

УДК 624.012.45:624.072.32

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРОК ПРИ НАГРУЖЕНИИ

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

Рассматривается трещинообразование и разрушение железобетонных арок нагруженных вертикальной нагрузкой. Контурные условия закрепления, геометрические параметры и армирование различные.

Экспериментальные исследования на моделях железобетонных арок представлены в работах [1 - 12]. Основные результаты и геометрические характеристики испытанных арок приведены в таблице.

Армирование модели №1 выполняли сварными каркасами. Продольное армирование стержнями 2Ø14 арматуры класса А - 400С, поперечное из стержней Ø10 класса А - 300С. При испытаниях модель загружалась одной сосредоточенной силой в середине пролета. Кратковременное испытание выполнялось при ступенчато возрастающей нагрузке. Загружение производилось до потери несущей способности арки, разрушение произошло при нагрузке $g_p = 90$ кН.

Рабочая арматура моделей №2, 3 и 8 выполнялась из стали марки А - 240С и А - 300С диаметром 8 и 12 мм. Модели №2, 3 были испытаны нагрузкой, состоящей из восьми равноотстоящих сосредоточенных сил, и загружались ступенями по 9,4 кН. Первые трещины (модель №2) появились в левой четверти при нагрузке 48,9 кН. Когда нагрузка достигла 58,3 кН, трещины появились в правой четверти и в правой пяте. Перед исчерпанием несущей способности ($g_p = 95,8$ кН) трещины появились в левой пяте. В модели №3 первые трещины появились в верхней зоне левой пяты, когда нагрузка равнялась 48,9 кН, в верхней зоне правой четверти при нагрузке 133,3 кН и в нижней зоне левой четверти при 142,8 кН. Вблизи правой пяты в нижней зоне трещины появились непосредственно перед исчерпанием несущей способности при разрушающей нагрузке $g_p = 152,1$ кН. Модель №8 была загружена двумя сосредоточенными силами, приложенными в замке и четверти пролета. Приращение нагрузки производилось по 9,4 кН (1/15 от разрушающей нагрузки). 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 образова-

лись пластические шарниры. Перед исчерпанием несущей способности арки (разрушающая нагрузка $g_p = 133,4$ кН) трещины появились у левой пяты.

Для моделей арок №4-7 армирование осуществлялось четырьмя гладкими стержнями диаметром 8 мм из стали класса А-240С с явно выраженной площадкой текучести, хомуты из проволоки диаметром 3 мм ставились через 5 см.

Модели №4, 5 для приближения режима нагружения к действительным условиям, были испытаны двумя домкратами, т. е. двумя группами пропорционально изменяющихся сил. Одна из этих групп, состоящая из 8 сил имитировала постоянную нагрузку; другая, состоящая из четырех сил, имитировала невыгодно расположенную временную нагрузку. Модель №4 сперва загружалась симметричной нагрузкой, ступенями по 9,4 кН (1/8 от разрушающей нагрузки), При достижении симметричной нагрузки 49,4 кН начали прилагать несимметричную нагрузку ступенями по 1,9 кН. При 60,9 кН в правой пяте появились трещины, при 66,3 кН - трещины появились в левой четверти, вскоре возникли трещины и в правой четверти. Около левой пяты трещины появились непосредственно перед исчерпанием несущей способности при суммарной нагрузке $g_p = 71,94$ кН.

Для модели №5 после приложения «постоянной нагрузки» которую довели до 0,75 от расчетной суммарной разрушающей нагрузки, давление передавалось второму домкрату, который загружал полупролет „временной нагрузкой” в четырех точках. При этом в центральном домкрате поддерживалось постоянное давление, которое имело тенденцию падать из-за деформации арки. Первая трещина появилась еще при нагружении постоянной нагрузкой в правой пяте. Она была направлена параллельно кромкам арки. Вторая трещина появилась на той половине арки, где прикладывалась „временная нагрузка”. Трещина была горизонтальная, расположенная ближе к наиболее напряженной грани и имела загнутые кверху концы. Непосредственно перед разрушением появились аналогичные трещины еще в двух сечениях в левой пяте и около правой четверти пролета. К этому времени около первых трещин появились другие параллельные трещины и произошло раздавливание бетона. В сечениях с трещинами образовались пластические шарниры „по бетону” и разрушение модели произошло путем превращения ее в механизм при суммарной разрушающей нагрузке $g_p = 168,8$ кН.

Нагружение модели №6 осуществлялось гидравлическими домкратами, передающими давление на арку в восьми точках. Для имитации одновременного воздействия постоянной и временной нагрузки в пер-

вой арке ось домкрата смещалась по отношению к середине пролета на 10 см. При таком смещении расчетные сечения арки находились в напряженном состоянии, приближающемся к границе между первым и вторым случаями внецентренного сжатия. Первые трещины появились в верхней зоне левой пяты при суммарной нагрузке $g_r = 49$ кН. При нагрузке 134 кН на правой половине модели в верхней зоне четверти пролета, а при нагрузке 143 кН на левой половине около четверти пролета появились трещины. Все эти трещины по мере возрастания нагрузки развивались и при нагрузке $g_p = 161,5$ кН модель превратилась в механизм вследствие наличия четырех пластических шарниров „по бетону“.

