624.07

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ АРКИ З ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ НА ДІЮ МАЛОЦИКЛОВИХ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A REINFORCED CONCRETE ARCH MADE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE ON THE ACTION OF LOW-CYCLE REPEATED LOADS

Караван Б. В., аспірант, ORCID ID: 0000-0002-0492-7544 (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне)

Karavan B., postgraduate student, ORCID ID: 0000-0002-0492-7544 (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

Наведені методика та результати експериментальних досліджень залізобетонної арки з затяжкою, виготовленої із високоміцного бетону. Описано напружено-деформований стан арки за дії статичних малоциклових повторних навантажень різного рівня до руйнування, визначена її несуча здатність. Наведені та описані графіки залежності навантаження та деформації бетону і арматури, залежності прогинів та переміщення опор арки від навантажень. Описано процес тріщиноутворення і розвитку тріщин в залізобетонній арці при дії повторних навантажень різного рівня.

Currently, the use of reinforced concrete arches is expanding in the construction of buildings and structures, in particular for fortification and civil defense buildings. Particularly noteworthy are arches made of high-strength concrete, which helps to reduce the weight of structures and loads on other structural elements of buildings, foundations and bases. Given the small number of experimental studies of reinforced concrete arch structures and the lack of such studies of arches made of high-strength concrete, it is relevant to study the stress-strain state of arches made of high-strength concrete under the influence of force effects of various nature and intensity by experimental means. The task was to determine, through experimental and theoretical studies of a reinforced concrete arch made of high-strength concrete, the change in the stress-strain state in the cross-sections of the curved belt and the nature of their destruction under the action of low-cycle repeated loads. To perform the experimental studies, the main prototype in the form of a hollow two-joint reinforced concrete arch with a high-strength concrete tie was made and auxiliary samples - cubes and prisms - were used to determine the physical and mechanical characteristics of concrete. The mechanical characteristics of concrete (cube and prism strengths) under a single short-

term load were determined by standard methods. The paper presents the methodology and results of experimental studies of a reinforced concrete arch with a tie-in made of high-strength concrete. The stress-strain state of the arch under the action of static low-cycle repeated loads of different levels until destruction is described, and its bearing capacity is determined. The graphs of load and deformation dependence of concrete and reinforcement, deflections and movement of arch supports on loads are presented and described. The process of crack formation and crack development in a reinforced concrete arch under the action of repeated loads of different levels is described. The experimental reinforced concrete arch with a tightening was tested for static short-term low-cycle repeated loading until failure

Ключові слова: арка, бетон, арматура, залізобетон, навантаження, деформації, прогин, тріщина, руйнування.
Arch, concrete, reinforcement, reinforced concrete, load, deformation, deflection, crack, destruction.

Вступ. Залізобетонні арочні конструкції широко використовуються в будівництві, починаючи від перемичок віконних пройомів, до конструкцій покриття промислових та цивільних будівель (у тому числі у складі діафрагм оболонок), споруд спортивного призначення, несучих прогонових конструкцій мостів і переходів, акведуків. З 2014 року, та особливо після повномасштабного вторгнення 24 лютого 2022 р., в Україні стала гострою необхідність відновлення існуючих та зведення нових фортифікаційних споруд оборонного призначення та захисних споруд для захисту цивільного населення. Однією з ефективних конструктивних схем захисної будівлі є сполучення конструктивних елементів, зведених з монолітного залізобетону, та збірних елементів у вигляді двохшарнірних арок прольотом від 2 м, виготовлених з високоміцного бетону. Враховуючи незначну кількість експериментальних досліджень залізобетонних арочних конструкцій та відсутність таких досліджень арок виготовлених з високоміцних бетонів, є актуальним вивчення експериментальним шляхом напружено-деформованого стану арок з високоміцних бетонів на дію силових впливів різного характеру та інтенсивності.

