

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.534-544

УДК 624.04

д.т.н., професор **Сур'янінов М.Г.**,
sng@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221,к.т.н., доцент **Неутов С.П.**,
neutov.stepan@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0132-124X,к.т.н., доцент **Чучмай О.М.**,
chuchmay@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5856-623X,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕТОННИХ ТА ФІБРОБЕТОННИХ АРОК

Викладено результати експериментального та чисельного дослідження несучої здатності двошарнірних та безшарнірних кругових бетонних та фібробетонних арок. Арки виготовлені з бетону C16/20; одна арка кожного типу - з неармованого бетону, а друга - з додаванням до суміші 1% сталеві анкерної фібри.

При випробуваннях двошарнірних арок було досягнуто руйнівне навантаження 600 кН, тобто несуча здатність арки, визначена експериментально, склала 0,845 від величини, отриманої шляхом чисельного аналізу, хоча, як правило, у проведених нами експериментальних дослідженнях інших конструкцій теоретичне значення несучої здатності виявлялося нижчим від фактичного. У цьому руйнація сталася у опорної частини, тобто. у місці з'єднання опори (п'яти) та арки, що пояснюється відсутністю армування п'яти. Результати експериментальних та чисельних досліджень бетонної арки свідчать про те, що при даній схемі навантаження у всіх поперечних перерізах арки виникають практично рівні напруження. Очевидно, що несучу здатність конструкції можна підвищити за рахунок рівномірного дисперсного армування арки і посилення п'яти стрижневою арматурою, що і визначає напрямок наших подальших досліджень.

Результати експериментальних та чисельних досліджень безшарнірних арок добре узгоджуються між собою та з результатами теоретичних розрахунків. Порівняння нормальних напружень в експерименті, визначених у точках розташування тензодатчиків, з їх теоретичними значеннями дає максимальну розбіжність у 9,6 % для бетонної арки та 9,2 % для фібробетонної. Звісно ж, що несучу здатність конструкції можна підвищити за рахунок більш рівномірного дисперсного армування арки.

Ключові слова: арка; бетон; фібробетон; експеримент; стенд; метод скінченних елементів; ANSYS; ЛІРА-САПР.

Вступ. Арка є одним із найдавніших конструктивних елементів. Область застосування арок надзвичайно широка — павільйони, криті ринки, ангари, спортивні зали, водопропускні труби, тунелі, мости, бані, підземні аркові конструкції тощо. За витратою матеріалу арки виявляються значно вигіднішими, ніж балкові та рамні системи. Крім того, арки прості у виготовленні та монтажі.

В наш час арочні конструкції найчастіше виготовляють із залізобетону. Залізобетонні арки знаходять широке застосування як кроквяних конструкцій, перемичок, в конструкціях мостів, покриттів промислових будівель. Відмінною особливістю арок є те, що при правильно обраному контурі згинальні моменти, що виникають в них, малі, що відповідає специфіці бетону — матеріалу, погано працює на розтяг. Розрахунок залізобетонних арок, як правило, ведеться виключно в пружній постановці. Однак такий підхід не враховує реальних фізичних закономірностей, структурно-технологічні фактори, нелінійність, непружний характер деформування бетону, появу та розвиток тріщин, спільну роботу бетону та арматури та безліч інших факторів.

Удосконалення теорії опору бетонних і залізобетонних конструкцій, у тому числі арочних, на основі розробки нових підходів при проведенні теоретичних, комп'ютерних та експериментальних досліджень, як і раніше, залишається актуальним завданням.

Аналіз попередніх досліджень. Підвищення несучої здатності і тріщиностійкості арок представляється можливим шляхом використання нових матеріалів, зокрема, фібробетону, і побудови більш точних моделей роботи матеріалу і конструкції в цілому, що забезпечується можливостями сучасного програмного забезпечення та експериментального моделювання [1-4]. Багато досліджень, у яких представлені результати чисельного та експериментального моделювання арок, проводиться у закордонних країнах, але найчастіше розглядається проблема стійкості [5-8].

