

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКАХ З ВИСОКОМІЦЬНОГО БЕТОНУ НА ДІЮ
КОРОТКОЧАСНИХ СТАТИЧНИХ ОДНОРАЗОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

**STUDY OF CRACK FORMATION PROCESSES IN REINFORCED
CONCRETE ARCHES MADE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE UNDER
SHORT-TERM STATIC SINGLE LOADS**

Караван Б.В., доктор філософії, старший викладач, ORCID ID: 0000-0002-0499-7544; **Караван В.В.**, к.т.н., доцент, ORCID ID: 0000-0002-8261-692X; **Філіпчук С.В.** д.т.н., доц., ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, **Попрожук П.П.** аспірант, (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне)

Karavan B., Ph.D., senior lecturer, ORCID ID: 0000-0002-0499-7544; **Karavan V.**, candidate of technical sciences, associate professor, ORCID 0000-0002-8261-692X; **Filipchuk S.V.** doctor of technical sciences, associate professor, ORCID ID: 0000-0002-4464-4620, **Poprozhuk P.P.** postgraduate, (The National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Наведена методика та результати дослідження роботи двошарнірної залізобетонної арки без затяжки з високоміцного швидкотверднучого бетону на дію короткочасного статичного одноразового навантаження. Описані процеси тріщиноутворення в арці. На основі експериментальних даних побудовано графіки залежності ширини розкриття тріщин від навантаження, а також кількості тріщин від навантаження.

The use of high-strength concrete can significantly reduce the volume of concrete, and thus the dead weight of structures, and reduce the consumption of reinforcing steel in reinforced concrete structures. The strength of heavyweight concrete can reach 80-150 MPa, and design standards for structures made of such concrete in Ukraine are currently under development. The deformation patterns under short-term static and dynamic loading of high-strength concrete have not yet been studied sufficiently, which complicates the calculation of reinforced concrete structures made of such concrete, especially at high load levels, and is a deterrent to their wider use in modern construction. Based on the foregoing, there is a need to study the stress-strain state of reinforced concrete arches made of high-strength concrete under the action of static single and repeated loads of different levels and to determine in-depth the physical, mechanical, and deformation characteristics of high-strength concrete. This will make it possible to more accurately assess the stress-strain state of elements of reinforced concrete structures made of such concrete,

improve design reliability, and obtain a significant economic effect in the construction of buildings and structures, which is an urgent task of today. The paper describes the operation of double-jointed reinforced concrete arches made of high-strength quick-setting concrete.

The peculiarities of the stress-strain state of the belt sections and the nature of crack development under single short-term static loads were investigated. For the prototypes of arches, diagrams of the dependence of the crack opening width and the number of cracks in the arch belt on the loads were constructed. The design of the prototypes and the process of their manufacture are described. The test methodology for the prototype arches is described, test schemes with the placement of measuring devices and their loading modes are shown.

Ключові слова: залізобетон, арка, навантаження, руйнування, арматура, тріщини, графік, діаграма, залежність, тріщиностійкість.
Reinforced concrete, arch, load, fracture, reinforcement, cracks, graph, diagram, dependence, crack resistance.

Вступ. Залізобетонні арочні конструкції широко використовуються у промисловому, цивільному будівництві, а також при зведенні спеціальних будівель і споруд [1, 2]. Залізобетонні арки бувають безшарнірними, одно-, дво-, тришарнірними. Найчастіше у будівництві використовують двошарнірні арки з затяжкою та без неї, а у випадку великих прольотів – тришарнірні. Суттєвим недоліком одно- і тришарнірних арок є необхідність влаштування ключового шарніру, який в свою чергу ускладнює конструкцію арок і самого покриття. У безшарнірних арках найсприятливіше відбувається перерозподіл згинальних моментів у поясі, проте вони вимагають влаштування потужних опор для сприйняття розпіру. Саме тому у покриттях будівель і споруд частіше застосовуються двошарнірні арки, горизонтальний розпір яких сприймається затяжкою або конструктивними елементами споруди.