Аналіз останніх досліджень. Сабір Юсіф Бакір у своїй науковій роботі [1], під керівництвом Пушкар Н.В., досліджував несучу здатність залізобетонних арок з урахуванням технологічної пошкодженості бетону. За мету в роботі було поставлено: експериментально-теоретичним шляхом обґрунтувати вплив технологічної пошкодженості на напружено-деформований стан арочних конструкцій з важкого бетону. Були виготовлені та випробувані на дію одноразового короткочасного навантаження, за різної схеми його розташування, 12 моделей залізобетонних двошарнірних арок прольотом 210 см із розмірами поперечного перерізу поясу 5×7 см. Арки, окреслені по колу, мали стрілу підйому f=42 см (f/l=1/5), радіус дуги арки

становив R=152,3 см. Арки виготовлені з бетону класу С40/50, армувалися плоским в'язаним каркасом зі стержнів Ø4 мм класу Вр-І. Автором встановлено, що на ступенях завантаження перші силові тріщини розвивались по траєкторіям технологічних тріщин на висоту до 0,25h. При завантажені зосередженим навантаженням в третині і чверті прольоту поясу арки силові тріщини розвиваються несиметрично відносно осі симетрії арки, аналогічно відрізняється і деформування осі арки. Найменша несуча здатність була в двошарнірних арках, завантажених у чверті їх прольоту, а найбільша – в арках, завантажених зосередженою силою у середині прольоту. Виявили значну розбіжність у значеннях прогинів, ексцентриситетів поздовжніх сил та несучої здатності залізобетонних двошарнірних арок, отриманих за результатами розрахунку у ПК «SCAD» за пружною стадією і з урахуванням тріщин та деформацій у порівнянні з експериментальними значеннями. Автор рекомендує розраховувати двошарнірні арки за деформаційною схемою.

Постановка мети і задач досліджень. Було поставлено за мету шляхом експериментальних та теоретичних досліджень залізобетонної арки з високоміцного бетону встановити зміну напружено-деформованого стану у перерізах криволінійного поясу та характер їх руйнування за дії малоциклових повторних навантажень. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання: розроблена конструкція та виготовлені дослідні зразки з високоміцних бетонів; розроблено методику експериментальних досліджень та виконані випробування дослідного зразка; здійснена обробка і аналіз експериментальних даних.

Методика досліджень. Для виконання експериментальних досліджень виготовили основний дослідний зразок у вигляді пологої двошарнірної залізобетонної арки із затяжкою з високоміцного бетону класу С75 та допоміжні зразки – куби і призми для визначення фізико-механічних характеристик бетону [2]. Основні механічні та деформативні властивості високоміцних бетонів, які були отримані в результаті випробувань бетонних кубів та призм описані в [3]. Арка мала розрахунковий проліт L = 200 см, повну висоту H = 52 см, стрілу підйому f = 40 см та поперечний переріз криволінійного поясу 10(b)×14(h) см (рис. 1). Бетон виготовлявся за складом Ц:Щ:П=1:1,70:1,36 при В/Ц =0,22 з добавкою 10% від кількості води суперпластифікатора. В якості крупного заповнювача використовувався гранітний щебінь фракції 5…20 мм, а дрібного – кварцовий пісок із модулем крупності 1,8. В'яжучим матеріалом слугував портландцемент марки М500. Армування арок – симетричне, виконувалось за допомогою плоского в'язаного каркасу, стержні робочої поздовжньої арматури – Ø10 А500С, поперечна арматура каркасу – з дроту діаметром 4 мм Вр-1 із кроком 70 мм. В якості затяжки прийняли арматурний стержень діаметром 16 мм А500С.