Особливу цікавість викликають роботи, пов'язані з використанням нових матеріалів. Для підвищення міцності, жорсткості та пластичності залізобетонних арок у роботі [9] застосовувалися полімери, армовані вуглецевим волокном. Посилення виконувалося шляхом склеювання та обгортання. У роботі [10] експериментально досліджуються три залізобетонні арки. Одна використовується як контрольна, а дві інші посилені скріпленими зовні смугами полімерних волокон за різними схемами. Автори статті [11] досліджували велику серію бетонних та фібробетонних арок, поведінка яких оцінювалася різними механічними властивостями, включаючи характер руйнування, співвідношення навантаження та прогину, аналіз деформації та аналітичне дослідження. Розроблено скінченно-елементну модель, яка враховує

фізичну та геометричну нелінійність. Експериментальне дослідження поведінки залізобетонних арок, посилених шарами полімеру, армованого скловолокном, проведено у [12]. Змінними тут були коефіцієнт армування сталевую арматурою, кількість шарів склопластику та їх розташування.

Мета. Метою даної роботи є чисельне та експериментальне дослідження несучої здатності двохшарнірних та безшарнірних кругових бетонних та фібробетонних арок.

Матеріали та методи дослідження. Арки виготовлені з бетону C16/20; одна арка з неармованого бетону, а друга з додаванням в суміш 1% сталеві анкерної фібри. Одночасно з цих замісів виготовлені зразки-куби з розміром ребра 10 см, які випробовувані на стиск згідно [13]. Для комп'ютерного моделювання та чисельного аналізу методом скінченних елементів використані програми ANSYS [14] та ЛІРА-САПР [15].

Результати та обговорення. Виготовлений нами стенд [16] (рис. 1) дозволяє прикласти до арки гідростатичне навантаження, що діє по всьому прольоту.

Арка, що випробовується, встановлюється на верхній опорній балці навантаження, яка спирається на чотири опорні стійки (рис. 1). На бокових поверхнях арки наклеєні тензодатчики, закріплені індикатори та прогібоміри, за допомогою яких у процесі навантаження відстежуються деформації найбільш навантажених (небезпечних) волокон матеріалу арки (рис. 2).

Арка, окреслена за дугою кола. Стріла підйому арки — $f = 100$ см, проліт — $\ell = 200$ см. Поперечний переріз — прямокутний, висотою 6 см, шириною 12 см. Матеріал арки — неармований бетон класу C16/20.

На верхній зовнішній поверхні арки укладена тонка металева смуга, до якої через кожні 12 см за допомогою шурупів прикріплені передавальні стриженьки. На смугі розташований гнучкий пластинчастий стрижень, який охоплює арку на верхньому поясі. Смуга, в силу своєї малої жорсткості, приймає контур верхнього пояса арки і дозволяє пластинчастому стрижню вільно ковзати по поверхні. Пластинчастий стрижень набраний із металевих пластин перерізом 50×5 мм та довжиною 270 мм. Через кожні 24 см чотири пари пластин з одного боку та чотири з іншого з'єднані по чергово між собою міцними болтами $\varnothing 16$ мм. Загальна довжина гнучкого стрижня — 5 метрів. Міцність на розрив — 222 кН. Наявність болтових з'єднань (шарнірів) дозволяє гнучкому пластинчастому стрижню приймати контур верхнього поясу арки. До пластинчастого стрижня кріпиться друга (нижня) балка навантаження.

У процесі навантаження фіксується навантаження, що прикладається пластинчастому стрижню, а, отже, і арці, а також відповідні деформації, що виникають у бетоні. Навантаження прикладається ступенями. Кожна ступінь

закінчується витримкою тривалістю 5-8 хвилин із фіксацією всіх необхідних параметрів. Деформації вимірювалися за допомогою тензодатчиків та індикаторів вартового типу з ціною розподілу 0,001 мм, базою 250 мм. База тензодатчиків — 50 мм.



