

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРОК

Варич А.С. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Розглядаються експериментальні і теоретичні дослідження несучої здатності на моделях залізобетонних арок під дією вертикального навантаження за різних контурних умов та геометричних параметрів.

Выполнен анализ известных экспериментальных данных по исследованию несущей способности вертикального нагруженных железобетонных арок (таблица 1) [1 - 8].

В экспериментах [1] на моделях 1 – 6 с одинаковым пролетом и стрелой подъема изменялись виды нагружения, а именно:

- модель №1 была нагружена двумя сосредоточенными силами, приложенными в замке и четверти пролета;

- модели № 2 и 3 нагружались четырьмя сосредоточенными силами, определенными теоретически по методу предельного равновесия с наименьшим параметром разрушающей нагрузки;

- на четвертой модели арки силы были приложены в восьми точках (они воспроизводили нагрузку от собственного веса пролетного строения) и несимметрично расположенную временную нагрузку, состоящую из 4 сосредоточенных сил;

- пятая и шестая арки были испытаны нагрузкой, состоящей из восьми равноотстоящих сосредоточенных сил (соотношение между силами подбиралось так, чтобы имело место разрушение арки от пластических деформаций сжатия бетона).

Арки изготовлялись из бетона с кубиковой прочностью 20.0 – 25.0 МПа, рабочая арматура выполнялась из стали класса А - 240С и А - 300С диаметром 8 и 12 мм, процент армирования около одного процента.

При испытании первой арки, когда приложенная нагрузка равнялась 86,5 кН в бетоне одновременно появились трещины в трех сечениях: в левой и правой четвертях пролета и в правой пяте, где в последствии образовались пластические шарниры. Перед исчерпанием несущей способности арки трещины появились у левой пяты.

Во второй модели первые волосяные трещины появились в нижней зоне левой четверти под сосредоточенной силой, в нижней зоне правой пяты и в верхней зоне правой четверти при нагрузке 44,2 кН. В этих местах впоследствии возникли пластические шарниры. Около левой пяты в верхней зоне трещины появились непосредственно перед разрушением арки.

Первые трещины в третьей арке возникли в бетоне в левом полупролете и в правой пяте при нагрузке 34,8 кН. Когда нагрузка достигла 48,9 кН трещины появились и в правом полупролете. Около левой пяты трещина возникла перед самым исчерпанием несущей способности арки.

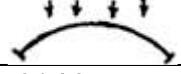
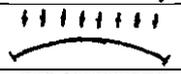
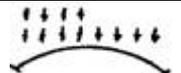
Четвертая арка нагружалась симметричной нагрузкой g , при достижении 49,4 кН начали прилагать несимметричную нагрузку p . При $p = 11,5$ кН в правой пяте появились трещины, при $p = 16,9$ кН – трещины образовались в левой четверти, вскоре трещины возникли и в правой четверти. Около левой пяты трещины появились перед исчерпанием несущей способности арки.

В пятой арке первые трещины возникли в левой четверти при нагрузке на арку 48,9 кН. Когда нагрузка достигла 58,3 кН, трещины появились в правой четверти и в правой пяте. Перед исчерпанием несущей способности трещины также образовались в левой пяте.

Первые трещины в шестой арке появились в верхней зоне левой пяты, когда нагрузка на арку равнялась 48,9 кН, в верхней зоне правой четверти при нагрузке 133,4 кН и в нижней зоне левой четверти при нагрузке 142,8 кН. Перед исчерпанием несущей способности вблизи правой пяты в нижней зоне образовалась трещина. Исчерпание несущей способности пятой и шестой арок сопровождалось интенсивным увеличением прогибов. В сечениях где образовались пластические шарниры, в сжатом бетоне появились горизонтальные трещины.

