This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

alfabuild

Research Article
Received: December 19, 2025 *Accepted: January 23, 2026* *Published: February 26, 2026*
ISSN 2658-5553

Influence of backfilling of masonry vault grooves on their load-bearing capacity

Zimin, Sergey Sergeevich[1]
Orlovich, Roman Boleslavovich[2]
Dimitrieva, Sofiia Olegovna[1*]
Zimina, Elena Andreevna[3]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia; zimin_sergei@mail.ru (Z.S.S); ps.dimitrieva@gmail.com (D.S.O)
[2] «PI Georekonstrukciya», St. Petersburg, Russia; orlowicz@mail.ru (O.R.B.)
[3] OOO «NPSF «Specstrojservis», St. Petersburg, Russia; paloma200233@gmail.com (Z.E.A)
Correspondence:* email ps.dimitrieva@gmail.com; contact phone +79219505638

Keywords:

Cylindrical vaults; Cross vaults; Filling of vault cavities; Stressed state of vaults; Masonry structures; Vaulted

Abstract:

In static calculations of stone vaults, backfill is usually considered only as a gravitational load, and its actual interaction with the vault structure is often not accounted for. **The object of research** is the stress state of stone vaults. The influence of backfill on the load-bearing capacity of stone vaults is analysed. **Methods**. A numerical analysis was conducted using the finite element method for vaults with a span of 8.0 m and a thickness of 0.25 m. Two backfill materials were considered: sand (E = 120 MPa, density 1500 kg/m³) and expanded clay (E = 15 MPa, density 250 kg/m³). The ratio of vault height to span, f/L, varied from 0.1 to 0.5. Two calculation schemes were compared: one that accounts for the interaction of the vault with the backfill and one that does not. **Results.** Including backfill in the design model reduces tensile stresses in the vault. The positive effect increases with the vault height-to-span ratio and is more pronounced for cylindrical vaults than for cross vaults. Sand backfill provides a more significant reduction in stresses due to its higher stiffness, but it also increases the overall load on the vault. The share of the horizontal spacer load H, perceived by the backfill, reaches 43% for sand and 37% for expanded clay in semicircular vaults (f/L = 0.5). To reduce the static load, it is recommended to use lightweight backfill materials (such as expanded clay), while maintaining a positive interaction with the vault. The effectiveness of lightweight backfill can be improved by using layer-by-layer consolidation with cement mortar or polymer composite reinforcement.

1 Introduction

При проведении восстановительных работ и реконструкции исторических зданий возникает необходимость в выполнении статических расчетов каменных сводчатых конструкций, выборе расчетной модели и метода оценки их несущей способности.

Каменные сводчатые конструкции изучаются многими научными школами, что отражено в обширной библиографии. Обзорный материал о каменных конструкциях представлен в работе [1]. Особое внимание уделяется сложности моделирования кладки из-за ее неоднородности; предлагаются различные стратегии численного анализа — от микроуровня с раздельным рассмотрением блоков и раствора до макроуровня с представлением кладки как однородного композита. Автор отмечает, что низкая прочность на растяжение является ключевой

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

особенностью материала, определяющей поведение конструкций, особенно в условиях сейсмических нагрузок.

Конструктивно-технологические аспекты устройства сводов XIX — начала XX века описаны в работах [2], [3]. Расчет того времени предусматривал подход, в котором своды рассматриваются как элементы, «собранные» из отдельных клиньев, с последующим построением и анализом кривой давления [4], [5]. Уже тогда каменные своды не рассматривались для применения в новых зданиях в связи с переходом к плоским перекрытиям по стальным балкам и железобетонным конструкциям.

В работе [6] приведен анализ наиболее напряженных зон каменных сводов — опорных участков и зон сопряжения с распалубками. Авторы указывают, что в крестовых сводах максимальные сжимающие усилия концентрируются в диагональных ребрах и передаются на опорные консоли под углом около 45°, что делает эти консоли ключевым элементом, определяющим несущую способность свода. В исследовании [7], [8] установлено, что ключевым параметром, влияющим на распределение напряжений, является отношение стрелы подъема свода к его пролету (f/L), причем наиболее опасным является двухосное растяжение равной интенсивности в центральной части свода.

Методы усиления и роль засыпки описаны в работах [9], [10], указаны факторы разрушения каменных сводчатых конструкций и установлен характер образования шарнирной системы при горизонтальной подвижке опоры. Выявлено, что горизонтальная подвижка опор является доминирующим фактором, инициирующим образование трещин по неперевязанным сечениям кладки с последующим формированием четырехшарнирного механизма разрушения [3]. На основе экспериментальных и численных исследований предложены методы усиления сводов, включая внедрение композитных углеволоконных жгутов в тело кладки, что позволяет повысить устойчивость к горизонтальной подвижке опор на 59% [11], [12].