Рис. 1. Експериментальний стенд

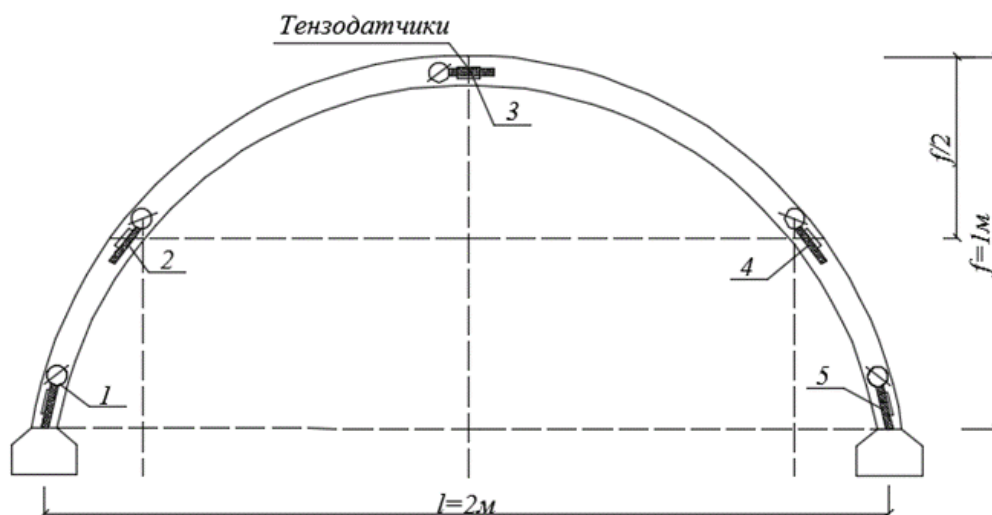


Рис. 2. Схема розташування тензодатчиків

Перший та п'ятий тензодатчики (рис. 2) розташовані біля опор. Третій — посередині прольоту на рівні «замку», а другий та четвертий — симетрично на половині стріли підйому.

У процесі навантаження нижня балка з допомогою домкрата зміщується щодо верхньої балки, яку спирається арка. Зсув нижньої балки призводить до того, що гнучкий пластинчастий стрижень, що охоплює арку, натягується і на арку передається рівномірно розподілене навантаження (гідростатичний тиск) по всій поверхні. Зусилля, що прикладається до балок, а значить і пластинчастого стрижня, контролюється за допомогою зразкового динамометра.

Характер деформацій бетону, отриманий у процесі навантаження двошарнірної арки на початковому етапі експерименту, показує, що вимірювальні прилади працюють синхронно і показують практично лінійну залежність протягом усього процесу навантаження. Останнє свідчить про те, що при даній схемі навантаження у всіх поперечних перерізах арки виникають практично рівні напруження. Процес навантаження закінчується тоді, коли арка втрачає здатність чинити опір навантаженню чи руйнується. Величина навантаження, що відповідає цьому моменту, приймається за несучу здатність арки.

У досліджуваної бетонної арці руйнація сталася опорної частини, тобто. у місці з'єднання опори (п'яти) та арки, при навантаженні 600 кН.

При моделюванні арки в ПК ЛІРА-САПР були прийняті фізико-механічні характеристики, визначені експериментально при випробуваннях кубикових зразків бетону:

$$E = 32000 \text{ МПа}; \quad \mu = 0,2; \quad R_{cube} = 31 \text{ МПа}.$$

Обчислення проводилися при величинах навантаження, що відповідають ступеням навантаження в експериментальних дослідженнях. Оскільки при навантаженні 600 кН, що відповідає втраті несучої здатності арки в експерименті, величина G_x , визначена в ПК ЛІРА-САПР і відповідна кубикової міцності, була меншою $R_{cube} = 31 \text{ МПа}$, навантаження було збільшене і доведене до 710 кН. При цьому величина G_x досягла значення 31418 МПа (табл. 1), що дозволяє вважати теоретичне значення несучої здатності арки рівним 710 кН (рис. 6.5).

Характеристики матеріалів безшарнірних арок: бетон: початковий модуль пружності — $E = 2,5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коефіцієнт Пуассона — $\mu = 0,2$; фібробетон: початковий модуль пружності — $E = 3,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коефіцієнт Пуассона — $\mu = 0,21$.

Під час випробувань обидві арки було доведено до руйнування. Руйнівне навантаження для бетонної арки склало 710 кН, для фібробетонної — 800 кН. Обробка показань вимірювальних приладів дозволила визначити відповідні цим навантаженням нормальні напруження (табл. 1). У цій же таблиці наведено теоретичні значення напружень, обчислені при навантаженнях на арки в моменти їх руйнування.