В работе [2] выполнены экспериментальные исследования серии из пяти пологих синусоидальных железобетонных арок при кратковременном нагружении. Арки изготовлялись из бетона с кубиковой прочностью 40,0 МПа и армировались сварными каркасами, рабочая арматура – два стержня Ø 14 класса А – 300С, поперечная арматура выполнялась из стержней Ø10 класса А – 240С. Арки загружались одной сосредоточенной силой в середине пролета и имели одинаковые геометрические параметры и механические характеристики материалов. Арка с наибольшей нагрузкой потери несущей способности приведена в таблице 1 (модель № 7). В процессе нагружения наблюдались горизонтальные смещения опор, которые замерялись индикаторами часового типа и достигали 2 мм.

Таблица 1

| №№ арок | Схема нагружения | h, см | l, см | f, см | l/h | f / l | Несущая способность, кН | Номер источника |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|-----|-------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 |  | 10 | 240 | 75 | 24 | 1/3 | 133,4 | [1] |
| 2 |  | 8 | 240 | 75 | 30 | 1/3 | 67,7 | [1] |
| 3 |  | 6 | 240 | 75 | 40 | 1/3 | 72,3 | [1] |
| 4 |  | 5 | 240 | 75 | 48 | 1/3 | 22,5/49,4 | [1] |
| 5 |  | 5 / 6,7 | 240 | 44 | 48 | 1/5 | 95,8 | [1] |
| 6 |  | 5 / 6,7 | 240 | 44 | 48 | 1/5 | 152 | [1] |
| 7 |  | 12 | 300 | 30 | 25 | 1/10 | 90 | [2] |
| 8 |  | 4,9 / 8,6 | 236 | 70 | 48 | 1/3 | 80,8 | [3] |
| 9 |  | 5,6 / 7,6 | 232 | 45 | 41 | 1/5 | 122 | [3] |
| 10 |  | 14 | 216 | 40 | 15 | 1/5 | 126 | [4, 5] |
| 11 |  | 25 | 900 | 99 | 36 | 1/9 | 295,5 | [6 – 8] |
| 12 |  | 25 | 900 | 99 | 36 | 1/9 | 295,5 | [6 – 8] |
| 13 |  | 25 | 900 | 99 | 36 | 1/9 | 208,7 | [6 – 8] |

В работе [3] выполнено экспериментальное исследование на моделях 8 и 9. Испытана подъемистая арка (модель 8), по теоретическому расчету разрушающаяся от текучести арматуры (случай больших эксцентриситетов). Армирование постоянное вдоль оси и симметричное: по два стержня $\varnothing 8$ с каждой стороны сечения, хомуты $\varnothing 3$ мм. Кубиковая прочность бетона – 27.0 МПа. Нагрузка, действующая на арку, представляла собой систему четырех сил, которая воспроизводила равномерно распределенную по всему пролету постоянную нагрузку и невыгодно расположенную (загружение полупролета), равномерно распределенную временную нагрузку. Предельная нагрузка 80 кН.

Первые трещины появились при нагрузке 40,5 кН в двух сечениях: в правой пяте и на левом полупролете. Затем раскрылась трещина на правом полупролете (60 кН). Последним появился пластический шарнир в левой пяте. После появления последней трещины первые три настолько развились, что в растянутой арматуре появились напряжения, равные пределу текучести.

Пологая арка (модель №9), по теоретическому расчету разрушающаяся от пластических деформаций сжатого бетона (случай малых эксцентриситетов) для приближения режима нагружения к действительным условиям была испытана двумя группами пропорционально изменяющихся сил. Одна из этих групп, состоящая из восьми сил, имитировала постоянную нагрузку, другая, состоящая из четырех сил, имитировала невыгодно расположенную временную нагрузку. Армирование осуществлялось четырьмя гладкими стержнями $\varnothing 8$ мм из стали класса А – 240С. Хомуты из проволоки $\varnothing 3$ мм ставились через 5 см. Кубиковая прочность бетона – 25.0 МПа.

