

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-1-35-44
УДК 624.019:624.072

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Способ усиления арочных зданий с недостаточной несущей способностью опор для восприятия распора

Д.М. Хусаинов , А.Ф. Салимов , А.Г. Хабибулина  

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация
✉ blago2000@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 16 января 2022 г.

Доработана: 21 февраля 2022 г.

Принята к публикации: 27 февраля 2022 г.

Для цитирования

Хусаинов Д.М., Салимов А.Ф., Хабибулина А.Г. Способ усиления арочных зданий с недостаточной несущей способностью опор для восприятия распора // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 1. С. 35–44. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-35-44>

Аннотация. Предлагается новый способ усиления арочных зданий с недостаточной несущей способностью опор для восприятия распора. Он может быть реализован в условиях архитектурно-конструктивных решений зданий с наличием зон, препятствующих традиционному размещению затяжек. В литературе отсутствуют результаты исследований по этой проблеме. На примере бескаркасного арочного здания с недостаточной несущей способностью опор для восприятия распора рассмотрено применение предлагаемого метода усиления с приведением двух вариантов анкеровки опор арочного здания затяжками, устанавливаемыми для восприятия распора к полузаглубленным и заглубленным якорям-анкерам. Для изучаемого арочного здания проведены теоретические исследования по определению величины преднапряжения в устанавливаемых затяжках, при которой обеспечивается несущая способность арочного здания для варианта несимметричной снеговой расчетной нагрузки. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что впервые представлен способ усиления арочных зданий с недостаточной несущей способностью опор для восприятия распора. Данный способ усиления несущей способности конструкций и опор арочных зданий является эффективным, обладающим новизной и может применяться в условиях архитектурно-конструктивных решений зданий с наличием зон, препятствующих традиционному размещению затяжек.

Ключевые слова: арочное здание, распор, опора, затяжка, анкер, бескаркасное арочное здание, преднапряжение

Хусаинов Дамир Миннигалеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0002-1671-7546, Scopus Author ID: 57197715432, eLIBRARY SPIN-код: 1006-2308; xdmt@mail.ru

Салимов Айдар Фатыхович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0003-0295-576X, Scopus Author ID: 57218826383; salimovaf1962@mail.ru

Хабибулина Альбина Гомеровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры архитектуры, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1; ORCID: 0000-0003-2928-2884, Scopus Author ID: 57224865507, eLIBRARY SPIN-код: 4604-9947; blago2000@mail.ru

© Хусаинов Д.М., Салимов А.Ф., Хабибулина А.Г., 2022




This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

A method for strengthening arched buildings with insufficient bearing capacity of supports for the perception of the strut

Damir M. Khusainov , Aydar F. Salimov , Albina G. Khabibulina  

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

 blago2000@mail.ru

Article history

Received: January 16, 2022

Revised: February 21, 2022

Accepted: February 27, 2022

For citation

Khusainov D.M., Salimov A.F., Khabibulina A.G. A method for strengthening arched buildings with insufficient bearing capacity of supports for the perception of the strut. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(1):35–44. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-35-44>

Abstract. A new way to strengthen arched buildings with insufficient bearing capacity of the supports for the perception of the strut is proposed. That method can be implemented in the conditions of architectural and structural solutions of buildings with the presence of zones which prevent the traditional placement of puffs. There are no research results on this problem in the literature. On the example of a frameless arched building with insufficient bearing capacity of the supports for the perception of the strut, the application of the anticipated reinforcement method is considered with the reduction of two options for anchoring the supports of the arched building with puffs installed for the perception of the strut to semi-buried and sunken ground anchor. For the arched building under consideration, theoretical studies were carried out to determine the prestress value in the installed puffs, at which the load-bearing capacity of the arched building is provided for the variant of the asymmetric snow design load. The significance of the obtained results for the construction industry is that for the first time a method of strengthening arched buildings with insufficient bearing capacity of supports for the perception of the strut is suggested. The projected method of reinforcement is an effective, novel way to increase the load-bearing capacity of structures and supports of arched buildings and can be used in the conditions of architectural and structural solutions of buildings with the presence of zones that prevent the traditional placement of puffs.