Нагрузка, действующая на модель №7, представляла собой систему четырех сил, которая воспроизводила равномерно распределенную по всему пролету постоянную нагрузку и невыгодно расположенную (загружение полупролета) равномерно распределенную временную нагрузку. Первые трещины появились при нагрузке 40,5 кН в двух сечениях: в правой пяте и на левой полуарке. Трещина на правой полуарке раскрылась при 60 кН. Последней появилась трещина в левой пяте. При нагрузке 80,8 кН конструкция прекратила сопротивляться действию внешней нагрузки и разрушилась вследствие образования четырех пластических шарниров.

Модели №9, 10 представляли собой конструкцию, верхний пояс которой имел двутавровое сечение высотой 25 см и шириной 12,5 см, а модель №11 имела верхний пояс прямоугольного сечения 4 x 25 см, который армировали двумя стержнями $\varnothing 16$ мм (как и модель №11). Рабочая арматура в модели №9 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 изготавливали 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 №9, 10 равна 295,5 кН, для модели №11 - 208,7 кН.

Таблица

Номер модели	Геометрические характеристики							Разрушающая нагрузка g_p , кН	g_r/g_p	Номер источника
	пролет l , см	стрела подъема f , см	размеры сечения		f/l	b/h	h/l			
			ширина b , см	высота h ($h_{\text{замка}} / h_{\text{пяты}}$), см						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Бесшарнирные арки										
1	300	30	10	12	0,1	0,83	0,04	90	-	[4]
2	240	44	20	5/6,7	0,183	2,2	0,021	95,8	0,511	[3]
3	240	44	20	5/6,7	0,183	2,2	0,021	152,1	0,322	[3]
4	230	44	20	5	0,191	4	0,022	71,9	0,847	[3]
5	232	45	20	5,6 / 7,6	0,194	3,57	0,024	168,8	-	[1, 2]
6	235	46	20	5 / 6,7	0,196	4	0,021	161,5	0,303	[1]
7	236	70	20	4,9 / 8,6	0,297	4,08	0,021	80,8	0,501	[2]
8	240	75	20	10	0,312	2	0,042	133,4	0,648	[3]
Двухшарнирные арки										
9	900	99	12,5	25	0,11	0,5	0,028	295,5	0,706	[8, 9, 11]
10	900	99	12,52	25	0,11	0,5	0,028	295,5	0,664	[8, 9, 11]
11	900	99	4	25	0,11	0,16	0,028	208,7	-	[8, 9, 11]
12	3600	397	50	100	0,11	0,5	0,028	5969	0,453	[8, 9, 11]
13	200	30	10	10	0,15	1	0,05	-	-	[10]
14	216	40	10	14	0,185	0,71	0,065	126	-	[5, 6]
15	200	40	8	10	0,2	0,8	0,05	-	-	[7]
16	180	90	30	25	0,5	1,2	0,139	350	0,743	[12]
17	180	90	30	25	0,5	1,2	0,139	675	-	[12]

Модель №12 состояла из трех отдельных блоков верхнего пояса, затяжки, выполненной совместно с опорными узлами, и пяти подвесок. Верхний пояс очерчен по кругу радиусом 41,6 м. Блоки, из которых собирался верхний пояс, представляли собой в поперечном сечении двутавр шириной 50 см, высотой 100 см и толщиной стенки 8 см. У блоков имелись поперечные ребра жесткости, которые располагались через 1,5 м по длине блока. Армирование блока симметричное из пяти стержней, диаметром 28 мм с каждой стороны из арматуры класса А - 400С. Затяжка представляла собой предварительно напряженный железобетонный элемент сечением 44 x 44 см, длиной 36 м с опорными узлами. Затяжка армирована высокопрочной проволокой периодического профиля класса Вр - II в количестве 200 штук в поперечном сечении. Размер подвесок 15 x 25 см. Арку испытывали на одностороннее приложение нагрузки и возможные перегрузки от снега (снеговой мешок у опоры). Конструкцию испытывали в горизонтальном положении с упором в две такие же арки, помещенные друг на друга. Для предотвращения потери устойчивости испытываемой арки из плоскости были предусмотрены ограничительные хомуты, состоящие из металлических швеллеров и тяг. Чтобы силы трения не служили помехой при испытании, арка и ограничительные хомуты были установлены на катки. Арку загружали гидравлическими домкратами в 11 точках. Выбранная схема загрузки вызывала максимальные усилия в верхнем поясе арки. Разрушение ее произошло в этом же поясе (пластический шарнир находился в центре приложения односторонних нагрузок на арку) при нагрузке равной 5969 кН.