Первая трещина появилась при нагружении постоянной нагрузкой в правой пяте. Она направлена параллельно кромкам арки. Вторая трещина возникла в левой четверти, она была горизонтальная, расположенная ближе к наиболее напряженной грани и имела загнутые кверху концы. Непосредственно перед разрушением образовались аналогичные трещины еще в двух сечениях: в левой пяте и около правой четверти пролета. Разрушение арки произошло от образования четырех пластических шарниров «по бетону» при величине суммарной разрушающей нагрузки 122 кН.

В эксперименте [4, 5] арка выполнялась из бетона с кубиковой прочностью 33,1 МПа. Продольное армирование модели №10 арматура класса А - 500С диаметром 10 мм, а поперечное армирование - хомуты из стали $\varnothing 4$ Вр - I, которые устраивались по всей длине с шагом 140 мм. Затяжку арки выполняли из стержня $\varnothing 28$ класса А - 400С, на концах которого делали резьбу $\varnothing 24$ мм для анкерования на торцах верхнего пояса. Нагрузка на модель прикладывалась в виде сосредоточенных сил на расстоянии 40 см от оси симметрии арки через траверсу гидравлическим прессом. Разрушение произошло вследствие раздробления бетона на участке приложения нагрузки, которая составила в момент разрушения 126 кН.

Модели №11, 12 представляли собой конструкцию, верхний пояс которой имел двутавровое сечение высотой 25 см и шириной 12,5 см, а модель №13 имела верхний пояс прямоугольного сечения 4 x 25 см, который армировали двумя стержнями $\varnothing 16$ мм (как и модель №13) [6 – 8]. Рабочая арматура в модели №11 принята 8 $\varnothing 8$ мм. Затяжки всех моделей с предварительно напряженной арматурой из высокопрочной проволоки имели сечение 11 x 11 см. В качестве предварительно напряженной арматуры в затяжках использовалась высокопрочная проволока периодического профиля 13 $\varnothing 5$ мм. Рабочая арматура блоков верхнего пояса горячекатаная арматура, класса А - 400С.

Модели арок испытывали на одностороннюю нагрузку с увеличенной нагрузкой у опоры. Блоки верхнего пояса изготовляли при одинаковом проценте армирования. Испытание проводили на стенде в горизонтальном положении. В качестве упора служила массивная железобетонная балка. Нагрузку передавали тремя домкратами через систему металлических распределительных балок, обеспечивающих приложение ее в 11 точках арки. Нагружение велось в два этапа: на первом этапе нагрузку ступенями доводили до нормативной с последующей разгрузкой, на втором - до разрушающей. Разрушающая нагрузка для моделей №11, 12 равна 295,5 кН, для модели №13 - 208,7 кН.

В работе [3] получены формулы, с помощью которых можно произвести выбор рациональной формы арок при различных законах изменения поперечных сечений, пологости, относительной толщины, отношения постоянной и временной нагрузок, отношения прочностных характеристик арматуры и бетона и высоты сжатой зоны бетона.

Несущая способность арок различной геометрии с одинаковым расходом бетона и арматуры, когда арки разрушаются от пластических деформаций растянутой арматуры, а высота сжатой зоны бетона $x \leq 0,55h_0$ показана на рис. 3, 4. Знак коэффициента n характеризует изменение высоты сечения арки: уменьшение высоты сечения к пяте происходит при $n < 0$; увеличение высоты сечения к пятам – $n > 0$ (рис. 1, 2).

Проведенные исследования [3] показали, что несущая способность арок постоянного сечения при прочих равных условиях (расход материалов, загрузка, пологость, относительная толщина, условия опирания) практически равна (разница до 5%), а порой и больше несущей способности арок переменного сечения.