Keywords: arched building, strut, support, tightening, anchor, frameless arched building, prestressing

Введение

Одними из широко распространенных конструктивных систем в строительстве являются арочные конструкции. Спектр их применения необычайно широк и включает в себя объемно-планировочные решения как небольших зданий сельскохозяйственных предприятий и малого бизнеса, так и каркасов большепролетных зданиях спортивного или общественного назначения [1–6]. Отличительными особенностями арочных зданий являются возможность быстрого возведения, небольшая масса конструкций, низкая стоимость строительства и необходимость учета при проектировании опор арочных зданий воздействия распорных опорных реакций [7–11]. Проблему восприятия распорных усилий и уменьшения расхода материалов на устройство опор в арочных зданиях решают установкой затяжек между опорами арок [12–19]. Установка затяжек в арочных сооружениях влечет сложности в виде необходимости их скрытой установки в конструкции полов здания, обязательности их преднапряжения при больших размерах пролетов для сохранения рабочего состояния, невозможности традиционной установки затяжек между опорами арок при расположении между ними инженерных коммуникаций, технологических объектов здания.

Damir M. Khusainov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Departments of Metal Construction and Testing of Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1 Zelenaya St, Kazan, 1420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1671-7546, Scopus Author ID: 57197715432, eLIBRARY SPIN-code: 1006-2308; xdmt@mail.ru

Aydar F. Salimov, Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Departments of Metal Construction and Testing of Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1 Zelenaya St, Kazan, 1420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0295-576X, Scopus Author ID: 57218826383; salimovaf1962@mail.ru

Albina G. Khabibulina, Candidate of Economical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture, Kazan State University of Architecture and Engineering, 1 Zelenaya St, Kazan, 1420043, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2928-2884, Scopus Author ID: 57224865507, eLIBRARY SPIN-code: 4604-9947; blago2000@mail.ru

Поэтому при больших пролетах арочные здания часто проектируются без применения затяжек [20–24], что приводит к недостаточной несущей способности их опор из-за погрешностей в процессе проектирования или отклонений от проектных решений, допускаемых из-за ошибок при выполнении и низкого качества строительно-монтажных работ при устройстве фундаментов зданий. Для арочных зданий с недостаточной несущей способностью опор применение затяжек для их усиления – один из наиболее эффективных, но часто трудно конструктивно реализуемых способов усиления. В данной работе рассматриваются способы усиления арочных зданий с нетрадиционными способами установки затяжек с использованием специальных анкерных устройств, позволяющие решить проблемы их установки.

Материалы и методы

В строительных конструкциях зданий арочные конструкции нашли широкое применение в качестве конструкций покрытия, где затяжки, расположенные над помещениями, являются обязательным элементом, воспринимающим распор. При больших пролетах покрытий естественно применение подвесок, соединяющих арки покрытия и затяжки. При этом расположенные выше эксплуатационных зон зданий затяжки с подвесками «не мешают» функционированию зданий. При возведении арочных зданий, в которых арки опираются непосредственно на фундамент и при этом обеспечивается совмещение функций арочного ограждения как стенового ограждения и покрытия, устройство затяжек при больших пролетах представляет собой сложную инженерную задачу, требующую решения при проектировании здания. Такое решение должно учитывать включение в работу затяжек без применения подвесок при больших пролетах арок, обеспечение долговечности затяжек, которые необходимо размещать ниже уровня пола. Одним из способов включения затяжек в работу при большой длине является их преднапряжение, а для обеспечения рабочего состояния затяжек в полах зданий приходится делать технологические каналы между опорами каждой из арок здания для их размещения. Зачастую решение подобных инженерных задач сталкивается с массой ограничений. Например, при необходимости укладки внутри здания технологических объектов, имеющих габариты ниже уровня пола и исключающих размещение затяжек между опорами арок каркаса. Отсутствие затяжек между арками, как правило, всегда приводит к перерасходу материалов на изготовление опор здания. Для некоторых легких арочных зданий, например бескаркасных [25–26], выполненных из профнастила, совмещающего как ограждающие, так и несущие функции, применение затяжек является одним из обязательных условий их применения при достаточно больших пролетах в районах со значительной снеговой нагрузкой. В Казанском государственном архитектурно-строительном университете предложены конструктивные решения (рис. 1–3), представляющие собой арочное здание, включающее арки, опертые на противоположные с каждой стороны опоры в грунте, между которыми выполнены стержневые затяжки и ограждающие конструкции по аркам. При этом затяжки, выполненные в виде стержневых элементов, соединяют каждую опору с полузаглубленными и заглубленными якорями, расположенными внутри здания, а именно вблизи опор с каждой стороны здания.