Аналіз останніх досліджень. Дисертаційна робота та наукові статті Кислюка Д.Я. [3, 4] присвячені вивченню роботи двошарнірних залізобетонних арок з регулюванням зусиль при дії повторних навантажень. Досліди проводились на 7-ми двошарнірних, окреслених по колу, суцільних арках з важкого бетону класу С20/25 прольотом 200 см, із стрілою підйому $f=40$ см та розмірами поперечної перерізу поясу 10×14 см. Арки армували просторовими каркасами з симетрично розташованими чотирма стержнями $\varnothing 10$ мм класу А500С, крок поперечної арматури $\varnothing 4$ мм класу Вр-I становив 70 мм та 140 мм. Арматурний стержень затяжки – $\varnothing 28$ мм класу А-II.

Одна арка першої серії випробовувалась на дію одноразового ступеневого навантаження до руйнування, а дві арки зазнавали дії повторного (10 циклів) навантаження рівня $F_{сус}=0,6F_u$. Дві арки другої серії, без та з виконаним

попереднім натягом зтяжки, випробовувались одноразовим навантаженням до руйнування.

Перші тріщини в дослідних арках виникли в місцях прикладання сил при $F = 30,0-37,5$ кН. При навантаженні $F = 50,0-67,5$ кН утворювались тріщини по всій довжині поясу арок та на опорах, спостерігався значний розвиток існуючих тріщин. Необхідно зазначити, що при крихкому характері руйнування арок деформації в розтягнутій арматурі не досягали своїх максимальних значень, а в стиснутій зоні арматура досягла межі текучості.

За результатами експериментальних досліджень автор робить висновки про те, що повторні навантаження впливають на напружено-деформований стан арок, внаслідок чого збільшується податливість зтяжки, тобто, зменшується її жорсткість. Внаслідок повторних навантажень в межах 18% можуть збільшитися залишкові прогини, а також спостерігалось зменшення міцності арок по похилих перерізах. Утворення і розвиток похилих тріщин та зростання пластичних деформацій у бетоні спричиняє перерозподіл внутрішніх зусиль у верхньому поясі арок й зтяжці, при цьому зменшується приріст розпіру та збільшується згинальний момент. Попереднє напруження зтяжки арки сприяє збільшенню тріщиностійкості її поясу, зменшенню прогину та збільшенню загальної жорсткості.

Постановка мети і задач досліджень. Ставиться за мету: дослідити процеси тріщиноутворення в двошарній залізобетонній арці з високоміцного бетону за дії короточасного одноразового навантаження шляхом експериментальних випробувань.

Для досягнення зазначеної мети поставлено наступні задачі:

- розробити конструкцію та виготовити дослідний зразок, використавши в якості матеріалу високоміцний швидковтврднучий бетон;
- встановити особливості тріщиностійкості та процеси тріщиноутворення в двошарній залізобетонній арці з високоміцного бетону за результатами проведення експериментальних досліджень та аналізу отриманих даних;

Методика досліджень. Залізобетонна арка випробовувалась на дію статичного навантаження [5] до руйнування (рис. 1). Для сприйняття зусилля розпіру арки на балці преса влаштувались упори з металевих прокатних профілів, тим самим моделюючи передачу розпіру від арок покриття споруд на стінові конструкції, фундаменти тощо. Зусилля розпіру арки від прикладеного навантаження вимірювались на опорі за допомогою попередньо протарованого кільцевого динамометра. Зосереджене навантаження передавалось від гідродомкрата на траверсу довжиною 600 мм яка, в свою чергу, передавала навантаження на арку двома зосередженими силами на відстані 300 мм від осі симетрії арки. Сила вимірювалась попередньо протарованим на пресі П-250 кільцевим динамометром (рис. 1). Точність вимірювання навантаження становила 0,05% (ціна поділки кільцевого динамометра – 0,4 кН).

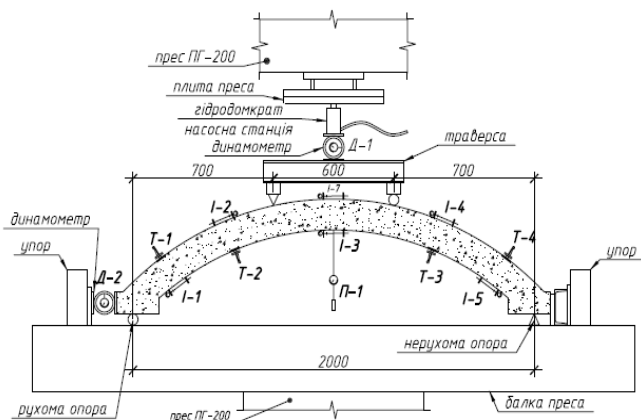


Рис. 1. Схема випробування арки з розміщенням вимірювальних приладів: Т-1...Т-4 – тензометри Гугенбергера; І-1...І-7 – індикатори годинникового типу І(2)МИГ; П-1 – прогиномір 6ПАО; Д-1 – динамометр

