогу економічно використати симетричне армування по всьому перерізу арки, знизити трудомісткість виготовлення, покращити якість

конструкцій[11]. Розрахунок зусилля попереднього натягу зтяжки необхідно враховувати коефіцієнт податливості $k_r = 1,0$.

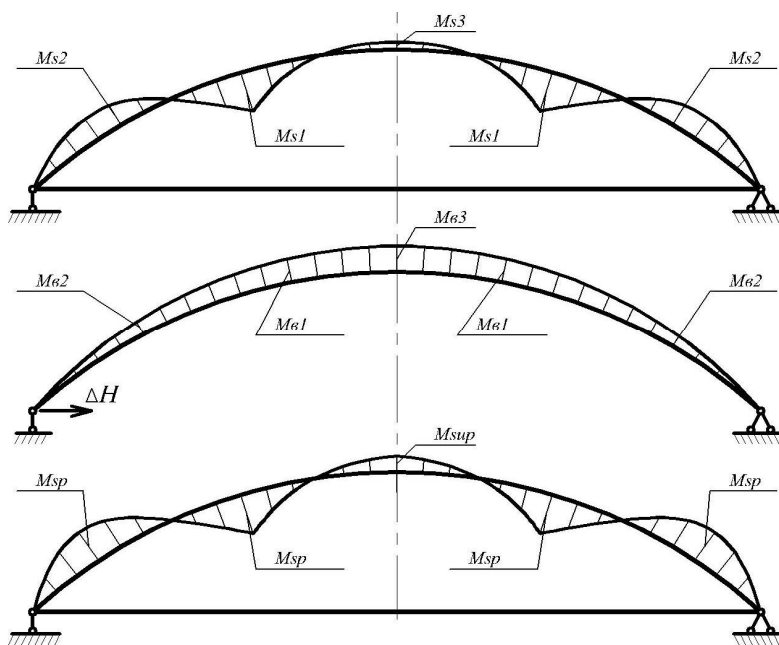


Рис. 8. Перерозподіл згинальних моментів в перерізах двошарнірної арки

Повторні навантаження впливають на напружено-деформований стан залізобетонних арок. Внаслідок дії даних навантажень збільшується коефіцієнт податливості зтяжки до 10 %, за рахунок зменшення жорсткості поясу арки.

Виникнення та розвиток тріщин, зростання пластичних деформацій у бетоні, внаслідок дії повторних навантажень, відбувається перерозподіл зусиль між верхнім залізобетонним поясом арки та зтяжкою. Збільшується розпір N та зменшується згинальний момент M .

При повторних навантаженнях, рівень яких не перевищує 60 % від руйнівного значення, можуть до 20 % збільшитися залишкові прогини залізобетонного поясу арки.

Попереднє напруження зтяжки може зменшувати згинальні моменти до 30% в перерізах арки, що дозволяє зменшити прогин та збільшити тріщиностійкість арки. Попередній натяг зтяжки, який визначений з умов граничної рівноваги, зменшує кінцеві прогини арки на 35 % при монотонному навантаженні та до 15 % – при повторних навантаженнях.

З наведених досліджень випливає, що внаслідок утворення й розвиток тріщин, зростання пластичних деформацій у бетоні, змінюється напружено-деформований стан та відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль у перерізах арки, жорсткість залізобетонного поясу арки зменшується та працює як пружний елемент. Запропонована методика дасть можливість надійніше проектувати залізобетонні арокні конструкції, а саме зменшити момент тріщиноутворення розтягнутої зони бетону, прогини конструкції без зменшення несучої здатності арокних конструкцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Y.M. Babych, O.V. Andriichuk, S.O. Uzhehov, R.V. Pasichnyk and D.Y. Kysliuk. Determination of stresses in thin-walled steel fiber reinforced concrete roofs in the form of hyperbolic paraboloid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – MSE, 2019. Volume 708, Number 1, 012042, p. 1-8. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012042 (Scopus та Web of Science Core Collection).
2. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень: Монографія. - Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999.- 119 с.
3. Jun Yang, Rui Chen, Zhongya Zhang, Yang Zou, Jianting Zhou, Junrun Xia. Experimental study on the ultimate bearing capacity of damaged RC arches strengthened with ultra-high performance concrete. Engineering Structures. Volume 279, 15 March 2023, 115611.