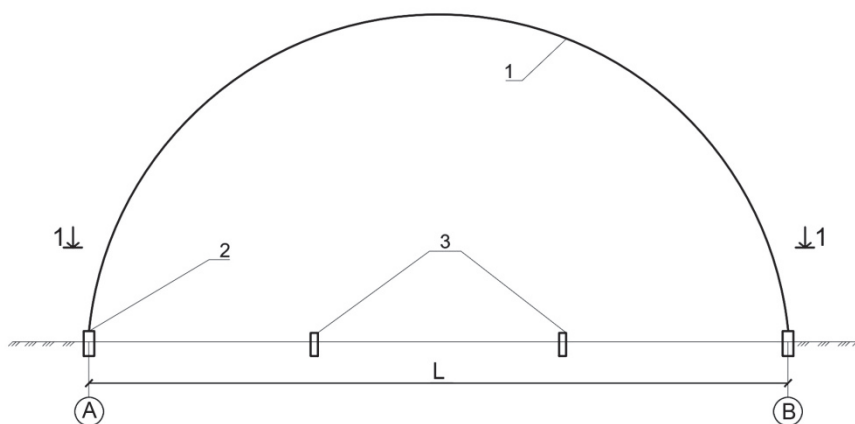


Рис. 1. Поперечный разрез арочного здания (1) пролетом L с опорами (2) и анкерными устройствами (3), полузаглубленными в пол арочного здания

Figure 1. Cross section of an arched building (1) with a span L with supports (2) and anchoring devices (3), half-buried in the floor of an arched building

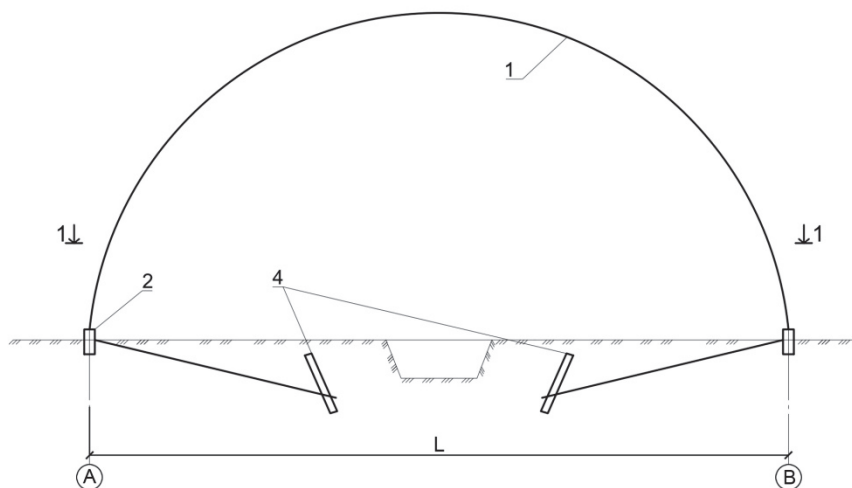


Рис. 2. Поперечный разрез арочного здания (1) пролетом L с опорами (2) и заглубленными анкерными устройствами в виде якорей (4)
Figure 2. Cross section of an arched building (1) with span L with supports (2) and buried anchor devices in the form of anchors (4)

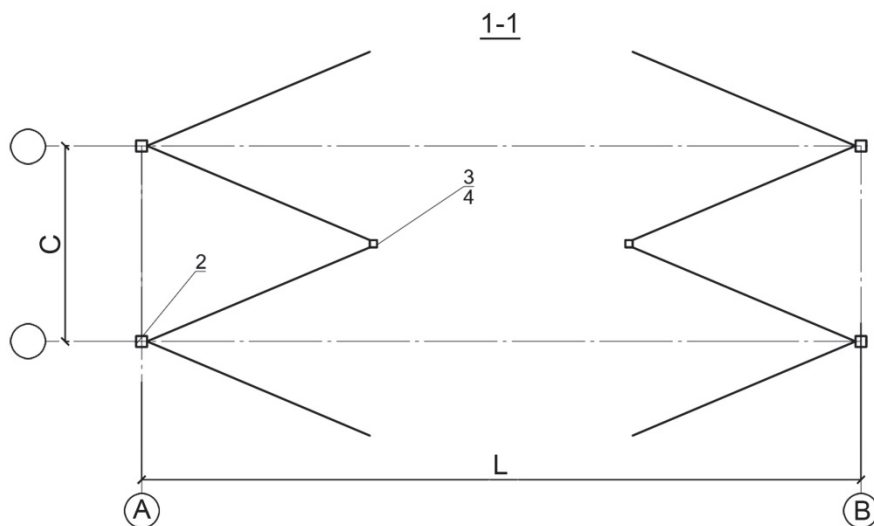


Рис. 3. Расположение анкерных устройств в виде полузаглубленных анкеров (3) или заглубленных анкеров (4) между арками в плане здания и опорами (2)
Figure 3. Location of anchor devices in the form of half-buried anchors (3) or buried anchors (4) between the arches in the plan of the building and the supports (2)

Новизна предложенных конструктивных решений арок с опорами с анкерными затяжками (рис. 1–3) подтверждена патентом РФ¹.