Таблиця 1

Результати розрахунку двошарнірної арки у ПК ЛІРА-САПР

№ елем.	N (кН)	M_y (кН*см)	Q_z (кН)	$G_x N$, МПа	$G_x M$, МПа	G_x , МПа
1	226,209	0,000	0,066	31,418	0,000	31,418
2	226,209	1,080	0,085	31,418	0,050	31,418
3	226,209	2,468	0,057	31,418	0,114	31,532
4	226,209	3,401	0,065	31,418	0,157	31,575
5	226,209	4,464	0,053	31,418	0,207	31,625
6	226,209	5,320	0,055	31,418	0,246	31,664
7	226,209	6,209	0,040	31,418	0,287	31,705
8	226,209	6,856	0,039	31,418	0,317	31,735
9	226,209	7,485	0,019	31,418	0,347	31,764
10	226,209	7,789	0,011	31,418	0,361	31,778
11	226,209	7,975	0,000	31,418	0,369	31,787
12	226,209	7,975	- 0,011	31,418	0,369	31,787
13	226,209	7,789	- 0,019	31,418	0,361	31,778
14	226,209	7,485	- 0,039	31,418	0,347	31,764
15	226,209	6,856	- 0,040	31,418	0,317	31,735
16	226,209	6,209	- 0,055	31,418	0,287	31,705
17	226,209	5,320	- 0,053	31,418	0,246	31,664
18	226,209	4,464	- 0,065	31,418	0,207	31,625

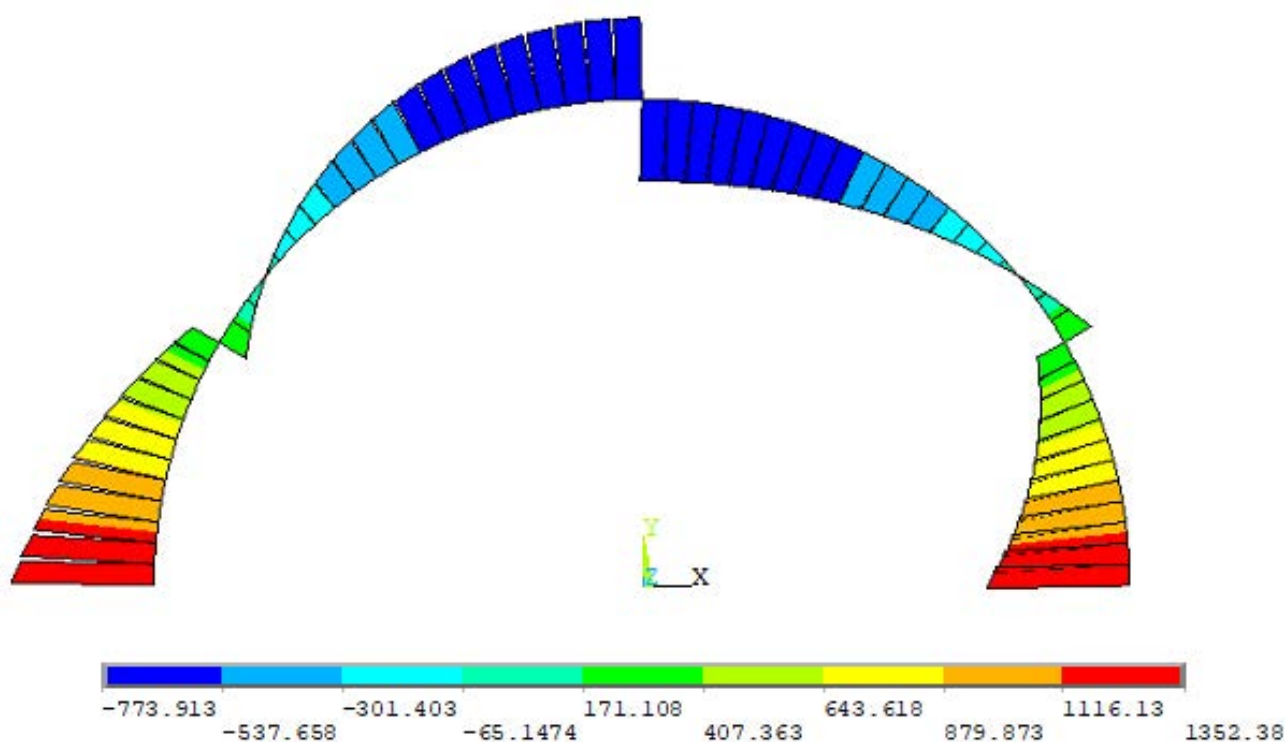
Обчислення в пакеті ANSYS також проводилися при величинах навантажень, що відповідають руйнівним навантаженням в експериментальних дослідженнях. Визначені внаслідок цих обчислень нормальні напруження наведені в табл. 2, а на рис. 3 показана епюра згинальних моментів у бетонній арці, причому, максимальний момент у затисканні дорівнює 1,352 кНм, що добре узгоджується з теоретичним та експериментальним значеннями цього моменту. Слід зазначити, що результати скінченно-елементного аналізу суттєво залежать від способу побудови скінченно-елементної сітки. Наведені результати отримані при розбитті осі арки на 80 скінченних елементів однакової довжини; якщо проліт арки розбитий на 80 однакових частин, довжини скінченних елементів будуть різними, а максимальний момент у затисканні бетонної арки виявиться рівним 3,986 кНм. Цей факт підтверджується проведеними нами додатково скінченно-елементними розрахунками ще у двох програмах — ПК ЛІРА-САПР та SOFiSTiK.