Продольное армирование модели №13 выполняли четырьмя стержнями Ø8 мм, а затяжку стержнем диаметром 14 мм. Релаксация, а также затухание вынужденных усилий в арках с затяжками исследовались на образцах, установленных на специальных стеллажах. Каждая арка крепилась вертикально таким образом, что одна из опор свободно перемещалась, а другая оставалась шарнирно-неподвижной. Испытание арок длительной нагрузкой, а также вынужденным усилием в сочетании с длительно действующей нагрузкой осуществлялось на специальных установках. Сосредоточенная нагрузка, приложенная в середине пролета арки, создавалась при помощи винта и пружины. Вынужденные усилия создавались при помощи гаек и винтов на затяжках.

Продольное армирование модели №14 арматура класса А - 500С диаметром 10 мм, а поперечное армирование - хомуты из стали Ø4 Вр - I, которые устраивались по всей длине с шагом 140 мм. Затяжку арки выполняли из стержня Ø28 класса А - 400С, на концах которого делали резьбу Ø24 мм для анкеровки 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.

Модель №15 (три серии образцов) армировалась четырьмя стержнями Ø8 мм. В арке первой серии в качестве затяжки использовался стержень Ø12 мм из стали класса А - 240С, для второй серии - стержень диаметром 8 мм и в арке третьей серии - два равнобоких уголка 45 x 45 x 5. Загружение арок производилось в вертикальном положении, на специально разработанном стенде.

Модель №16 с поперечным сечением 30 x 25 см и армированием 4 стержнями Ø 16 мм, с затяжкой диаметром 20 мм испытывалась на прессе одним сосредоточенным грузом, приложенным в замке арки. За разрушающую нагрузку принята та, при которой напряжения в растянутой арматуре арки и в затяжке достигают предела текучести. Модель воспринимала до наступления текучести в одной из арматур (в нижней арматуре замкового сечения или в затяжке) сосредоточенную силу порядка 260 кН. Оба вида арматуры начинали течь при нагрузке порядка 280 кН; потеря несущей способности арматуры наступала при нагрузке приблизительно 350 кН.

Для испытания двухшарнирных полуциркульных арок (модель №17) с избыточными затяжками применялся пресс с одним сосредоточенным грузом поставленным в вершине арки, и двумя сосредоточенными грузами, поставленными симметрично относительно середины арки на расстоянии 0,6 м один от другого. Избыточная затяжка была выполнена в виде гибкого хомута, охватывающего снаружи арку в месте опирания её на опоры. Опоры арки позволяли ей свободно поворачиваться и смещаться в горизонтальном направлении. Разрушение произошло по нормальным сечениям в замке и в сечениях близких к четвертям пролётов арок, другая часть арок разрушилась по косым сечениям. Разрушающая нагрузка составила 675 кН.

Выводы

1. Неосесимметричное нагружение модели №5 при высоком уровне симметричного мало уменьшило разрушающую нагрузку, а такое же нагружение при низком уровне симметричного приводит к разрушению по несимметричной ветке с низкой разрушающей нагрузкой.

2. Выполнен анализ известных натуральных и модельных испытаний железобетонных арок и приведен в виде таблицы.

Література

1. Ахвледиани Н.В., Джапаридзе Г.С., Хизанишвили А.Л. Экспериментальное исследование несущей способности железобетонных бесшарнирных арок, при малых эксцентриситетах продольных сил. /Сб. «Расчет и испытание железобетонных конструкций» - Тбилиси, 1966. - С. 54 - 60
2. Джапаридзе Г.С. исследование рациональных форм железобетонных арок на основе теории предельного равновесия. Автореферат на соискание к.т.н. - Тбилиси, 1968. - 29 с.
3. 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.
4. Ярцев Б.А. Экспериментальное исследование пологих арок при кратковременном нагружении. /Сб. «Конструкции из клееной древесины и пластмасс» - Л.: ЛИСИ, 1982. - С. 132 - 134
5. Бабич Є.М., Кислюк Д.Я. Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при короткочасному повторному навантаженні. / Зб. «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», вип.16, ч.2 - Рівне, 2008. - С. 40 - 47
6. Кислюк Д.Я. Методика експериментальних досліджень роботи двохшарнірних залізобетонних арок при повторних навантаженнях. / Зб. «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», вип.12 - Рівне, 2005. - С. 169 - 174
7. Ерохин М.П. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных арок при длительных воздействиях нагрузки. Автореферат на соискание к.т.н. - Ленинград, 1970. - 24 с.
8. Мельников Е.Г. Исследование работы пологих двухшарнирных арок. /Сб. «Длительные деформативные процессы в бетонных и железобетонных конструкциях» - М.: Стройиздат, 1970. - С. 195 - 202
9. Мельников Е.Г. Исследование перераспределения усилий в двухшарнирных пологих железобетонных арках. Автореферат на соискание к.т.н. - Саратов, 1971. - 22 с.
10. Щелкунов В.Г. Напряженное состояние арочных конструкций с учетом длительных процессов. / Сборник ЦНИИСК «Строительные конструкции», вып. I - К.: Будівельник, 1965. - С. 97 - 109
11. 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 правлением НТО Стройиндустрии. - М.: Стройиздат, 1966. - С. 57-62
12. Овечкин А.М. Расчет статически неопределимых железобетонных арок по методу предельного равновесия. / Сб. «Строительные конструкции» - М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1953. - С. 5 - 96.