Результаты и обсуждение

Предложенные конструктивные решения устройства опор арок с креплением их к якорям удобно использовать при усилении арочных зданий. Возможность применения предложенных конструктивных решений при усилении арочных зданий рассмотрим на примере арочного здания, построенного в Казани.

Арочный ангар возведен в 2018 г. Это здание длиной 72 м, пролетом 21 м. Ангар рассчитан на расчетную снеговую нагрузку в 240 кг/м^2 , однопролетный, бескаркасный. Материал несущих конструкций покрытия – сталь 08пс (ГОСТ 14918–80). Конструктивные и проектные решения арочного здания приведены на рис. 4–6.

¹ Пат. 2725375 Российская Федерация. Арочное здание / Кузнецов И.Л., Хусаинов Д.М., Гайнетдинов Р.Г. № 2019133640; заявл. 22.10.2019; опубл. 03.09.2020, Бюл. № 25. 7 с.



Рис. 4. Бескаркасный арочный ангар пролетом 21 м (фото Д.М. Хусаинова)
Figure 4. Frameless arched hangar with a span of 21 m in Kazan (photo by D.M. Khusainov)



Рис. 5. Анкерные стойки сечением из квадратной трубы 80×80×5 мм с шагом 1,9 м (фото Д.М. Хусаинова)
Figure 5. Anchoring pillar with a section of a square pipe 80×80×5 mm with a step of 1.9 m (photo by D.M. Khusainov)



Рис. 6. Ленточный ростверк фундамента здания высотой 0,5 м (фото Д.М. Хусаинова)
Figure 6. Capping beam of the building foundation with a height of 0.5 m (photo by D.M. Khusainov)

Выполним проверку несущей способности фундамента арочного здания на действие величины распора, который возникает от действия расчетного сочетания нагрузок, состоящего из снеговой и постоянной нагрузок. Также оценим прочность элементов анкеровки фундамента здания в сваях из квадратной трубы $80 \times 80 \times 5$ мм, установленной с шагом 1,9 м. Момент от распора в элементе по результатам расчетов равен $M = 1,62$ тм

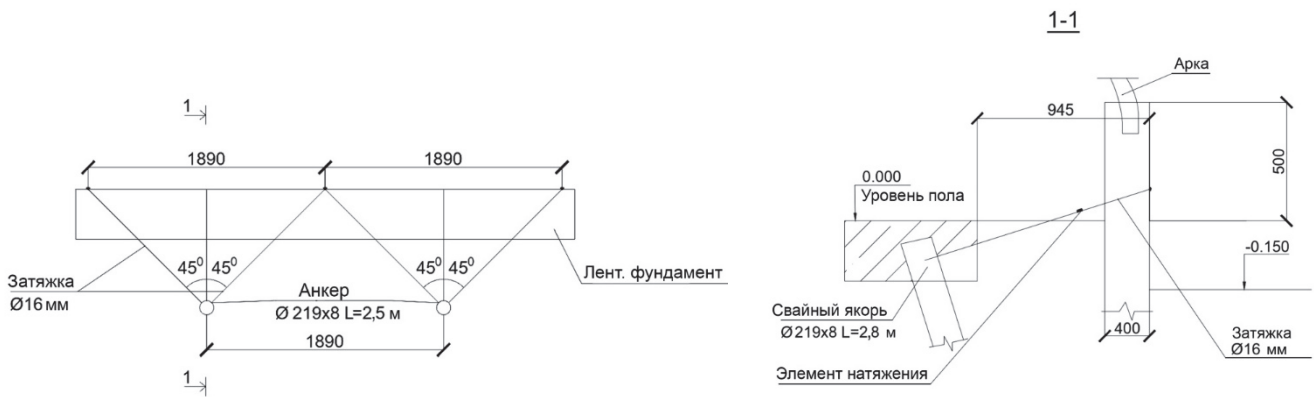


Рис. 7. Вариант 1. Установка затяжек в ленточном фундаменте арочного здания со свайными стальными анкерами