Вопрос взаимодействия засыпки со сводом был затронут еще в трудах Н.К. Лахтина [4], который указывал на положительную роль засыпки, способствующей увеличению веса свода вблизи опорных пят и изменению направления равнодействующей от веса и распора, что повышает устойчивость конструкции. Косвенным подтверждением этого служат случаи повреждений сводов при несимметричном удалении засыпки из пазух в процессе ремонтных работ.

Влияние засыпки на несущую способность сводов рассмотрено в работах [13]–[18]. Исследования [13]–[15] выполнены для мостовых каменных арочных пролетных строений, где анализируется перераспределение сосредоточенных нагрузок от транспортных средств через забутовку пазух. Применительно к сводам зданий в работе [16] приведены результаты экспериментальных исследований цилиндрических моделей (t = 12.5 см, L = 2 м, f = 0.73 м) при нагружении сосредоточенной несимметричной нагрузкой в четверти пролета. Выявлено существенное увеличение разрушающей нагрузки при наличии засыпки: в 5 раз для керамзита, в 8 раз для песка и в 13 раз для щебня. При этом отмечено существенное влияние сил трения между верхней поверхностью свода и материалом засыпки на ее включение в работу. Однако, как справедливо отмечается, такая схема нагружения является нехарактерной для исторических зданий.

В работе [17] экспериментально подтверждено, что засыпка пазух повышает несущую способность свода. Испытания модели (f = 85 мм, L = 380 мм, t = 28 мм) с песчаной засыпкой (удельный вес 16.5 кН/м³, угол трения 43.8°, сцепление 0 кПа, фракция 0.5–1.0 мм) показали прирост прочности на 30% (с 138 Н до 182 Н). В исследовании [18] на более крупных моделях (L = 2.0 м, f = 73 см, t = 12.5 см) установлено, что насыпная плотность, угол внутреннего трения и трение о поверхность свода существенно влияют на прочность: использование гранитного заполнителя (1380 кг/м³) обеспечило несущую способность 76.2 кН, тогда как керамзит (330 кг/м³) — лишь 9.9 кН.

Таким образом, анализ публикаций показывает, что засыпка играет важную роль в напряженно-деформированном состоянии свода. Однако большинство исследований выполнены либо для мостовых арок, либо для моделей малого масштаба с экстремальными схемами нагружения. Количественное влияние физико-механических свойств засыпки (модуля упругости, плотности) на распределение напряжений в цилиндрических и крестовых сводах зданий, работающих под распределенной нагрузкой, в зависимости от геометрического параметра f/L до настоящего времени остается не изученным. Кроме того, в нормативной литературе [19], [20]

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

отсутствуют указания по совместному расчету системы «свод–засыпка», поэтому при статических расчетах засыпка обычно рассматривается лишь как постоянная гравитационная нагрузка.

Целью данной работы является количественная оценка влияния физико-механических свойств и модуля упругости засыпки на напряженное состояние цилиндрических и крестовых каменных сводов в зависимости от геометрического параметра f/L.

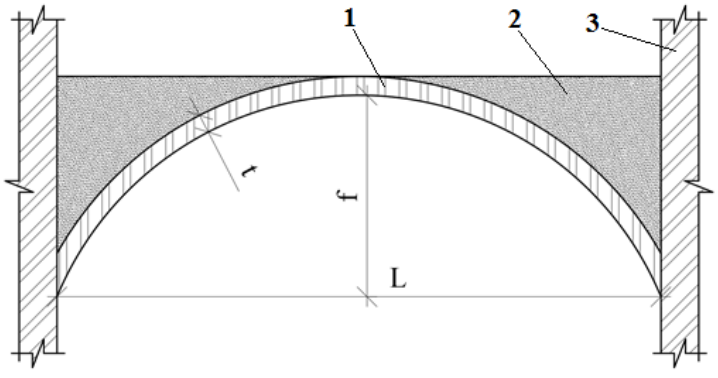
Задачами работы являются:

1. Анализ влияния засыпки пазух на напряжённое состояние цилиндрического свода при варьировании f/L = 0.1…0.5.
2. Сравнительный анализ напряженного состояния крестового свода в наиболее опасных зонах (шелыга распалубок и центральная область) при использовании засыпки из песка и керамзита.
3. Оценка доли горизонтального распора, воспринимаемого засыпкой, в зависимости от материала засыпки и геометрии свода.