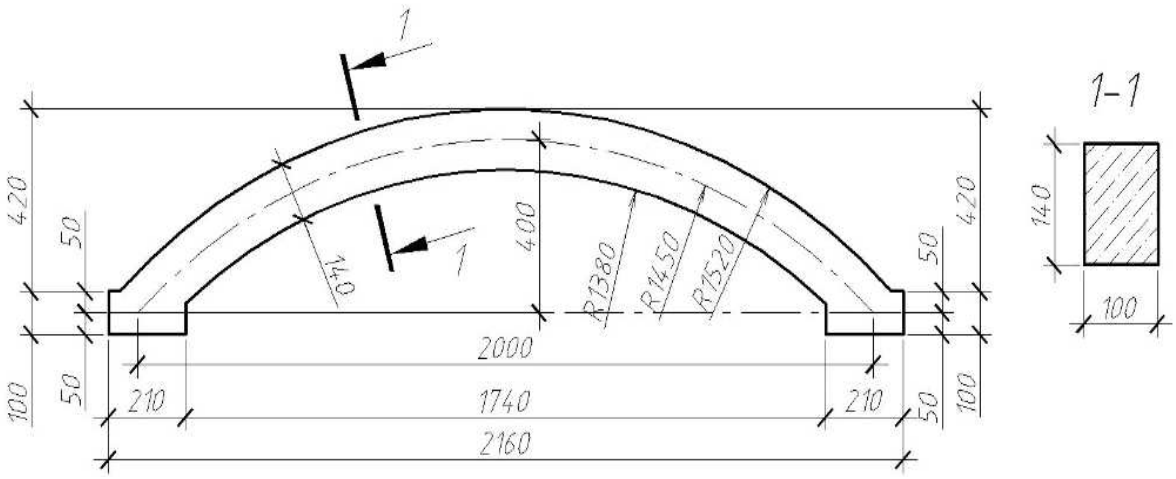

Рис. 1. Опалубне креслення дослідних зразків арок (розміри в мм)

Арка випробовувалась в установці, змонтованій на базі гідравлічного преса УИМ-200. Навантаження арки здійснювали за допомогою гідравлічної насосної станції ступенями, величина яких складала 5 кН. Величину навантаження на ступенях контролювали попередньо протарованим у гідравлічному пресі ПГ-250 динамометром Д-1. Використовуючи жорстку траверсу навантаження прикладали до поясу арки у вигляді двох зосереджених сил. На кожному ступені навантаження влаштовували витримку протягом 5-15 хв для зняття відліків за приладами, стабілізації деформацій у бетоні та фіксації параметрів тріщиноутворення й ширини розкриття тріщин у поясі арки. На ступенях навантаження деформації розтягу і стиску арматури й затяжки вимірювали за тензометрами Гугенбергера на базі 20 мм з ціною поділки 0,001 мм. Деформації бетону розтягу і стиску фіксували механічними індикаторами годинникового типу 1(2)МИГ з ціною поділки 0,001(2) мм на базі в середньому 100 мм, які фіксувалися на арку за допомогою металевих тримачів, приклеєних до бетонної поверхні епоксидним клеєм. Прогин арки вимірювали в середині прольоту за допомогою прогиноміра 6ПАО з ціною поділки 0,01 мм. Також за допомогою прогиноміра 6ПАО та індикатора годинникового типу ИЧ-10м з ціною поділки 0,01 мм вимірювали переміщення арки на двох її опорах. Загальний вигляд дослідної арки в установці наведений на рис. 2.

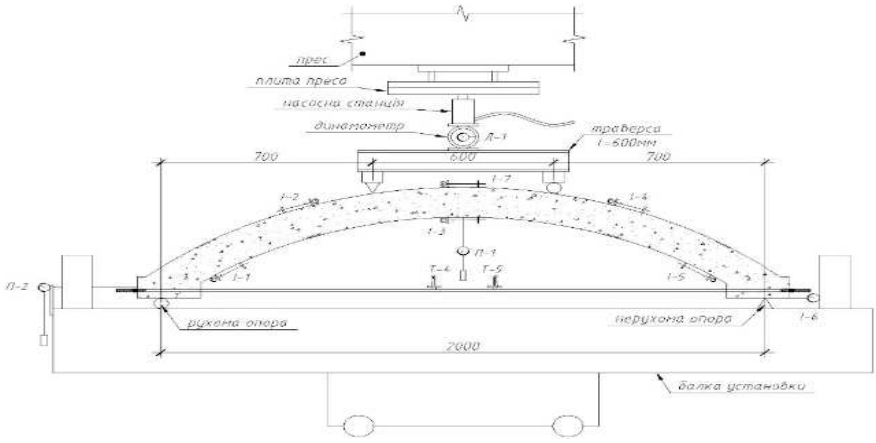

Рис.2. Загальний вигляд дослідного зразка арки в установці де:Т-4, Т-5– тензометр Гугенбергера; І-1, І-2, І-3, І-4, І-5, І-7 – індикатор годинникового типу 1(2)МІГ; І-6 – індикатор ИЧ-10м; П-1, П-2 – прогиномір 6ПАО; Д-1– динамометр.