4. Jun Yang, Junrun Xia, Zhongya Zhang, Yang Zou, Zongshan Wang, Jianting Zhou. Experimental and numerical investigations on the mechanical behavior of reinforced concrete arches strengthened with UHPC subjected to asymmetric load. Structures. Volume 39, May 2022, P. 1158-1175.
5. Qilong Xia, Yuyin Wang, Jasmin Jelovica, Changyong Liu, Dawei Sun. Experimental study on corrugated steel-concrete composite semicircular arches under midspan loading. Structures. Volume 38, April 2022, P. 1137-1150.
6. Y M Babych , V V Savitskiy , O V Andriichuk , M V Ninichuk and D Y Kysliuk. Results of experimental research of deformability and crackresistance of two span continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – MSE, 2019. Vollume 708, Number 1, 012043, p. 1-8. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012043 (Scopus та Web of Science Core Collection).
7. Сабір Юсіф Бакір. Несуча здатність залізобетонних арок з урахуванням технологічної пошкодженості бетону. Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.01. - 2013. -22 с.
8. Караван Б. В. Результати експериментальних досліджень залізобетонної арки з високоміцного бетону на дію малоциклових повторних навантажень. Ресурсоekonomні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 43. Рівне, 2023. С. 137-145.
9. Asal Pournaghshband. Form-finding of Arch Structures – 2016. University of Warwick, School of Engineering.
10. Кислюк Д.Я. Робота і розрахунок залізобетонних арок з регулюванням зусиль при повторних навантаженнях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2012. 25 с.
11. Кислюк Д. Я., Задорожнікова І. В. Зміна напружено-деформованого стану в двохшарнірних залізобетонних арках з попереднім натягом зтяжки при повторних навантаженнях / Містобудування та територіальне планування. науково-технічний збірник. - Вип. 61. К.:КНУБА, - 2016. - С. 237-246.