2 Materials and Methods

Засыпка пазух каменных сводов выполнялась с целью выравнивания их криволинейной поверхности для устройства полов (рис.1a). При этом высота засыпки может быть как в одном уровне, так и выше шелыги свода. Исключением являются своды чердачных помещений, засыпка пазух которых может выполняться не на полную их глубину. В качестве материала засыпки в исторических зданиях обычно использовались засыпка строительного мусора в виде смеси боя кирпича, песка, остатков раствора и пр. В процессе длительной эксплуатации засыпка может подвергаться деградации, например, из-за ее увлажнения в результате попадания дождевой либо бытовой воды в пазухи сводов. Это также способствует деградации каменной кладки свода, снижая его несущую способность. В связи с этим часто возникает необходимость в замене засыпки на более легкие материалы, например керамзит. При этом одновременно представляется возможным оценить техническое состояние сводов со стороны их хребтовой (верхней) поверхности, например, выявить наличие трещин, а при необходимости выполнить усиление кладки, например, в виде железобетонных арок или оболочек либо путем поверхностного армирования композитными материалами [21]-[22], хотя, зачастую, достаточным является инъектирование трещин [23]. В практике также имеют место случаи замены засыпки кирпичными столбиками, на которые опираются лаги пола (рис.1b). Такое решение нельзя признать удовлетворительным поскольку передаваемые сосредоточенные нагрузки от столбиков из-за несовпадения их вертикальных отметок под лагами могут действовать на свод неравномерно. Иногда в процессе ремонтных работ существующая засыпка заменяется забутовкой в виде каменной кладки, что также не всегда является рациональным (рис.1c).

a)



b) c)

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

1 – каменный цилиндрический свод, 2 – засыпка, 3 – каменные стены
1 – masonry cylindrical vault, 2 – backfill, 3 – masonry walls

Рис. 1 - Поперечный разрез каменного свода с засыпкой (a) и ее замена кирпичными столбиками (b) либо забутовкой в виде каменной кладки (c)
Fig. 1 - Cross section of a masonry vault with backfill (a) and its replacement with masonry columns (b) or with masonry backfill (c)
Image by the authors of the article

Расчет совместной работы засыпки со сводами в инженерных расчетах затруднен из-за разнообразия ее механических параметров, к которым относятся модуль упругости, коэффициенты внутреннего трения и сцепления с поверхностью свода. Как известно, доминирующее влияние на несущую способность сводов имеет соотношение изгибающих моментов M и продольных сил N [4], [24].

При этом оптимальным является очертание свода, совпадающее с линией давления. Растягивающие напряжения от действия изгибающего момента M вызывают трещины по неперевязанным сечениям (рис. 2 a), расчленяющие свод на несколько крупных соприкасающихся блоков что в расчетной практике идентифицируется с образованием шарниров (рис. 2b). При этом высота растянутой зоны поперечного сечения увеличивается пропорционально уменьшению высоты сжатой зоны h_c (рис. 2c, d) [4], [25].

В результате образуются как устойчивые одно-трехшарнирные, так и мгновенно изменяемые многошарнирные системы (рис. 2b). Наличие засыпки может уменьшить влияние изгибающих моментов и вызываемых ими растягивающие напряжения, а, следовательно, и процесс трещинообразования.