Дослідна залізобетонна арка з затяжкою випробовувалась на дію статичного короткочасного малоциклового повторного навантаження до руйнування (рис. 3). В роботі [3] наведені результати випробування однієї залізобетонної арки з затяжкою на дію статичного одноразового навантаження, виготовленої з бетону того ж замісу. За результатами випробування арки визначили руйнівну силу Fu, яка в даному дослідженні приймалась в якості критичного руйнівного навантаження.

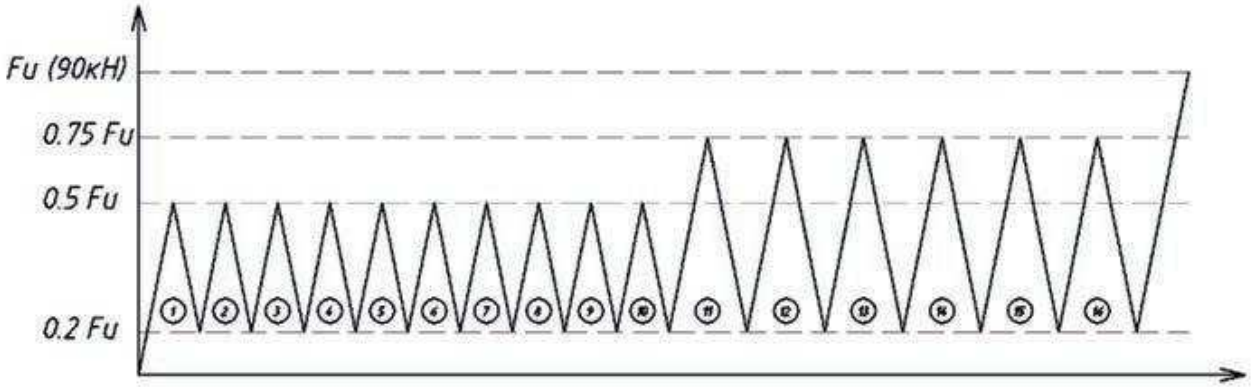

Рис.3. Схема навантаження дослідної арки по циклам

На першому циклі навантаження подавалось ступенями (по 5 кН) до значення F=45 кН=0,5Fu. Після чого з кроком в 10 кН арка розвантажувалась до значення F=18 кН=0,2Fu. На наступних 2…10 циклах верхній рівень навантаження становив F=45 кН=0,5Fu з розвантаженням до значення F=18 кН=0,2F. На кожному ступені навантаження дотримувались витримки для стабілізації деформацій в бетоні і зняття відліків. На одинадцятому циклі, навантаження з F=45 кН=0,5Fu збільшили до значення F=67,5 кН=0,75Fu ступенями в 5кН. Після чого арка розвантажувалась до значення F=18 кН=0,2Fu. На наступних циклах, навантаження на арку прикладалось від нижнього рівня F=18 кН=0,2Fu до верхнього в F=67,5 кН=0,75Fu ступенями в 20кН. Після 16 циклу арка доводилась до руйнування навантаженням, яке подавалось ступенями по 5 кН до значення Fu=90 кН (рис. 5).

