просторових перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного профілю з одиночним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі. / Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельне виробництво». – К.: НДІБВ, 2016, №60. – С. 47-52.

УДК 624.012.25:539.431

ВИЗНАЧЕННЯ ЗУСИЛЬ В ДВОШАРНІРНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АРКАХ З ВРАХУВАННЯМ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ ПРИ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

DETERMINATION OF EFFORTS IN TWO-HINGED REINFORCED-CONCRETE ARCHS TAKING INTO ACCOUNT REDISTRIBUTION OF EFFORTS AT THE REPEATED LOADINGS

Кислюк Д.Я. к.т.н., доцент (Луцький НТУ, м. Луцьк)

Kyslyuk D.Ya. Ph.D., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, (Lutsk National Technical University, Lutsk)

Наведено методику розрахунку двохшарнірних залізобетонних арок із врахуванням перерозподілу зусиль при повторних навантаженнях. Результати дослідження роботи арок при різних режимах одноразового та малоциклового навантаження.

Concrete arches are widely used in the construction of various buildings. There are fixed arches, two-hinged arches, and three-hinged arches. The horizontal arch thrust is perceived with the tie, but also it can be transmitted on the other constructions such as frames and foundations. Arches which are used in industrial and civil building coverings and also in structures can be subjected to repeated loadings and sometimes to over-loadings which significantly influence on stress-deformation state of the arch sections and ties. There can be the redistribution of efforts between the upper zone arch and tie in two-hinged arches and it affects its hardness and strength. The influence of repeated loadings and possible redistribution of efforts in the arches calculations are not considered as current regulations. And the methodology of arches

calculation with redistribution of efforts between the upper zone arch and tie is not developed yet.

The method of calculation the hinge two reinforced-concrete archs is resulted taking into account the redistribution of efforts at the repeated loadings. The of results of research of work of archs are at the different modes of the permanent and the repeated loadings stress with prestressing of efforts.

Ключові слова: залізобетон, двошарнірна арка, попереднє напруження, напружено-деформований стан, несуча здатність.

Keywords: reinforced concrete, tied arch, preliminary tension bearing ability, cycle of loading, stress-deformation state.

Вступ. Залізобетонні арки широко використовуються в складі поперечних рам виробничих будівель, в різних спеціальних спорудах. Під час експлуатації арки, як і інші будівельні конструкції можуть піддаватися повторним малоцикловим навантаженням, які можуть впливати на зміну механічних характеристик матеріалів, перерозподіл зусиль між елементами арок тощо [1, 2]. В останні тридцять років дослідженням роботи арок увага не приділялася, а як показали експериментальні дослідження двохшарнірних та замкнутих залізобетонних рам, повторні навантаження суттєво впливають на прогини ригелів, ширину розкриття тріщин, внутрішній напружено-деформований стан тощо [2,3].

З огляду на наведене поставлено задачу експериментально встановити особливість роботи двохшарнірних арок при дії на них повторних малоциклових навантажень з регулюванням зусиль і без, та порівняти їх з розрахунковими результатами.

Залізобетонні двошарнірні (статично невизначені) арки розраховують як пружні системи, приймаючи, що бетон і арматура під навантаженням працюють як абсолютно пружні матеріали, а в самих арках у розтягнутих зонах тріщини не утворюються. Розрахунок двошарнірних арок, як правило, виконують методом сил, приймаючи за невідоме зусилля в затяжці або горизонтальну реакцію нерухомої опори – X_1, а за основну систему – криволінійний брус, показаний на рис.1,(*б*). В загальному випадку величина X_1 визначається шляхом розв’язку канонічного рівняння, яке виражає умову рівності нулю горизонтального переміщення рухомої опори:

$$X_1 \cdot \delta_{11} + \Delta_{1F} = 0, \qquad (1)$$

де Δ_{1F} – горизонтальне переміщення правої опори, визване навантаженням *F;*

δ_{11} – горизонтальне переміщення правої опори, зумовлене навантаженням $X_1 = 1$ в основній системі.