При випробуваннях бетонної арки було досягнуто руйнівне навантаження 710 кН, а при випробуваннях фібробетонної арки — 810 кН, тобто несуча здатність арки з фібробетону, визначена експериментально, виявилася в 1,13 рази вищою.

Таблиця 2

Порівняння результатів для бетонної безшарнірної арки

№№ точок	$\sigma_{теор}$, МПа	$\sigma_{числ}$, МПа	$\sigma_{експ}$, МПа	Розбіжність $\sigma_{теор}$ і $\sigma_{експ}$, %
1	31,339	31,854	33,441	6,3
2	-3,565	-3,624	-3,944	9,6
3	13,113	13,331	14,338	8,5
4	-3,565	-3,624	-3,266	8,4
5	31,339	-31,854	33,844	7,4



Аналогічні результати для фібробетонної арки наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Порівняння результатів для фібробетонної безшарнірної арки

№№ точок	$\sigma_{теор}$, МПа	$\sigma_{числ}$, МПа	$\sigma_{експ}$, МПа	Розбіжність $\sigma_{теор}$ і $\sigma_{експ}$, %
1	35,340	35,920	34,124	3,4
2	-4,020	-4,087	-3,716	7,6
3	14,787	15,033	13,423	9,2
4	-4,020	-4,087	-3,777	6,1
5	35,340	35,920	33,635	4,8

Висновки

При випробуваннях двохшарнірних арок було досягнуто руйнівне навантаження 600 кН, тобто несуча здатність арки, визначена

експериментально, склала 0,845 від величини, отриманої шляхом чисельного аналізу, хоча, як правило, у проведених нами експериментальних дослідженнях інших конструкцій теоретичне значення несучої здатності виявлялося нижчим від фактичного. У цьому руйнація сталася у опорної частини, тобто. у місці з'єднання опори (п'яти) та арки, що пояснюється відсутністю армування п'яти. Результати експериментальних та чисельних досліджень бетонної арки свідчать про те, що при даній схемі навантаження у всіх поперечних перерізах арки виникають практично рівні напруження. Очевидно, що здатність конструкції, що несе, можна підвищити за рахунок рівномірного дисперсного армування арки і посилення п'яти стрижневою арматурою, що і визначає напрямок наших подальших досліджень.

Результати експериментальних та чисельних досліджень безшарнірних арок добре узгоджуються між собою та з результатами теоретичних розрахунків. Порівняння нормальних напружень в експерименті, визначених у точках розташування тензодатчиків, з їх теоретичними значеннями дає максимальну розбіжність у 9,6 % для бетонної арки та 9,2 % для фібробетонної. Звісно ж, що несучу здатність конструкції можна підвищити за рахунок більш рівномірного дисперсного армування арки.

Список літератури

1. А.С. Городецький, М.С. Барабаш, В.М. Сидорів. Комп'ютерне моделювання у завданнях будівельної механіки. К.: Вид-во АСВ. 338 с.
2. Surianinov M., Neutov S, Korneieva I., Sydorchuk M. Analytical, experimental and computer studies of road systems, planes and shells made from steel fiber concrete. International itinerant exhibition research in building engineering EXCO`2020. Valencia, 2020. P. 152-153.
3. P. Balduk, S. Neutov, I.Korneeva. Forced vibrations of arch systems in its plane. Scientific journal "Mechanics and Mathematical Methods". Volume II. No. 1, 2020. Pages 68-80.
4. M. Surianinov, S. Neutov, M. Soroka, D. Kirichenko, O. M. Chuchmai. Bearing Capacity of Hingeless Circular Arches Made of Concrete and Fiber Concrete Under Hydrostatic Pressure. WorldScience 6(78). doi: 10.31435/rsglobal_ws/30122022/7904.
5. Harvey Jr., P.S., Virgin, L.N., 2015. Coexisting equilibria and stability boundaries of a shallow arch: unilateral displacement-control experiments and theory. Int. J. Solids Struct. 54, 1–11.
6. G.M. El-Mahdy. Parametric study of the structural and in-plane buckling analysis of ogee arches. HBRC Journal (2014) 10, 108–116.
7. Jun Yang, Jianting Zhou, Zongshan Wang, Yingxin Zhou and Hong Zhang. Structural Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Thin-Walled Arch Subjected to Asymmetric Load. Hindawi Advances in Civil Engineering Volume 2019, Article ID 9276839, pages 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/9276839>.
8. H. Moradia, A.R. Khaloob, M. Shekarchib, and A. Kazemianb. Effect of utilizing glass