Навантаження дослідної арки здійснювалось ступенями, величина яких складала 5...10% від руйнівного (5...10 кН). Після кожного ступеня навантаження здійснювалася «витримка» протягом 7...15 хвилин, під час якої знімались та записувались в журнал досліджень покази з усіх вимірювальних приладів, здійснювався візуальний огляд зовнішніх поверхонь, фіксувались процеси утворення, розвитку тріщин, вимірювалася ширина розкриття тріщин.

Результати досліджень. Перші 2 нормальні тріщини утворились у прольоті поясу арки в нижній (розтягнутій) зоні між прикладеними зосередженими силами на 4-му ступені навантаження при $F = 12,5$ кН (див. рис. 2). Глибина розкриття цих тріщин становила 22 мм та 34 мм, відстань між ними – 262 мм, ширина розкриття на ступені навантаження склала $w_k = 0,05$ мм. На наступному ступені навантаження при $F = 15$ кН їх ширина розкриття становила $w_k = 0,1$ мм. Тріщини розвивались до 7-го ступеня навантаження ($F = 20$ кН) на якому їх загальна глибина розкриття склала 65 мм і 54 мм, в подальшому їх розвиток зупинився. На 5-му ступені навантаження при $F = 15$ кН утворились 2 нові нормальні тріщини під прикладеними до поясу зосередженими силами. Глибина розкриття цих тріщин становила 59 мм та 86 мм, відстань до тріщин що утворились на 4-му ступені склала 120 мм і 126 мм, ширина розкриття на ступені навантаження $F = 15$ кН склала $w_k = 0,05$ мм.

На наступних ступенях навантаження при $F = 17,5...30$ кН утворення нових тріщин не зафіксували, а існуючі 3 з 4-х тріщин – розвивалися, їх максимальна ширина розкриття становила $w_k = 0,2$ мм. На 10-му та 11-му ступенях при навантаженні відповідно $F = 35$ кН та $F = 40$ кН зафіксували утворення по одній нормальній тріщині за межами прикладених зосереджених сил в напрямку опор. Глибина розкриття цих тріщин становила 35 мм та 52 мм,

відстань до тріщин що утворились на 5-му ступені складала 120 мм і 150 мм. На подальших ступенях навантаження дані 2-і тріщини не розвивались. Максимальне значення ширини розкриття існуючих тріщин в поясі арки при $F = 40$ кН складала $w_k = 0,25$ мм.

На наступних ступенях навантаження до руйнування утворення нових тріщин не зафіксували, а одна існуюча наскрізна тріщина (магістральна, критична) під зосередженою силою розвивалась на висоту перерізу поясу (рис. 3.5). На 15-му ступені навантаження при $F = 60$ кН глибина розкриття магістральної тріщини складала 120 мм, а ширина розкриття $w_k = 0,3$ мм, що дорівнює гранично-допустимому значенню $w_{max} = 0,3$ мм. При $F = 70$ кН і $F = 80$ кН ширина розкриття магістральної тріщини становила відповідно $w_k = 0,4$ мм і $w_k = 0,5$ мм. На ступені навантаження при $F = 90$ кН, коли ширина розкриття тріщини складала $w_k = 0,7$ мм, і до руйнування наскрізна магістральна тріщина змінила свій напрямок (орієнтацію), розвиваючись як похила на всю висоту перерізу поясу арки. Ширина розкриття магістральної тріщини при $F_u = 105$ кН становила $w_k = 2$ мм.

Глибина розкриття нормальних тріщин у поясі арки складала в середньому 64 мм, за виключенням магістральної – 53 мм. Графіки зміни ширини розкриття тріщин та кількості тріщин у поясі арки залежно від навантаження наведені на рис. 3