REFERENCES

1. Y.M. Babych , O. V. Andriichuk, S. O. Uzhehov, R. V. Pasichnyk and D. Y. Kysliuk. Determination of stresses in thin-walled steel fiber reinforced concrete roofs in the form of hyperbolic paraboloid. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – MSE, 2019. Vollume 708, Number 1, 012042, p. 1-8. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012042 (Scopus та Web of Science Core Collection).
2. Babych Ye.M., Krus Yu.O. Betonni ta zalizobetonni elementy v umovakh malotsyklovykh navantazhen: Monohrafiia. (Concrete and reinforced concrete elements under short-cycle loads: Monograph) - Rivne: Vydavnytstvo Rivnenskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, 1999.- 119 s.
3. Jun Yang, Rui Chen, Zhongya Zhang, Yang Zou, Jianting Zhou, Junrun Xia. Experimental study on the ultimate bearing capacity of damaged RC arches strengthened with ultra-high performance concrete. Engineering Structures. Volume 279, 15 March 2023, 115611.
4. Jun Yang, Junrun Xia, Zhongya Zhang, Yang Zou, Zongshan Wang, Jianting Zhou. Experimental and numerical investigations on the mechanical behavior of reinforced concrete arches strengthened with UHPC subjected to asymmetric load. Structures. Volume 39, May 2022, P. 1158-1175.
5. Qilong Xia, Yuyin Wang, Jasmin Jelovica, Changyong Liu, Dawei Sun. Experimental study on corrugated steel-concrete composite semicircular arches under midspan loading. Structures. Volume 38, April 2022, P. 1137-1150.
6. Y.M. Babych, V.V. Savitskiy, O.V. Andriichuk, M.V. Ninichuk and D.Y. Kysliuk. Results of experimental research of deformability and crackresistance of two span continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – MSE, 2019. Vollume 708, Number 1, 012043, p. 1-8. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012043 (Scopus та Web of Science Core Collection).
7. Sabir Yusif Bakir. Nesucha zdattnist zalizobetonnykh arok z urakhuvanniam tekhnolohichnoi poshkodzenosti betonu. Avtoreferat dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. (Bearing capacity of reinforced concrete arches taking into account the technological damage of concrete. Abstract of the thesis. Ph.D. technical Sciences: 05.23.01.) - 2013. -22 s.
8. Karavan B.V. Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen zalizobetonnoi arky z vysokomitsnoho betonu na diiu malotsyklovykh povtornykh navantazhen (Results of experimental studies of a reinforced concrete arch made of high-strength concrete on the action of low-cycle repeated loads. Resource-saving materials, constructions, buildings and structures: Collection of scientific works) - Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. Vyp. 43. Rivne, 2023. S. 137-145.
9. Asal Pournaghshband. Form-finding of Arch Structures – 2016. University of Warwick, School of Engineering.
10. Kysliuk D.Ia. Robota i rozrakhunok zalizobetonnykh arok z rehulivanniam zusyly pry povtornykh navantazhenniakh: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01 (Operation and calculation of reinforced concrete arches with adjustment of forces under repeated loads: autoref. thesis Ph.D. technical Sciences: 05.23.01.) - Poltava, 2012. 25 s.
11. Kysliuk D.Ya., Zadorozhnikova I.V. Zmina napruzhenno-deformovanoho stanu v dvoksharnirnykh zalizobetonnykh arkakh z poperednim natiatom ztiazhyky pry povtornykh navantazhenniakh (Changes in the stress-strain state in two-hinged reinforced concrete arches with pretensioning under repeated loads) / Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. nauково-tekhnichnyi zbirnyk. - Vyp. 61. К.:КНУБА, - 2016. - С. 237-246.

Стаття надійшла 11.06.2024

Кислюк Д.Я., Савенко В.І., Ужегова О.А., Самчук В.П., Нінічук Н.В.

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРОК З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗУСИЛЬ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

У двохшарнірних арках шляхом регулювання зусилля в затяжці можна зменшити максимальні значення згинальних моментів у поперечних перерізах при певних навантаженнях та розмірах конструкції. Суцільні двохшарнірні арки можна виготовляти як на заводах залізобетонних конструкцій, так і безпосередньо на будівельних майданчиках залежно від розмірів конструкції, можливості транспортування, їхньої кількості та інших факторів. Такі арки застосовують у конструкціях покриття промислових та громадських будівель, мостових конструкціях, просторових покриттях споруд (діафрагми оболонки). У процесі експлуатації арки у складі покриттів промислових і цивільних будівлях та спорудах можуть піддаватись повторним навантаженням, інколи перевантаженням та пошкодженням, які суттєво впливають на напружено-деформований стан перерізів арки і затяжки. В двохшарнірних арках може відбуватися перерозподіл зусиль між верхнім поясом арки та затяжкою, який впливає на їх міцність і жорсткість.

Експериментально досліджено роботу двохшарнірних залізобетонних арок, що дає можливість дослідити особливості напружено-деформованого стану перерізів поясу та характер перерозподілу зусиль арки між верхнім поясом та затяжкою, розвитку прогинів та тріщин при одноразових та повторних короткочасних статичних навантаженнях.

Внаслідок утворення й розвитку тріщин, зростання пластичних деформацій у бетоні, змінюється напружено-деформований стан та відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль у перерізах арки, жорсткість залізобетонного поясу арки зменшується та працює як пружний елемент. Наведено методику розрахунку внутрішніх зусиль двохшарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях. Запропонована методика дасть можливість надійніше проектувати залізобетонні арокні конструкції, а саме зменшити момент тріщиноутворення розтягнутої зони бетону, прогини конструкції без зменшення несучої здатності арокних конструкцій.