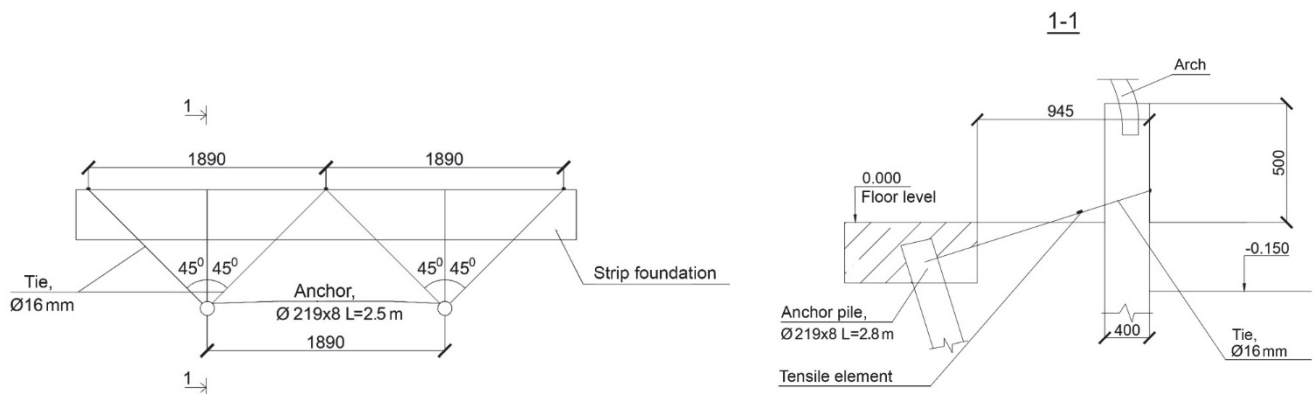


Figure 7. Method 1. Installation of tie-beams in the strip foundation of an arched building with steel pile anchors

Проверку прочности для материала стали класса С245 выполним по формуле

$$M/W_x = 162\,000 / 35,3 = 4589 \text{ кг/см}^2 \geq R_y \gamma_c = 2400 \text{ кг/см}^2, \quad (1)$$

где $W_x = 35,3 \text{ см}^3$ – момент сопротивления квадратной трубы.

Вывод: прочность анкерных элементов фундамента недостаточна для восприятия расчетной величины распора от расчетной нагрузки.

Коэффициент использования сечения анкерных стоек свай ленточного ростверка составляет

$$K_{и} = 4306 / 2400 = 1,79.$$

С целью усиления ленточного ростверка для данного арочного здания разработаны варианты усиления фундаментов с применением затяжек с анкерами: вариант 1 (рис. 7) и вариант 2 (рис. 8).

Анкера затяжек в варианте 1 выполняются из труб сечением $\text{Ø}219 \times 8 \text{ мм}$, которые на 2,5 м забиваются в грунт и располагаются вдоль ленточного фундамента, их шаг определяется анкерующей способностью свайного якоря.

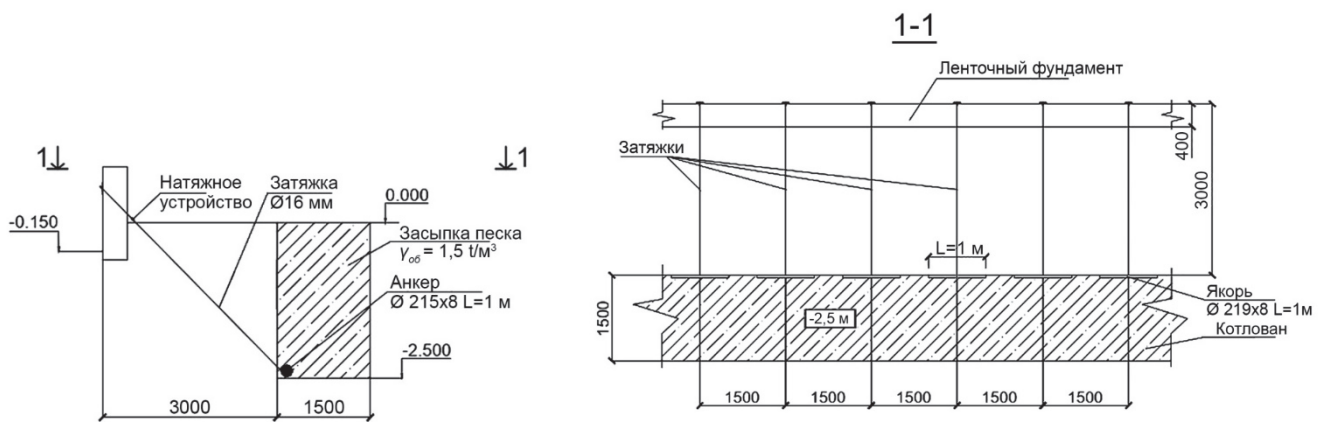


Рис. 8. Вариант 2. Установка затяжек в ленточном фундаменте арочного здания с заглубленными стальными анкерами