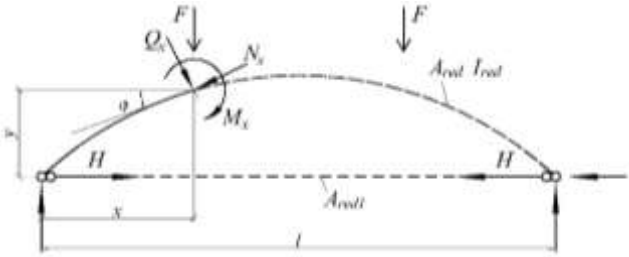

Рис. 1. Розрахункові схема двошарнірної арки

Із канонічного рівняння отримаємо вираз для визначення розпору:

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1F}}{\delta_{11}}. \qquad (2)$$

Розрахунок розпору залізобетонних арок виконується з урахуванням деформацій елементів конструкції та впливу пружного обтискування арки. Для арки з затяжкою визначається коефіцієнт податливості за формулою [1]:

$$k = 1 / \left[1 + \frac{15}{8 f^2} \left(\frac{1}{A_{red}} + \frac{E_c I_{red}}{E_s A_s} \right) \right] < 1. \qquad (3)$$

Тоді розпір залізобетонної двошарнірної арки складає:

$$H = k \cdot X_1. \qquad (4)$$

Подальший розрахунок арки виконується за допомогою звичайних формул методу сил:

$$M = M_F + \overline{M}_1 \cdot H = M_F - y \cdot H,$$

$$Q = Q_F + \overline{Q}_1 \cdot H = Q_F - H \cdot sin\varphi, \qquad (5)$$

$$N = N_F + \overline{N}_1 \cdot H = N_F - H \cdot cos\varphi.$$

Як показують розрахунки, при вертикальному навантаженні вантажне переміщення мало залежить від поперечних і поздовжніх сил і цими силами при визначенні Δ_{1F} можна знехтувати. Спрощення можна ввести і при обчисленні одиничного

переміщення. Зокрема, при $f/l < 1/3$ і найбільшій висоті перерізу арки $h < l/10$ можна знехтувати поперечними силами при обчисленні δ_{11}, а при $f/l < 1/5$ – і поздовжніми силами.

Перерозподіл зусиль в статично невизначених залізобетонних конструкціях враховують на основі методу граничної рівноваги, в якому конструкцію розглядають як складену з окремих жорстких дисків, з'єднаних між собою пластичними шарнірами. Зусилля в арці можна перерозподілити таким чином, щоб отримати найбільший техніко-економічний ефект. З точки зору статичного розрахунку це рівноцінно множенню епюр згинальних моментів від зайвих невідомих на довільний коефіцієнт або додаванню до епюри моментів від зовнішнього навантаження, визначених за пружною роботою арок, додаткових епюр перерозподілу (рис. 2).

За попереднім розрахунком, отримаємо епюру моментів з рівнянь:

$$\Delta H = \frac{M_{s1} - M_{s2}}{y_1 + y_2} \tag{6}$$

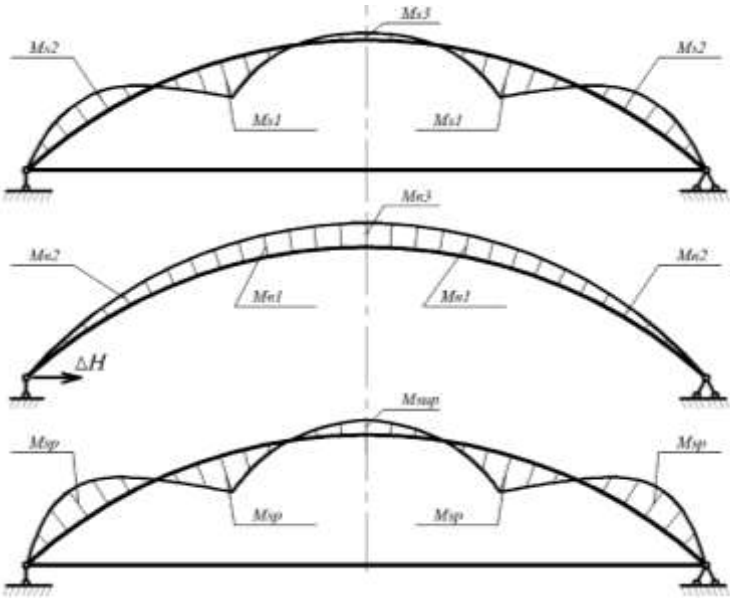

Рис. 2. Перерозподіл згинальних моментів в перерізах двошарнірної арки

Внаслідок перерозподілу зусиль максимальні значення згинальних моментів під зосередженими силами та протилежні

значення моментів виявились однаковими. Це дає змогу більш економічно використати симетричне армування по всьому перерізу, знизити трудомісткість виготовлення конструкцій, покращити якість конструкцій. На основі досліджень в будівельній лабораторії ЛуцькогоНТУ дійсної роботи двохшарнірної залізобетонної арки із затяжкою при дії повторного навантаження було вирішено детальніше дослідити вплив попереднього натягу затяжки на зусилля які виникають в арці. Було випробувано залізобетонні двохшарнірні арки, які мали загальну довжину 2160 мм зі стрілою підйому 40 см та поперечний переріз 100×140 мм [4,5].