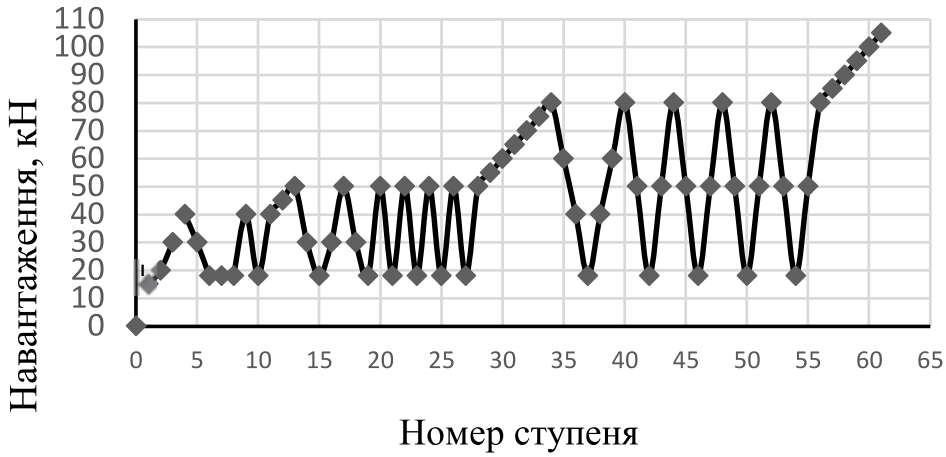

Рис.4. Методика випробування дослідної арки на дію повторних навантажень

Результати досліджень. Можна стверджувати, що на першому циклі навантаження до рівня 0,5Fu у стиснутому бетоні в значній мірі проявляються пластичні деформації (рис. 5). Залишкові деформації стиснутого бетону на першому циклі при навантаженні 0,2Fu становили $\Delta\varepsilon c = 52{,}9\times10\text{-}5$. На подальших циклах повторного навантаження, без збільшення його рівня, спостерігається стабілізація деформацій у стиснутому бетоні і він працює практично пружно з незначним приростом частки пластичних деформацій. За 10 циклів навантаження приріст залишкових деформацій у стиснутому бетоні склав $\Delta\varepsilon c = 8{,}5\times10\text{-}5$. При довантажені арки до рівня навантаження 0,75Fu відносні деформації у стиснутому бетоні зросли з суттєвим приростом частки пластичних деформацій, залишкові деформації на циклі при навантаженні 0,2Fu становили $\Delta\varepsilon c = 13{,}8\times10\text{-}5$. На подальших 6 циклах повторного навантаження до рівня 0,75Fu спостерігали поступову стабілізацію пластичних деформацій у стиснутому бетоні, приріст залишкових деформацій за 6 циклів навантаження склав $\Delta\varepsilon c = 7{,}7\times10\text{-}5$. Відносні деформації бетону стиску на останній ступені навантаження становили $\varepsilon c = 150\times10\text{-}5$.