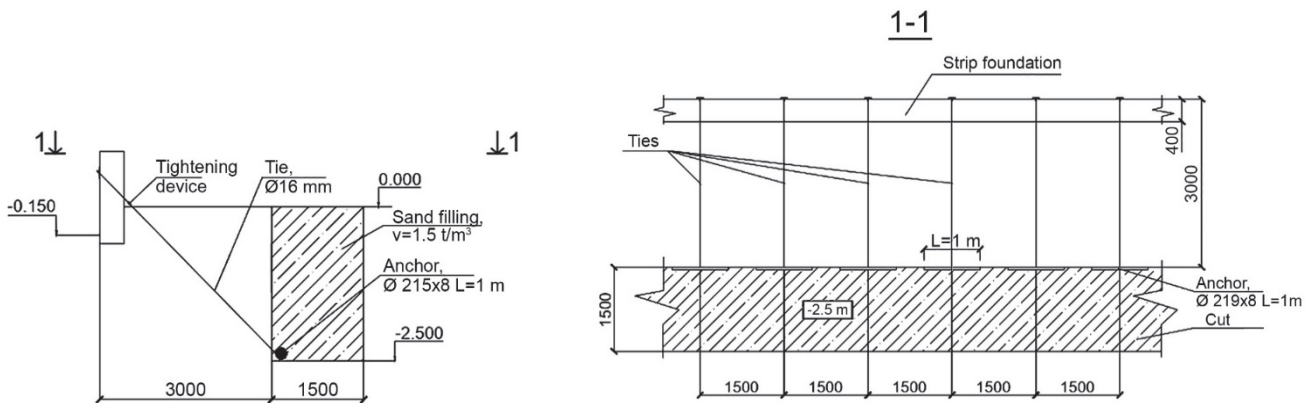


Figure 8. Method 2. Installation of tie-beams in the strip foundation of an arched building with steel pile anchors

Затяжки в варианте 2 анкеровки устанавливаются с шагом 1,5 м с анкеровкой к заглубленным якорям длиной 1 м и сечением из трубы $\text{Ø}219 \times 8 \text{ мм}$. Анкера помещаются в заранее выкопанную траншею шириной 1,5 м, глубиной 2,5 м. Траншея после установки якорей засыпается песком с объемным весом не менее $1,5 \text{ т/м}^3$.

Применение анкерных затяжек в арочных зданиях возможно и в случаях необходимости усиления несущих элементов арочных зданий путем изменения их расчетных схем за счет введения преднапряжения устанавливаемых затяжек.

Рассмотрим возможность усиления арочного бескаркасного здания, не обладающего достаточной несущей способностью. Приведем расчет несущих конструкций арочного здания на проектные нагрузки, включающие в себя снеговую нагрузку величиной 240 кг/м^2 (расчетная снеговая нагрузка для Казани в 2017–2018 гг.).

Геометрические характеристики профиля бескаркасного здания определялись по результатам фактических замеров. Основным элементом арки стал холодногнутый профиль из оцинкованного стального листа толщиной $1,2 \text{ мм}$ и высотой 123 мм . Материал профиля – сталь 08пс (ГОСТ 14918–80), по данным владельца здания.

Несущую способность арочного покрытия из холодногнутого профиля в расчетном сечении для расчетного сочетания нагрузок, включающих в себя постоянную нагрузку и снеговую нагрузку с ее расположением на двух сторонах пролета здания, определим на совместное действие осевой силы и изгибающего момента по формуле

$$N/A + M/W_y = 9800 / 14,31 + 78\,900 / 58,6 = 2031 \text{ кг/см}^2 \leq R_y \gamma_c = 2300 \text{ кг/см}^2, \quad (2)$$

где $A = 14,31 \text{ см}^2$ и $W_y = 586 \text{ см}^3$ – площадь сечения и момент сопротивления нетто полосы арочного покрытия шириной $0,6 \text{ м}$ соответственно; $R_y = 2300 \text{ кг/см}^2$ – расчетное сопротивление по пределу текучести 08пс по ГОСТ 14918–80; N, M – осевая сила и момент в расчетном сечении арочного покрытия.

Вывод: несущая способность арочного покрытия при данном расчетном сочетании нагрузок обеспечивается.

Несущую способность арочного покрытия из холодногнутого профиля в расчетном сечении для расчетного сочетания нагрузок, включающих в себя постоянную нагрузку и снеговую нагрузку с односторонним ее расположением на пролете здания, определим на совместное действие осевой силы и изгибающего момента по формуле

$$N/A + M/W_y = 6500 / 14,31 + 129\,000 / 58,6 = 2655 \text{ кг/см}^2 > R_y \gamma_c = 2300 \text{ кг/см}^2, \quad (3)$$

где $A = 14,31 \text{ см}^2$ и $W_y = 586 \text{ см}^3$ – площадь сечения и момент сопротивления нетто полосы арочного покрытия шириной $0,6 \text{ м}$ соответственно; $R_y = 2300 \text{ кг/см}^2$ – расчетное сопротивление по пределу текучести 08пс по ГОСТ 14918–80; N, M – осевая сила и момент в расчетном сечении арочного покрытия.