Робота арок вивчається в гідравлічному пресі, обладнаному спеціальними траверсами. Арки випробовувалися як вільно оперті з розрахунковим прольотом l=200 см. Навантаження прикладувалося у вигляді зосереджених сил на відстані 40 см від осі симетрії арки через траверсу гідравлічним пресом (рис. 3) [4,5].

Рис.3. Схема випробування арки

Дослідні арки армовані симетрично так, щоб була можливість сприймати знакозмінні згинальні моменти в процесі навантаження, тобто передбачається, що дійсні зусилля в граничному стані будуть відрізнятись від зусиль, визначених розрахунком при пружній роботі залізобетону. При геометричних розмірах дослідних арок, значення розпору $H_{el} = X_1$ визначалося за формулою (3) і становило H_{el} = 1,52F. Значення розпору H_{pl} з урахуванням перерозподілу зусиль між затяжкою та верхнім поясом арки при коефіцієнті податливості затяжки k_{th} = 0,928 становило H_{pl} = 1,41F. Арки 1А-1, 2А-1 піддавались одноразовому навантаженню.

Як видно з рис. 3, при одноразовому монотонному навантаженні арки 1А-1 зусилля в затяжці H_{exp} дещо відрізняється

від теоретичного значення, а середнє значення $k_{exp,m}$ = 0,895. Таким чином, експериментальне значення коефіцієнта податливості затяжки виявилося на 3,6 % менше, ніж теоретичне.

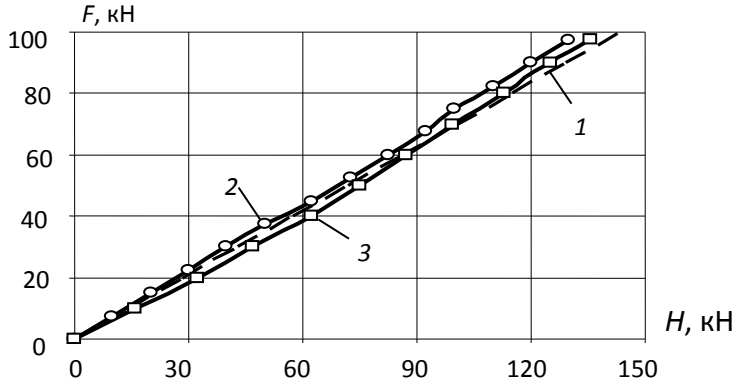

Рис.3. Залежність зусилля в затяжці *H* від зовнішнього навантаження *F*. *1* – теоретичне; *2* – при монотонному навантаженні; 3 – після повторних навантажень

Характер роботи арки 2А-1 при одноразовому навантаженні був подібний до роботи арки 1А-1. $k_{exp,m}$ = 0,870. Таким чином, Після перевищення експлуатаційного рівня навантаження спостерігається зростання пластичних деформацій в бетоні, що спричиняє перерозподіл зусиль у верхньому поясі арки та затяжці. При одноразовому монотонному навантаженні коефіцієнт податливості зменшується від теоретичного на 7,9 %, а згинальні

Відомо, що дія малоциклових навантажень у кожному конкретному випадку спричиняє специфічні особливості деформування та руйнування конструкцій. У більшості випадків при малоциклових навантаженнях мають місце перевантаження, тобто повторювальні навантаження можуть перевищувати свої характеристичні, експлуатаційні та граничні розрахункові значення. Особливо це стосується навантажень природного походження, оскільки їхня дія не піддається статистичному узагальненню та важко моделюється за допомогою випадкових функцій. Прогресуюче після деякого числа циклів навантажень деформування блоків спричиняє прогресуючий ріст пластичних деформацій і подальше руйнування. В цьому випадку мікротріщини, що утворились у місцях концентраторів внутрішніх