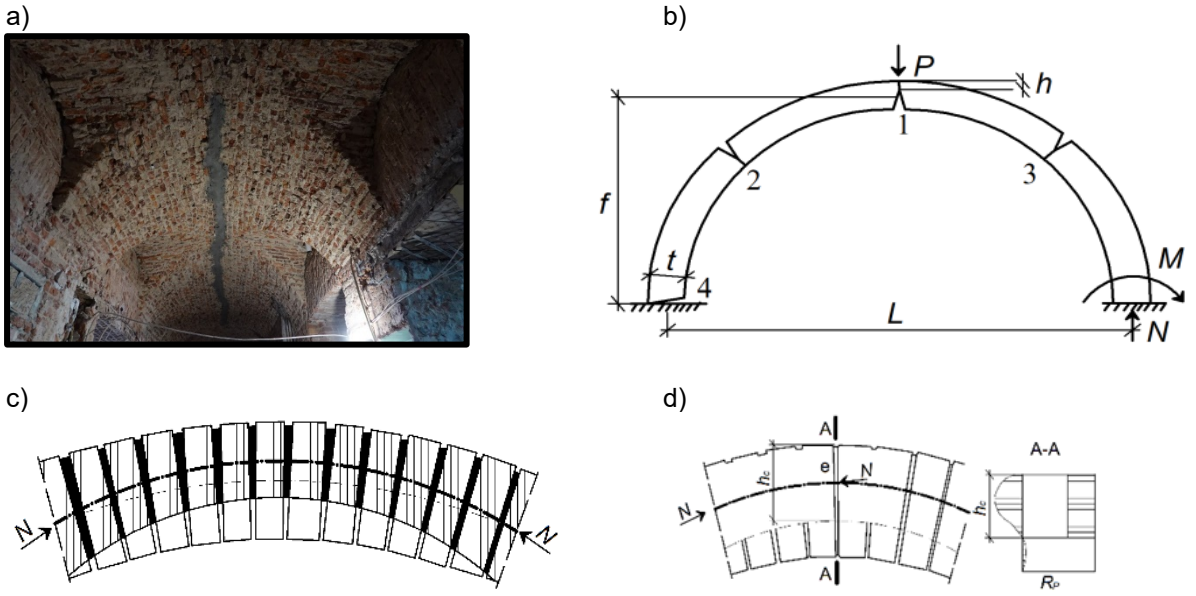


Рис. 2 - Механизм разрушения высоких сводов с соотношением f/L = 0.5:
a – трещина в шелыге цилиндрического свода; b – схема образования шарниров в сечениях сводов с трещинами; c, d – напряженное состояние сечения с трещиной [1]
Fig. 2 - Fracture mechanism of high vaults with the ratio f/L = 0.5:

Zimin, S.; Orlovich, R.; Dimitrieva S, Zimina E.
Influence of backfilling of masonry vault grooves on their load-bearing capacity;
2026; AlfaBuild; 38 Article No 3802. doi: 10.57728/ALF.38.2

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

a – crack in the cylindrical vault sheave; b – scheme of hinge formation in cross-sections of vaults with cracks; c, d – stress state of the cross-section with a crack [1]
Image by the authors of the article

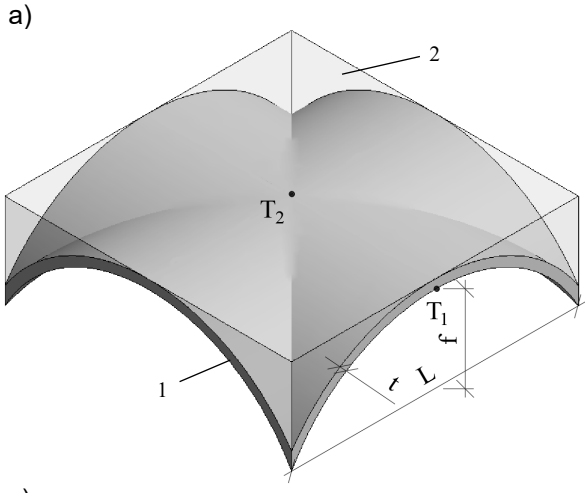
Конечно-элементные расчетные комплексы дают возможность для более детального анализа работы сводов [26], [27].

В данной работе выполнены численные исследования влияния засыпки на напряженное состояние цилиндрических и крестовых сводов в зависимости от соотношения высоты подъема свода f к его пролету L (см. рис. 1a). Исследования выполнены в комплексе конечно-элементного моделирования высокого уровня в двух вариантах – при учете включения засыпки в работу свода и без данного включения, когда засыпка учитывается в расчетной модели только в качестве нагрузки. Выполнен анализ наиболее напряженного участка зоны шелыги цилиндрических сводов, расположенного на внутренней поверхности в середине пролета (сечение 1 на рис. 2b). За критерий исчерпания несущей способности условно принято превышение растягивающих напряжений сопротивления растяжению каменной кладки по неперевязанному сечению согласно СП 15.13330 [19]. Расчетная модель свода пролетом L=8.0 м принята постоянной толщины 25 см. Учитывалась нагрузка от его веса и веса засыпки, а также обобщенная распределенная нагрузка 5.0 кПа (полезная нагрузка и нагрузка от пола). Рассмотрены два варианта материала засыпки в виде песка и керамзита. Варьируемыми параметрами являлись соотношение f/L=(0.1÷0.5) и модули упругости засыпки E, принимаемыми равными: E=120 МПа для песка плотностью 1500 кг/м^3 и E=15 МПа для керамзита плотностью 250 кг/м^3. Кладка свода принята выполненной из кирпича марки М75 и раствора марки М25 с деформационными характеристиками, определенными в соответствии с СП 15.13330 [19], плотность кладки свода принята равной 2000 кг/м^3. В расчетной модели учтено трение между верхней поверхностью свода и засыпкой (принят обобщенный коэффициент трения 0.6 в соответствии с СП 15.13330).