Ключові слова: залізобетон, двохшарнірна арка, перерозподіл зусиль, попереднє напруження, напружено-деформований стан.

Kyslyuk D.Y., Savenko V.I., Uzhegova O.A., Samchuk V.P., Ninichuk M.V.

FEATURES OF THE WORK OF REINFORCED CONCRETE ARCHES WITH ADJUSTMENT OF EFFORT UNDER REPEATED LOADS

In two-hinged arches, by adjusting the tightening force, it is possible to reduce the maximum values of bending moments in cross-sections under certain loads and dimensions of the structure. Solid two-hinged arches can be manufactured both at factories of reinforced concrete structures and directly at construction sites, depending on the size of the structure, the possibility of transportation, their number and other factors. Such arches are used in constructions covering industrial and public buildings, bridge structures, spatial coverings of buildings (shell diaphragms). In the process of operation, arches as a part of coverings in industrial and civil buildings and structures can be subjected to repeated loads, sometimes overloading and damage, which significantly affect the stress-deformed state of the cross-sections of the arch and tension. In two-hinged arches, there can be a redistribution of forces between the upper belt of the arch and the tightening, which affects their strength and stiffness.

The work of two-hinged reinforced concrete arches was experimentally investigated, which makes it possible to investigate the features of the stress-strain state of the belt sections and the nature of the redistribution of arch forces between the upper belt and the tension, the development of deflections and cracks under one-time and repeated short-term static loads.

As a result of the formation and development of cracks, the growth of plastic deformations in concrete, the stress-strain state changes and there is a redistribution of internal forces in the cross-sections of the arch, the rigidity of the reinforced concrete belt of the arch decreases and it works as an elastic element. The methodology for calculating the internal forces of two-hinged reinforced concrete arches is presented, taking into account the redistribution of forces during repeated loads. The proposed method will make it possible to more reliably design reinforced concrete arched structures, namely to reduce the moment of cracking of the stretched concrete zone, the deflection of the structure without reducing the bearing capacity of arched structures.

Key words: reinforced concrete, double-hinged arch, redistribution of forces, preliminary stress, stressed-strained state.

УДК 624.012.25

Кислюк Д.Я., Савенко В.І., Ужегова О.А., Самчук В.П., Нінічук Н.В. **Особливості роботи залізобетонних арок з регулюванням зусиль при повторних навантаженнях** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 195-204.

Лл. 8. Бібліог. 11 назв.

UDC 624.012.25

Kyslyuk D.Y., Savenko V.I., Uzhegova O.A., Samchuk V.P., Ninichuk M.V. **Features of the work of reinforced concrete arches with adjustment of effort under repeated loads** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific – Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 195-204.

Figs. 8. Refs. 11.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету Кислюк Дмитро Ярославович

Адреса робоча: 43018, Україна, м. Луцьк Волинська обл., вул. Львівська, 75, Луцький національний університет

Тел.: +38(095)-395-49-00

E-mail: d.kyslyuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5794-8466>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук (ФРН), професор кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Савенко Володимир Іванович
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(097)-970-66-59

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, завідувач кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету Ужегова Ольга Анатолівна

Адреса робоча: 43018, Україна, м. Луцьк Волинська обл., вул. Львівська, 75, Луцький національний університет

Тел.: +38(050)-924-27-08

E-mail: o.uzhehova@lntu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2352-2907>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету Самчук Володимир Петрович

Адреса робоча: 43018, Україна, м. Луцьк Волинська обл., вул. Львівська, 75, Луцький національний університет

Тел.: +38(050)-273-93-67

E-mail: v.samchuk@lntu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри архітектури та дизайну Луцького національного технічного університету Нінічук Микола Володимирович

Адреса робоча: 43018, Україна, м. Луцьк Волинська обл., вул. Львівська, 75, Луцький національний університет

Тел.: +38(099)-038-13-79

E-mail: m.ninichuk@lutsk-ntu.com.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-5615>