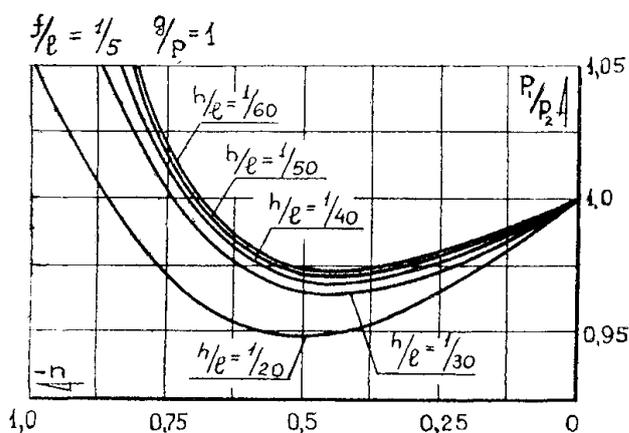


Рис. 1

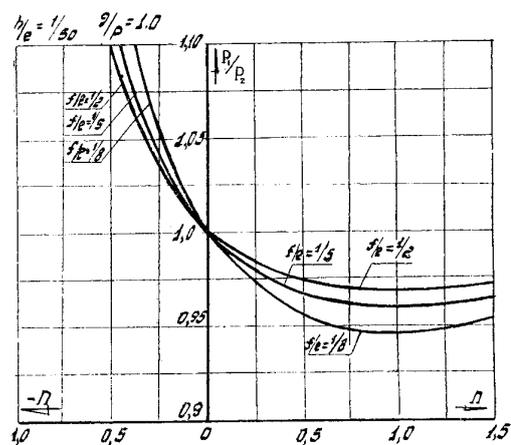


Рис. 2

Выводы

1. Выполнен экспериментально – теоретический анализ несущей способности на моделях железобетонных арок при различных контурных условиях и геометрических параметрах.
2. Для превращения бесшарнирной арки в механизм при несимметричном нагружении достаточно появления четырех пластических шарниров (модели №1 – 4, 8, 9).
3. Последовательность возникновения пластических шарниров происходит поочередно (левая пята, правая четверть, левая четверть, правая пята (модель 6); левая четверть, правая пята, правая четверть, левая пята (модель 2)).
4. Рациональной формой железобетонной арки в большинстве случаев можно считать арку постоянного сечения, так как переменность сечения не оказывает большого влияния на несущую способность (сравнение моделей 3, 4 с 8), но увеличивает трудоемкость работ.

1. Хизанишвили А.Л. Экспериментально-теоретическое исследование несущей способности железобетонных арок с учетом перераспределения усилий вследствие пластических деформаций арматуры и бетона. Автореферат на соискание к.т.н. - Тбилиси, 1967. - 22 с.
 2. Ярцев Б.А. Экспериментальное исследование пологих арок при кратковременном нагружении. /Сб. «Конструкции из клееной древесины и пластмасс» - Л.: ЛИСИ, 1982. - С. 132 - 134
 3. Джапаридзе Г.С. исследование рациональных форм железобетонных арок на основе теории предельного равновесия. Автореферат на соискание к.т.н. - Тбилиси, 1968. - 29 с.
 4. Бабич Є.М., Кислюк Д.Я. Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при короткочасному повторному навантаженні. / Зб. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», вип.16, ч.2 - Рівне, 2008. - С. 40 - 47
 5. Кислюк Д.Я. Методика експериментальних досліджень роботи двохшарнірних залізобетонних арок при повторних навантаженнях. / Зб. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», вип.12 - Рівне, 2005. - С. 169 - 174
 6. Мельников Е.Г. Исследование работы пологих двухшарнирных арок. /Сб. «Длительные деформативные процессы в бетонных и железобетонных конструкциях» - М.: Стройиздат, 1970. - С. 195 - 202
 7. Мельников Е.Г. Исследование перераспределения усилий в двухшарнирных пологих железобетонных арках. Автореферат на соискание к.т.н. - Саратов, 1971. - 22 с.
- Якубовский Б.В., Фролов Е.А., Мельников Е.Г. Некоторые результаты испытания натурной железобетонной арки и ее моделей. / VI конференция по бетону и железобетону. Материалы секций конференции, подготовленные центральным управлением НТО Стройиндустрии. - М.: Стройиздат, 1966. - С. 57-62.