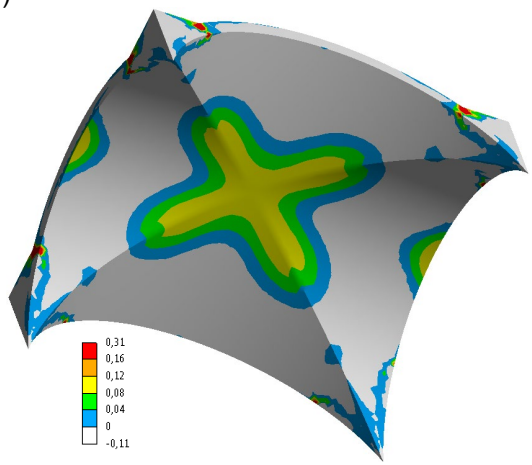
В работе также рассмотрено влияние засыпки на работу крестовых сводов, состоящих из пересекающихся под прямым углом цилиндрических сводов (распалубок), в пазухах которых располагается засыпка 2 (рис.3a). Образованные в зоне пересечения распалубок диагональные ребра опираются на каменные консоли, в то время как торцевые участки распалубок не сопрягаются с примыкающими к ним стенами или подпружными арками. При этом распалубки работают как свободно опертые на диагональные ребра цилиндрические своды переменного пролета. Чаще всего потеря несущей способности таких сводов происходит в результате развития трещин на внутренней поверхности распалубок (рис. 3 c, d). Это связано с доминирующим влиянием на этой поверхности главных растягивающих напряжений (рис.3b). При этом, следует отметить, что работа крестовых сводов отличается пространственным характером, а кладка сводов испытывает двухосное напряженное состояние, в связи с чем оценку ее прочности следует вести, пользуясь частными критериями прочности [28].

Выполнен численный анализ наиболее напряженных сечений шелыги свода (в зонах T1 и T2 согласно рис. 3a). Основные размеры, материал засыпок и их физико-механические характеристики, варьируемые и прочие параметры приняты в расчетной модели крестового свода аналогичными как для цилиндрического свода (см. выше).

a)



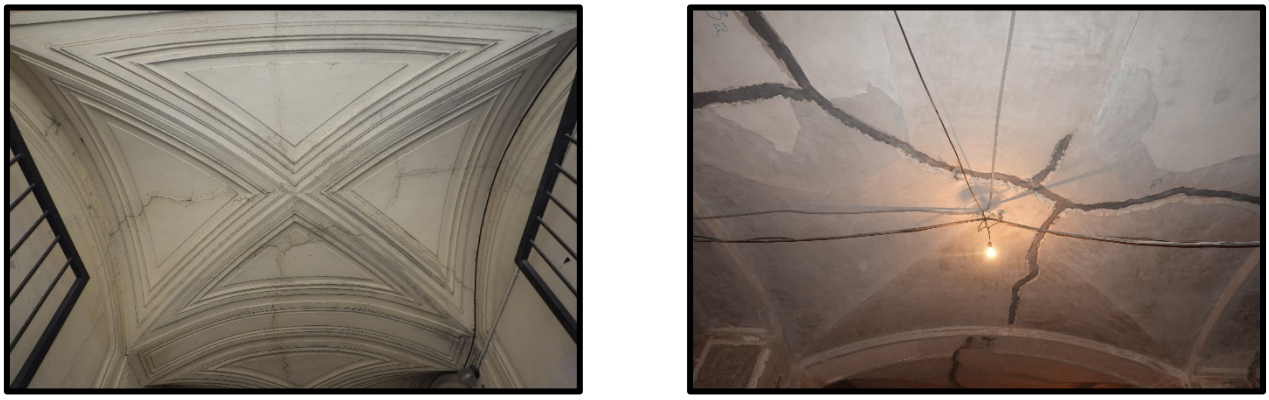
b)



c)

d)