ber-reinforced polymer on exural strengthening of RC arches/Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering 26 (2019) 2299-2309.

9. Zhang, X., Wang, P., Jiang, M., Fan, H., Zhou, J., Li, W., ... Jin, F. (2015). CFRP strengthening reinforced concrete arches: Strengthening methods and experimental studies. Composite Structures, 131, 852–867. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.06.

10. Hamed, E., Chang, Z.-T., & Rabinovitch, O. (2015). Strengthening of Reinforced Concrete Arches with Externally Bonded Composite Materials: Testing and Analysis. Journal of Composites for Construction, 19(1), 04014031. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000495.

11. Yang, J., Zhou, J., Wang, Z., Zhou, Y., & Zhang, H. (2019). Structural Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Thin-Walled Arch Subjected to Asymmetric Load. Advances in Civil Engineering, 2019, 1–12. doi:10.1155/2019/9276839.

12. Moradi, H., Khaloo, A., Shekarchi, M., Kazemian, A. (2019). Effect of utilizing glass fiber-reinforced polymer on flexural strengthening of RC arches. Scientia Iranica, 26(Issue 4: Special Issue Dedicated to Professor Abolhassan Vafai), 2299-2309. doi: 10.24200/sci.2019.21512.

13. ДСТУ Б.В.2.7-214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. К.: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.

14. Лазарєва Д.В., Сорока М.М., Шиляєв О.С. Прийоми роботи з ПК ANSYS при розв'язанні задач механіки. Під редакцією М.Г. Сур'янінова: монографія / Д.В. Лазарєва, М.М. Сорока, О.С. Шиляєв. — Одеса: ОДАБА, 2020. 432 с.

15. Программный комплекс ЛИРА-САПР. Руководство пользователя. Обучающие примеры. Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е., Ромашкина М.А. Под ред. академика РААСН Городецкого А.С. Электронное издание, 2017г., 535с.

16. Патент на корисну модель №147543 Стенд для визначення несучої здатності арочних конструкцій / Неутов С.П., Корнеєва І.Б., Сур'янінов М.Г., Бойко О.В., Головата З.О. 19.05.21. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1594405/>.

Doctor of Science, Professor **Mykola Surianinov**,
PhD **Stepan Neutov**,
PhD **Olexandr Chuchmay**,
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES OF CONCRETE AND FIBER CONCRETE ARCHES

The paper presents the results of experimental and numerical studies of the bearing capacity of two-hinged and hingeless circular concrete and fiber-reinforced concrete arches. The arches are made of C16/20 concrete; one arch of each type is made of unreinforced concrete, and the second one is made with 1% steel anchor fiber added to the mixture. During the tests of two-hinged arches, a destructive load

of 600 kN was achieved, i.e. the bearing capacity of the arch, determined experimentally, was 0.845 of the value obtained by numerical analysis, although, as a rule, in the experimental studies of other structures conducted by us, the theoretical value of the bearing capacity turned out to be lower than the actual one. In this case, the destruction occurred at the supporting part, i.e. at the junction of the support (heel) and the arch, which is explained by the lack of heel reinforcement. The results of experimental and numerical studies of a concrete arch indicate that with this loading scheme, practically equal stresses arise in all cross-sections of the arch. It is obvious that the bearing capacity of the structure can be increased by uniformly dispersed reinforcement of the arch and strengthening the heel with bar reinforcement, which determines the direction of our further research. The results of experimental and numerical studies of hingeless arches are in good agreement with each other and with the results of theoretical calculations. Comparison of the normal stresses in the experiment, determined at the points of the strain gauges, with their theoretical values gives a maximum discrepancy of 9.6% for a concrete arch and 9.2% for a fiber-reinforced concrete. Of course, the bearing capacity of the structure can be increased by more uniformly dispersed reinforcement of the arch.