Вывод: при расчетном сочетании нагрузок, когда снег располагается только на одной стороне пролета, несущая способность здания не обеспечивается.

При проектировании арочного бескаркасного здания не учтена возможность расположения расчетной снеговой нагрузки только на одной стороне пролета и, соответственно, не выявлена недостаточная несущая способность арочного здания.

Рассмотрим возможность использования затяжек с преднапряжением для усиления арочного покрытия. Предусматривается применение затяжек с анкерровкой к заглубленным якорям (рис. 7–8). Для этого в расчетную схему арочного покрытия вводим затяжки, крепящиеся к якорям, и задаем в них предварительное натяжение.

По результатам проведенных численных исследований для измененной расчетной схемы арочного покрытия с затяжками установлено, что оптимальное распределения расчетных изгибающих моментов достигается при усилении преднапряжения устанавливаемых затяжек арочного покрытия величиной 440 кг .

Несущую способность арочного покрытия из холодногнутого профиля в расчетном сечении (для РСН2) определим на совместное действие осевой силы и изгибающего момента по формуле

$$N/A + M/W_y = 840 / 14,31 + 125\,336 / 58,6 = 2197 \text{ кг/см} < R_y \gamma_c = 2300 \text{ кг/см}^2, \quad (4)$$

где $A = 14,31 \text{ см}^2$ и $W_y = 586 \text{ см}^3$ – площадь сечения и момент сопротивления нетто полосы арочного покрытия шириной $0,6 \text{ м}$ соответственно; $R_y = 2300 \text{ кг/см}^2$ – расчетное сопротивление по пределу текучести 08пс по ГОСТ 14918–80; N, M – осевая сила и момент в расчетном сечении арочного покрытия.

Вывод: при расчетном сочетании нагрузок, когда снег располагается только на одной стороне пролета, несущая способность здания при усилении преднапряжения в затяжке с креплением ее к якорям величиной 440 кг обеспечивается.

Данный пример применения анкерных затяжек с анкерровкой их к якорям для усиления конструкций арочных зданий показывает одну из областей использования предлагаемых затяжек опор арочных зданий с креплением их к анкерам-якорям. Для рассматриваемого реализованного арочного здания, обладающего недостаточной несущей способностью из-за ошибок в проектировании, установка усиливающих затяжек для опор арочного покрытия по схемам, приведенным на рис. 7 и 8, может быть оптимальным вариантом его усиления.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что применение для опор арочных зданий затяжек, крепящихся с одной стороны к опорам, а с другой стороны – к анкерам-якорям, является эффективным, обладающим новизной способом повышения несущей способности покрытий и фундаментов арочных зданий в условиях архитектурно-конструктивных решений зданий с наличием зон, препятствующих традиционному размещению затяжек.