напружень при завантаженні на першому циклі, не прогресуючи в макротріщини, спричиняють трансформацію початкової умовно жорсткої внутрішньої статичної системи структури матеріалу в більш деформативну. Це створює сприятливі умови для перерозподілу напружень між компонентами бетону з поступовим (у міру утворення мікротріщин у процесі повторення навантажень) послабленням і подальшою ліквідацією концентраторів напружень. Внаслідок цього, зв'язки між компонентами структури покращуються, відбувається ущільнення матеріалу, призупиняється ріст пластичних деформацій, призупинення росту пластичних деформацій (стабілізації) визначають як малоциклову пристосовність. [2,3]

Арки 1А-2, 1А-3 піддавалися короткочасним малоцикловим навантаженням. Повторні навантаження змінили характер зміни деформацій в бетоні і арматурі при навантаженні на одинадцятому циклі. Залишкові деформації в розтягнутій арматурі складають 38 % та стиснутому бетоні – 35 % від максимальних деформацій на десятому циклі навантаження. Стабілізація деформацій бетону і арматури наступає після шостого – сьомого циклів навантаження. До цього моменту відбувається перерозподіл зусиль між бетоном і арматурою, а після шостого циклу арка працює майже пружно. Стабілізуються не лише повні деформацій, а й короткочасні та залишкові.

В арках 1А-2 і 1А-3 попередні повторні навантаження вплинули на характер зміни зусилля в затяжках на циклі навантаження до руйнування. На перших ступенях навантаження експериментальні значення зусиль H_{exp} були більшими, ніж теоретичні H_{th}, але меншими від H_r за умови абсолютно жорсткої затяжки. При $F_{сус}$ = 30,0 і 60,0 кН середні експериментальні значення зусилля в затяжках дорівнювали H_{exp} = 45,5 і 87,5 кН, а коефіцієнт податливості – відповідно k_{exp} = 0,997 і 0,959, а середнє значення більше на 5,4 % від теоретичного значення $k_{exp,m}$ = 0,978. При перевищенні цього рівня при навантаженні до руйнування зусилля в затяжках почало зменшуватися порівняно з теоретичними значеннями і при $F_{сус}$ = 90,0 кН коефіцієнт податливості зменшився до k_{exp}=0,903. Така зміна розпору свідчить про те, що вже на першому циклі відбувся перерозподіл зусиль, на наступних – працювала більш пружно. Збільшення розпору пояснюється

стабілізацією пластичних деформацій та розвитком існуючих тріщин.

Повторні навантаження впливають на напружено-деформований стан арок. Встановлено, що стабілізація напружено-деформованого стану елементів арок відбувається залежно від рівня повторних навантажень на п'ятому – сьомому циклах. Внаслідок таких навантажень збільшується коефіцієнт податливісті затяжки (до 10 %), за рахунок зменшення жорсткості залізобетонного поясу арки. Виникнення та розвиток похилих тріщин та зростання пластичних деформацій в бетоні спричиняють перерозподіл зусиль між верхнім поясом арки та затяжкою. Збільшується приріст розпору *H* та відбувається зменшення згинального моменту *M*.

Отже, методику для перерозподілу згинальних моментів при дії повторних навантажень(рис.2) необхідно використовувати на основі розрахунку за пружною стадією роботи, оскільки коефіцієнт податливості жатяжки наближається до одиниці. Після дії повторних навантажень розпір в затяжці збільшується, це необхідно враховувати при розрахунку міцноті елементів затяжки та податливості затяжки.

Висновки. Внаслідок повторних навантажень збільшується коефіцієнт податливості затяжки, що спричиняє перерозподіл зусиль в верхньому поясі арки.

1. Барашиков А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок / Барашиков А.Я. / Киев: Будівельник, 1977.- 156 с. 2. Бабич Є.М. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень / Бабич Є.М., Крусь Ю.О. /: Монографія. - Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999.- 119 с. 3. Бабич Є.М. Вплив повторних навантажень на роботу замкнутих залізобетонних рам / Бабич Є.М., Філіпчук С.В. / Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр, 2007. – Випуск 7. – С. 167 – 172. 4. Кислюк Д.Я. „Дослідження прогинів двохшарнірних залізобетонних арок з регулюванням зусиль в затяжці при дії повторних навантажень".// Кислюк Д.Я. / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди Збірник наукових праць Випуск 18 - Рівне : НУВГП, 2009р. – С. 215 – 220. 5. Кислюк Д.Я. „Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при повторному навантажені з попереднім напруженням затяжки" / Кислюк Д.Я. /. Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник Випуск №33 – Київ: КНУБА, 2009. – С. 186-194.