Рис. 2. Характер утворення та розвитку тріщин у поясі арки

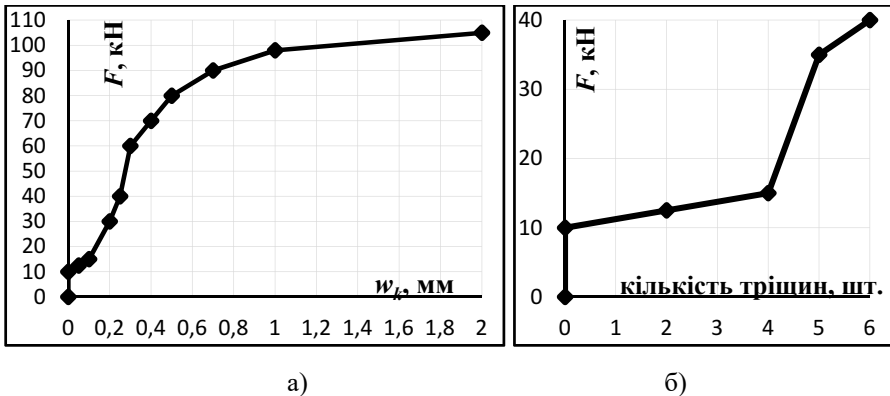


Рис. 3. Залежність від навантаження в арці: а) ширини розкриття тріщин, б) кількості тріщин



Рис. 4. Характер руйнування арки та магістральна тріщина у її поясі

Висновки та рекомендації. Вперше експериментальним шляхом отримані дані про роботу двошарнірної залізобетонної арки з високоміцного швидкотверднучого бетону, які дали можливість виявити особливості напружено-деформованого стану нормальних перерізів та характер розвитку тріщин при одноразових короткочасних статичних навантаженнях, зокрема встановлено, що арка зруйнувалася по наскрізній магістральній похилій тріщині під зосередженою силою при досягненні деформаціями у стиснутій робочій арматурі та стиснутому бетоні поясу граничних значень.

Руйнування відбулось по наскрізній магістральній нормальній тріщині під зосередженою силою, при досягненні деформаціями у стиснутій робочій арматурі та стиснутому бетоні поясу граничних значень. При руйнівному навантаженні, визначеному за критеріями першої групи граничних станів, ширина розкриття тріщин перевищувала гранично-допустимі значення.

Як показали власні експериментальні дослідження у порівнянні з дослідженнями авторів [3, 4] тріщиностійкість двошарнірних арок з високоміцних бетонів вища ніж двошарнірних арок з важкого бетону звичайної міцності (С20/25). Кількість тріщин, що утворились і розвивались у поясі арок з високоміцного бетону на 50% менша ніж в арках зі звичайного бетону, а момент тріщиноутворення на 25% вищий.

1. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 01.01.2007]. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2006. 36с.

DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. [Chynnyi vid 01.01.2007]. Vyd. ofits. Kyiv: Minbud Ukrainy, 2006. 36s.

2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинний від 01.06.2011]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

DBN V.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. [Chynnyi vid 01.06.2011]. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 71 s.

3. Бабич Є.М. „Моделювання роботи двохшарнірних з/б арок з впливом повторних навантажень в ПК ЛРА” / Є.М.Бабич, Д.Я.Кислюк / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 21 - Рівне : НУВГП, 2011. 23с.

Babych Ye.M. „Modeliuvannia roboty dvokhsharnirnykh z/b arok z vplyvom povtornykh navantazhen v PK LIRA” / Ye.M.Babych, D.Ia.Kysliuk /. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 21 - Rivne : NUVHP, 2011. 23s.

4. Бабич Є.М. „Вплив попереднього напруження зтяжки на напружено-деформаційний стан залізобетонної двохшарнірної арки” / Є.М.Бабич, Д.Я.Кислюк, С.Я.Дробишинець / Вісник Національного університету «Львівська політехніка» №662. Теорія та практика будівництва. 2009. 368 с.

Babych Ye.M. „Vplyv poperednoho napruzhenia zatiazky na napruzhenodeformatsiinyi stan zalizobetonnoi dvokhsharnirnoi arky” / Ye.M.Babych, D.Ia.Kysliuk, S.Ia.Drobyshynets / Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika» №662. Teoriia ta praktyka budivnytstva. 2009. 368 s.

5. Бабич Є.М „Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при короткочасному повторному навантаженні” / Є.М.Бабич, Д.Я.Кислюк / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 16 - Рівне : НУВГП, 2008. 18с.

Babych Ye.M „Doslidzhennia roboty dvokhsharnirnykh zalizobetonnykh arok pry kortokochasnomu povtornomu navantazhenni” / Ye.M.Babych, D.Ia.Kysliuk / Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 16 - Rivne : NUVHP, 2008. 18s.