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0



1 – распалубка, 2 – засыпка, 1 – tray, 2 – backfill

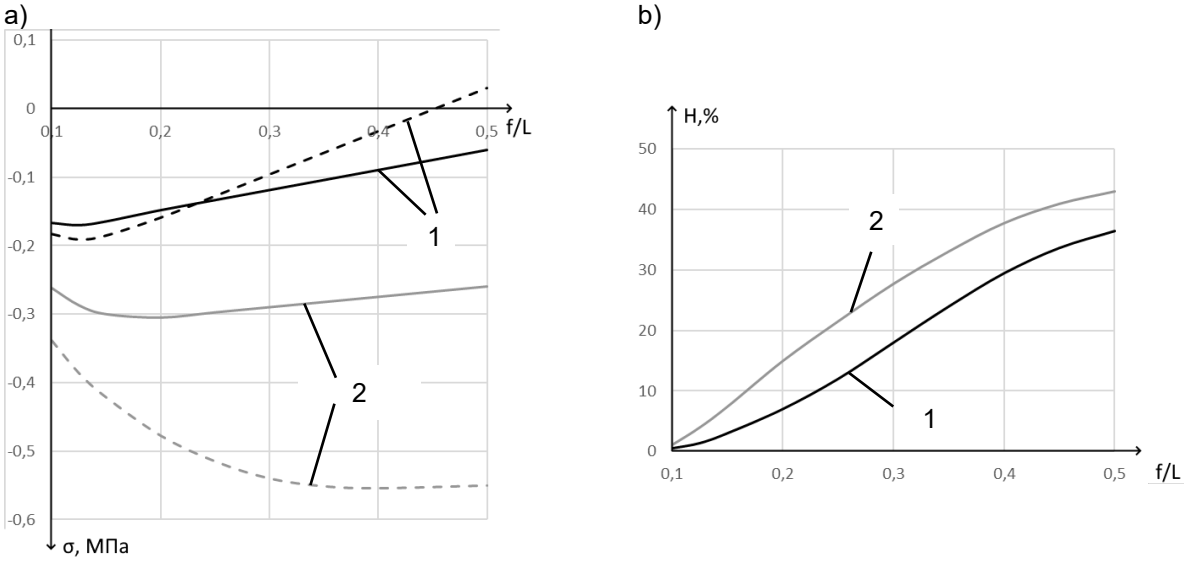
Рис. 3 - Геометрические параметры квадратного в плане крестового свода (a) с изополями главных растягивающих напряжений на внутренней поверхности распалубок (b) и картины трещинообразования крестовых сводов (c, d)

Fig. 3 - Geometrical parameters of a square cross vault (a) with isopoles of main tensile stresses on the inner surface of decks (b) and cracking patterns of cross vaults (c, d)

Image by the authors of the article

3 Results and Discussion

На рисунке 4а представлены графические зависимости напряжений σ в шелыге цилиндрического свода (в сечении 1 согласно рис.2b) от соотношения f/L с учетом и без учета влияния засыпок из песка и керамзита. Из графиков следует, что указанные напряжения являются сжимающими практически для всего диапазона изменения f/L (в отличие от случаев нагружения сводов равномерно распределенной или сосредоточенной нагрузкой согласно рис.2).



сплошные линии – зависимости с включением засыпки в работу свода
пунктирные линии – зависимости без включения засыпки в работу свода
1 – засыпка керамзитом, 2 – засыпка песком
solid lines - dependencies with inclusion of backfill in the vault operation
dotted lines - dependencies without inclusion of backfill in the vault operation
1 - claydite backfill, 2 – sand backfill

Рис. 4 - Изменение напряжений в шелыге свода (a) и воспринимаемого засыпкой распора H (b)

Fig. 4 - Variation of stresses in the vault sheave (a) and backfill support H (b)

Image by the authors of the article

Существенным является то, что в случае засыпки песком эти напряжения являются значительно большими, чем при засыпке керамзитом. Это связано с влиянием массы засыпки, которая в основном сосредоточена в пазухах свода и вызывает по сравнению с равномерно распределенной нагрузкой перераспределение изгибающих моментов вдоль пролета свода: зоны

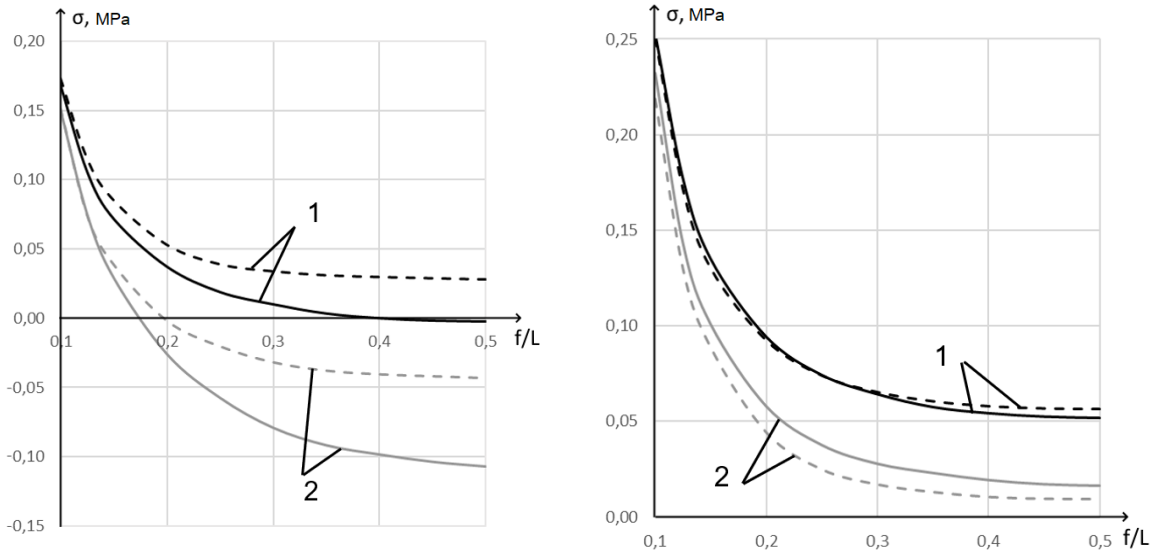
This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