Keywords: arch, concrete, fiber-reinforced concrete, experiment, stand, finite element method, ANSYS, LIRA-SAPR.

REFERENCES

1. A.S. Gorodetsky, M.S. Barabash, V.M. Sydoriv. Computer modeling in structural mechanic problems. K.: ASV Publishing House. 338 p. {in Ukrainian}.
2. Surianinov M., Neutov S., Korneieva I., Sydorchuk M. Analytical, experimental and computer studies of road systems, planes and shells made from steel fiber concrete. International itinerant exhibition research in building engineering EXCO`2020. Valencia, 2020. P. 152-153. {in English}
3. P. Balduk, S. Neutov, I.Korneeva. Forced vibrations of arch systems in its plane. Scientific journal "Mechanics and Mathematical Methods". Volume II. No. 1, 2020. Pages 68-80. {in English}
4. M. Surianinov, S. Neutov, M. Soroka, D. Kirichenko, O. M. Chuchmai. Bearing Capacity of Hingeless Circular Arches Made of Concrete and Fiber Concrete Under Hydrostatic Pressure. WorldScience 6(78). doi: 10.31435/rsglobal_ws/30122022/7904. {in English}
5. Harvey Jr., P.S., Virgin, L.N., 2015. Coexisting equilibria and stability boundaries of a shallow arch: unilateral displacement-control experiments and theory. Int. J. Solids Struct. 54, 1–11. {in English}
6. G.M. El-Mahdy. Parametric study of the structural and in-plane buckling analysis of ogee arches. HBRC Journal (2014) 10, 108–116. {in English}

7. Jun Yang, Jianting Zhou, Zongshan Wang, Yingxin Zhou and Hong Zhang. Structural Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Thin-Walled Arch Subjected to Asymmetric Load. *Hindawi Advances in Civil Engineering* Volume 2019, Article ID 9276839, pages 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/9276839>. {in English}
8. H. Moradia, A.R. Khaloob, M. Shekarchib, and A. Kazemianb. Effect of utilizing glass fiber-reinforced polymer on flexural strengthening of RC arches/*Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering* 26 (2019) 2299-2309. {in English}
9. Zhang, X., Wang, P., Jiang, M., Fan, H., Zhou, J., Li, W., Jin, F. (2015). CFRP strengthening reinforced concrete arches: Strengthening methods and experimental studies. *Composite Structures*, 131, 852–867. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.06. {in English}
10. Hamed, E., Chang, Z.-T., & Rabinovitch, O. (2015). Strengthening of Reinforced Concrete Arches with Externally Bonded Composite Materials: Testing and Analysis. *Journal of Composites for Construction*, 19(1), 04014031. doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000495. {in English}
11. Yang, J., Zhou, J., Wang, Z., Zhou, Y., & Zhang, H. (2019). Structural Behavior of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concrete Thin-Walled Arch Subjected to Asymmetric Load. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1–12. doi:10.1155/2019/9276839. {in English}
12. Moradi, H., Khaloo, A., Shekarchi, M., Kazemian, A. (2019). Effect of utilizing glass fiber-reinforced polymer on flexural strengthening of RC arches. *Scientia Iranica*, 26(Issue 4: Special Issue Dedicated to Professor Abolhassan Vafai), 2299-2309. doi: 10.24200/sci.2019.21512. {in English}
13. DSTU B.V.2.7-214:2009. *Concretes. Methods for determining strength using control samples*. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine, 2010. 43 p. {in Ukrainian}.
14. Lazareva D.V. *Techniques for working with the ANSYS PC when solving problems of mechanics*. Edited by M.G. Surianinov: monograph / D.V. Lazareva, M.M. Soroka, O.S. Shilyaev. Odesa: ODABA, 2020. 432 p. {in Ukrainian}
15. LIRA-SAPR software complex. User manual. Training examples. Vodopyanov R.Yu., Tytok V.P., Artamonova A.E., Romashkina M.A. Edited by academician of the RAASN Gorodetsky A.S. Electronic edition, 2017, 535p. {in Ukrainian}
16. Patent for utility model No. 147543 Stand for determining the bearing capacity of arched structures / Neutov S.P., Korneeva I.B., Surianinov M.G., Boyko O.V., Golovata Z.O. 05/19/21. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1594405/>. {in Ukrainian}