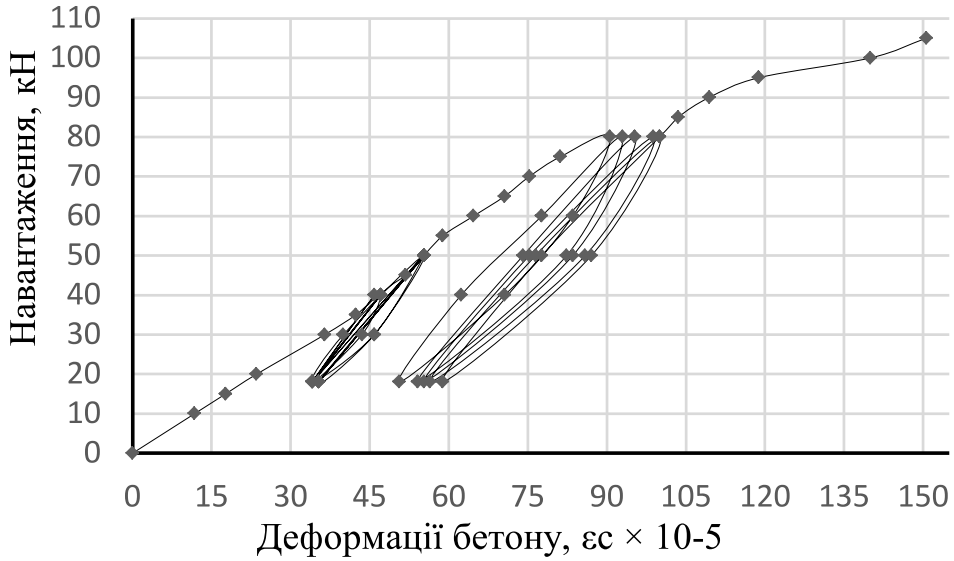

Рис. 5. Відносні деформації бетону у стиснутій зоні по індикатору І-4

Відносні деформації у стиснутій та розтягнутій робочій арматурі поясу арки за руйнівного навантаження були меншими за значення деформацій на межі текучості сталі. Деформації розтягу арматури затяжки лінійно збільшувались залежно від навантажень (рис. 6). Так на десятому циклі при рівні навантаження 0,5Fu відносні деформації розтягу затяжки склали εs = 57,5×10-5, на шістнадцятому циклі при рівні навантаження 0,75Fu відносні деформації розтягу затяжки становили εs = 95×10-5. При досягнені в арках значення критичної сили Fu=90 кН відносні деформації затяжки розтягу склали εs = 105×10-5, що менше деформацій на межі текучості сталі. Загалом, зі збільшенням навантаження деформації в арматурі збільшувались, але можна зробити висновок, що сталь до руйнування працювала пружно.

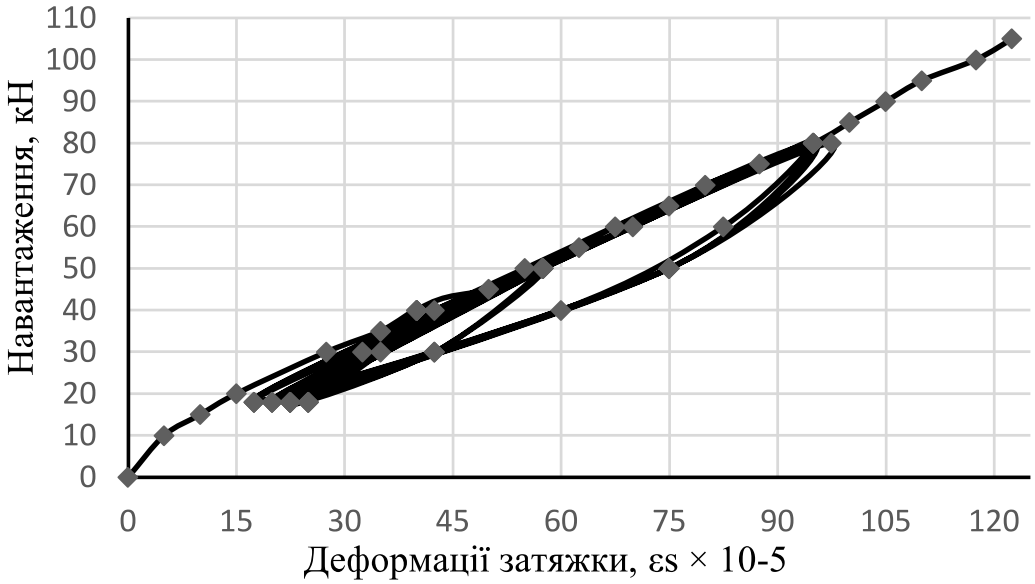

Рис. 6. Відносні деформації в затяжці арки

Залежність зміни прогину в середині прольоту арки від навантажень до руйнування має чітко виражений лінійний характер (рис. 7). Зі збільшенням рівня навантаження на арку прогин збільшувався, з його подальшою стабілізацією на циклах повторного навантаження. Прогин арки на останньому ступені навантаження до руйнування при Fu=90 кН становив f = 7,09 мм, що менше гранично допустимого значення по нормам $f_u = l/150 = 13,3$ *мм.*