действия максимальных изгибающих моментов и связанных с ними растягивающих напряжений на внутренней поверхности свода смещаются к опорам. Из сопоставления сплошных и пунктирных линий на рис 4a следует, что в засыпка из песка при ее взаимодействии со сводом приводит к значительному уменьшению напряжений. При использовании керамзита влияние его взаимодействия со сводом менее существенно и главным образом проявляется при соотношении f/L>3. Однако из-за значительно меньшей объемной массы керамзита по сравнению с песком напряжения в рассматриваемом сечении свода существенно снижаются. На рисунке 4b представлены графики зависимости доли горизонтальной составляющей опорной реакции (распора) H (%) воспринимаемого засыпкой относительно суммарного значения распора. Так, для свода полуциркульного очертания (f/L=0.5) значение H при применении в качестве засыпки керамзита и песка составляет соответственно 37%, 43%. С уменьшением соотношения f/L=0.1 участие засыпки в восприятии распора H снижается независимо от применяемого для засыпки материала.

Основные результаты численных исследований крестовых сводов приведены на рисунке 5 в виде графических зависимостей максимальных напряжений σ от соотношения f/L. Из их анализа следует, что в зоне T1 шелыги распалубок при засыпке керамзитом напряжения остаются растягивающими при всех значениях f/L, а при засыпке песком растягивающими только для пологих сводов с соотношением f/L< 0.2 (рис.5a). В центральной области T2 свода напряжения остаются растягивающими при всех значениях f/L независимо от материала засыпки (рис. 5b). Причем включение засыпки в работу свода в меньшей степени отражается на снижении напряжений в его центральной части чем в зоне шелыги распалубок, что связано с пространственным характером работы свода.

Из сравнения зависимостей на рис. 4a и рис. 5 следует, что влияние засыпки на уменьшение напряжений более существенно для цилиндрических сводов, чем для крестовых.

a) b)



сплошные линии – зависимости с включением засыпки в работу свода
пунктирные линии – зависимости без включения засыпки в работу свода
1 – засыпка керамзитом, 2 – засыпка песком
solid lines - dependencies with inclusion of backfill in the vault operation
dotted lines - dependencies without inclusion of backfill in the vault operation
1 - claydite backfill, 2 – sand backfill

Рис. 5 - Изменение максимальных напряжений на внутренней поверхности шелыги крестового свода в зонах T1 (a) и T2 (b) согласно рис.3a
Fig. 5 - Variation of maximum stresses on the inner surface of the cross-vault sheave in zones T1 (a) and T2 (b) according to Fig. 3a
Image by the authors of the article

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

4 Conclusions

1. Установлено, что наличие засыпки в пазухах каменных сводах благоприятно отражается на их напряженном состоянии, существенно уменьшая растягивающие напряжения.
2. Выявлено, что эффективность включения засыпки в работу цилиндрического свода зависит от его геометрических параметров: наибольший положительный эффект наблюдается при соотношении f/L ≥ 0.3, тогда как для пологих сводов (f/L <0.2) влияние засыпки минимально.
3. Установлено, что для крестовых сводов влияние засыпки на снижение напряжений в центральной зоне (Т2) менее выражено, чем в зоне шелыги распалубок (Т1).
4. Обосновано, что замена засыпки из песка (E=120 МПа) на керамзит (E=15 МПа) приводит к снижению сжимающих напряжений в своде, однако при этом снижается и доля воспринимаемого засыпкой распора (с 43% до 37% для полуциркульных сводов). Эффективность применения керамзита может быть повышена с помощью консолидации путем послойной проливки цементным молоком либо путем послойного армирования полимерными композитными материалами.