Список литературы / References

1. Sheidaii M.R., Bayrami S., Babaei M. Collapse behavior of single-layer space barrel vaults under non-uniform support settlements. *International Journal of Steel Structures*. 2013;13(4):723–730. <http://doi.org/10.1007/s13296-013-4013-y>
2. Karimi S. Study and comparison arch at framework modern materials-case study: Iran. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2017;9(1S):573–596. <http://doi.org/10.4314/jfas.v9i1s.713>
3. Dallemule M. Equivalent imperfections in arched structures. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2015;23(3):9–15. <http://doi.org/10.1515/sjce-2015-0012>
4. Flager F., Soremekun G., Adya A., Shea K., Haymaker J., Fischer M. Fully constrained design: a general and scalable method for discrete member sizing optimization of steel truss structures. *Computers and Structures*. 2014;140:55–65. <http://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.05.002>
5. Kyoungsoo L., Sang-Eul H. Analysis of the stress-erection process of Strarch frames considering the joint connection properties. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;92:195–210. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.09.011>
6. Sayanov S.F., Salakhutdinov M.A. Development of trusses with belts made of pipes of polyhedral cross-section. *Conference Proceedings: Engineering Personnel are the Future of Russia's Innovative Economy*. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology Publ.; 2015. p. 160–161.
Саянов С.Ф., Салахутдинов М.А. Разработка стропильных ферм с поясами из труб многогранного сечения. Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России: сборник конференции. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. С. 160–161.
7. Nomikos P.P., Sofianos A.I., Sakkas K.M., Choumanidis D., Delendas S. Nonlinear simulation of lattice girder segment tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013;38:180–188. <http://doi.org/10.1016/j.tust.2013.06.006>
8. Kalinina A.A., Kurbanov A.I., Tsaritova N.G. Possibilities of architectural and structural forming of spatial forms from rod arches. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079:(042041). <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/4/042041>
9. Chen J.-H. A study on the equivalent static wind loadings on the arched roof frames of low-rise buildings in atmospheric boundary layers. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;121–126:3113–3117. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.3113>
10. Afshana S., Theofanousb M., Wangc J., Gkantoud M., Gardner L. Testing, numerical simulation and design of prestressed high strength steel arched trusses. *Engineering Structures*. 2019;183:510–522. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.007>
11. Gaydzhurov P.P., Iskhakova E.R., Tsaritova N.G. Study of stress-strain states of a regular hinge-rod constructions with kinematically oriented shape change. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020;16(1):38–47. <http://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-1-38-47>
12. Sun W., Zhou W. Test investigation on stiffness performance of steel structures composed of cold-roller-bent pipes. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;271–272:519–523. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.271-272.519>
13. Pantazia V.S., Sophianopoulos D.S. A unified catastrophe theory approach for the in-plane buckling of steel arches under point gravitational loading. *Special Issue: Proceedings of Eurosteel*. 2017;1(2–3):1399–1406. <http://doi.org/10.1002/cepa.182>
14. Gimena F.N., Gonzaga P., Gimena L. Analytical formulation and solution of arches defined in global coordinates. *Engineering Structures*. 2014;60:189–198. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.12.004>
15. Castellano S. Loads interaction domains methodology for the design of steel greenhouse structures. *Journal of Agricultural Engineering*. 2007;38(1):21–29. <http://doi.org/10.4081/jae.2007.1.21>

16. Eroglu U., Paolone A., Ruta G. Exact closed-form static solutions for parabolic arches with concentrated damage. *Archive of Applied Mechanics*. 2020;90:673–689. <http://doi.org/10.1007/s00419-019-01633-x>
17. Dmitriev I.K. Research of the deformation of the brick-cable arch. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015;(5):72–77.
Дмитриев И.К. Исследование деформации стержне-вантовой арки // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 5. С. 72–77.
18. Dmitriev I.K. Determination of destructive forces in a rod-cable arch. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(3):243–248. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-243-248>
Дмитриев И.К. Определение разрушающих усилий в стержне-вантовой арке // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 3. С. 243–248. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-243-248>
19. Kirsanov M.N. Calculation of the deflection of an arched truss with suspended elements depending on the number of panels. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(3):179–184. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-179-184>
Кирсанов М.Н. Расчет зависимости прогиба арочной фермы с подвесными элементами от числа панелей // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. Т. 16. № 3. С. 179–184. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-179-184>
20. Wells M. Terminal 3 roof design and construction at Shenzhen Bao'an international airport, China. *Civil Engineering*. 2015;168(1):19–24. <http://doi.org/10.1680/cien.14.00044>
21. Rybakov V., Jos V., Raimova I., Kudryavtsev K. Modal analysis of frameless arches made of thin-walled steel profiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;883:(012197). <http://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012197>
22. Liu Q.X., Zhao Y. Study on common problem and the design of granary railway canopy. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;204–208:1034–1039. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.1034>
23. Kamalov A.Z., Khamidullina A.A. To the question of research of the stress strain state and stability arched constructions. *Izvestiya KGASU*. 2012;(4(22)):130–138.
Камалов А.З., Хамидуллина А.А. К вопросу исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости арочных сооружений // *Известия КГАСУ*. 2012. № 4 (22). С. 130–138.
24. Lingyao L., Shichang H., Xuhui H., Haiquan J. Experimental study on wind force coefficient of a truss arch tower with multiple skewbacks. *Advances in Structural Engineering*. 2020;23(12):2614–2625. <http://doi.org/10.1177/1369433220916935>
25. Bezsalıy V.M., Bannikov D.O. Efficiency of thin-walled galvanized profiles for arch elements. *Bridges and Tunnels. Theory Research Practice*. 2019;16:20–29. <http://doi.org/10.15802/bttrp2019/189428>
26. Kuznetsov I.L., Isaev A.V., Gimranov L.R. The causes of collapse of 30 m span frameless arch structure. *Izvestiya KGASU*. 2011;(4(18)):166–170.
Кузнецов И.Л., Исаев А.В., Гимранов Л.Р. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м // *Известия КГАСУ*. 2011. № 4 (18). С. 166–170.