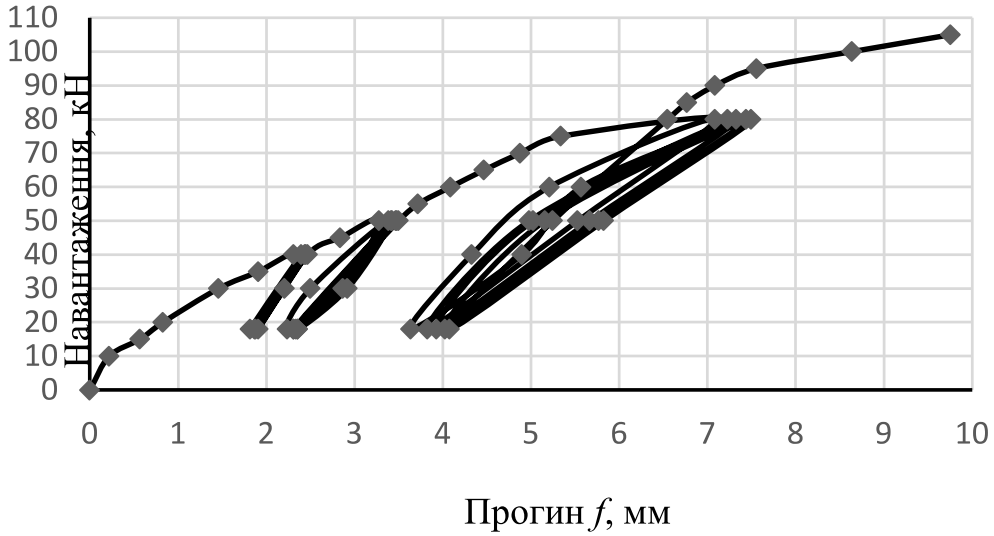

Рис. 7. Залежність прогину арки від навантаження

Перша вертикальна тріщина утворилась в перерізі під зосередженою силою в нижній зоні поясу арки на 7 циклі при навантажені F=30 кН. Зі збільшенням навантаження на 16 циклі спостерігали розвиток існуючих та утворення двох нових вертикальних тріщин у перерізах поясу арки. При навантаженні F=90 кН ширина розкриття магістральної (критичної) тріщини становила wk=0,3 мм, при подальшому довантажені дослідної арки ширина розкриття тріщини склала wk=0,45 мм. Нормальні наскрізні тріщини розбили пояс арки на окремі блоки, він втратив жорсткість (рис. 8).

Рис. 8. Вигляд арки з контурами тріщин після випробування

Висновки та рекомендації. В двошарнірній залізобетонній арці з затяжкою виготовленої із високоміцного бетону відбувається, внаслідок утворення й розвиток тріщин, зростання пластичних деформацій у бетоні, зміна напружено-деформованого стану з перерозподілом внутрішніх зусиль у перерізах верхнього поясу по його довжині. Пояс арки працює як стиснуто-зігнутий елемент. Відносні деформації бетону стиску при руйнуванні арки досягли граничних значень. На циклах повторного навантаження, без збільшення його рівня, спостерігається стабілізація деформацій у стиснутому бетоні і він працює практично пружно з незначним приростом частки пластичних деформацій. Деформації розтягу арматури затяжки лінійно збільшувались залежно від навантажень. Залежність зміни прогину в середині прольоту арки від навантажень до руйнування має лінійний характер.

1. Сабір Юсіф Бакір. Несуча здатність залізобетонних арок з урахуванням технологічної пошкодженості бетону. Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.23.01. – 2013. – 22 с.

Sabir Yusif Bakir. Nesucha zdatnist zalizobetonnykh arok z urakhuvanniam tekhnolohichnoi poshkodzhenosti betonu. Avtoreferat dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.01. – 2013. – 22 s.

2. ДБН В.2.6-98-2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. К.: Мінбуд. України, 2009.

DBN V.2.6-98-2009 Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. K.: Minbud Ukrainy, 2009.

3. Бабич Є.М. Караван Б.В. “Результати експериментальних досліджень залізобетонної арки з високоміцного бетону”// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне: НУВГП. 2022. Випуск 42. С. 76–85.

Babich Y., Karavan B., “Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen zalizobetonnoi arky z vysokomitsnoho betonu”// Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. Rivne: NUVHP. 2022. Vypusk 42. S. 76–85.

4. Бабич Є. М., Кочкарьов В. Д., Філіпчук С. В., Караван Б. В. Конструктивні рішення та розрахунок елементів захисних споруд цивільного захисту з залізобетонними арочними покриттями // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. Рівне: «Волинськіобереги».2021. Випуск 39. С. 162–176.

Babych Y., Rochkarev D., Filipchuk S., Karavan B., “Konstruktyvni rishennia ta rozrakhunky elementiv zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu z zalizobetonnymy arochnymy pokryttiamy”// Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. Rivne: NUVHP. 2021. Vypusk 39. S. 162–176.

5. Проектування залізобетонних конструкцій: посібник/Бамбура А. М. та інші. Київ.2018. 240 с.

Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii: posibnyk/Bambura A.M. ta inshi.Kyiv.2018.240s.