References

1. Torre, S.D. and Cantini, L. (2022). Historical Review of Masonry Arches and Vaults. Trends in His toric Preservation and the Relevance of Understanding Curved Masonry Structures. In: Milani, G., Sarhosis, V. (eds) From Corbel Arches to Double Curvature Vaults. Research for Development. S pringer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12873-8_2
2. Spallone, R. and Vitali, M. (2020) Complex Vaulted Systems: Geometry and Architecture from De sign to Construction. *Nexus Network Journal*, **22**, 799-809. https://doi.org/10.1007/s00004-020-00 537-6
3. Gaetani, A., Monti, G., Lourenço, P.B. and Marcari, G. (2016) Design and Analysis of Cross Vault s Along History. *International Journal of Architectural Heritage*, **10(7)**, 841-856. https://doi.org/10. 1080/15583058.2015.1132020
4. Lahtin, N.K. (1911) Calculation of arches and vaults. Moscow. https://books.totalarch.com/node/ 316
5. Aita, D. (2022). Revisiting Classic Methods for the Equilibrium Analysis of Masonry Arches and D omes. In: Milani, G., Sarhosis, V. (eds) From Corbel Arches to Double Curvature Vaults. Researc h for Development. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12873-8_6
6. Orlovich, R.B., Zimin, S.S. and Galalyuk, A.V. (2022) The analysis of efficiency of support area in masonry vaults. *Building and Reconstruction*, **(5),** 13-22. https://construction.elpub.ru/jour/article/ download/515/444
7. Zimin, S.S. (2024) Stress-strain state of stone cross vaults. *Bulletin of Science and Research Ce nter of Construction*, **43(4),** 182-194. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-182-194
8. Bovo, M., Mazzotti, C. and Savoia, M. (2021) Numerical investigation of structural behaviour of hi storical stone arches. *Journal of Building Engineering*, **44**, 103282. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2 021.103282
9. Pavlov, V., Khorkov, E. and Mirsayapov, I. (2020) Experimental research of masonry arches unde r the influence of the movement of supports. *IOP Conference Series: Materials Science and Engi neering*, **890**, 012123. https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012123
10. Zampieri, P., Zanini, M.A., Faleschini, F. and Hofer, L. (2018) Collapse displacements of masonry arch with geometrical uncertainties on spreading supports. *Computers & Structures*, **208**, 118-12 9. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.06.006
11. Khorkov, E.V. and Mirsayapov, I.T. (2023) Restoration of Damaged Masonry Vaulted Ceilings of Buildings. *Reinforced Concrete Structures*, **4(4),** 104-117. https://doi.org/10.22227/2949-1622.20 23.4.104-117
12. Pavlov, V.V. and Khorkov, E.V. (2014) Experimental studies of the performance of reinforced bric k arches under horizontal displacement of supports. *Izvestiya KGASU (Bulletin of KSUACE)*, **(2),** 90-96. https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2014/90_96_Pavlov_Khorkov.pdf

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

13. Hughes, T.G., Davies, M.C.R. and Taunton, P.R. (1998) Small Scale Modelling of Brickwork Arch Bridges Using a Centrifuge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, **128**, 49-58. https://doi.org/10.1680/istbu.1998.30034
14. Gilbert, M., Smith, C.C., Melbourne, C. and Wang, J. (2006) An experimental study of soil-arch interaction in masonry bridges. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:114095627
15. Cavicchi, A. and Gambarotta, L. (2005) Collapse Analysis of Masonry Bridges Taking into Account Arch-Fill. *Engineering Structures*, **27**, 605-615. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.12.002
16. Krajewski, P. (2010) Analysis of the influence of backfill materials on the bearing capacity of masonry vaults. Krakow. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106960494
17. Callaway, P., Gilbert, M. and Smith, C.C. (2012) Influence of backfill on the capacity of masonry arch bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, **165(3),** 147-157. https://doi.org/10.1680/brcn.11.00038
18. Krajewski, P. and Hojdys, L. (2024) Comparative Study of Granite and Expanded Clay Aggregate as Backfill Materials for Masonry Vaults. Materials, **17(24),** 6277. https://doi.org/10.3390/ma17246277
19. SP 15.13330.2020 (2020) Masonry and reinforced masonry structures. https://docs.cntd.ru/document/573741258
20. SP 427.1325800.2018 (2019) Masonry and reinforced masonry structures. Methods of strengthening. https://docs.cntd.ru/document/560396617
21. Orlovich, R.B., Zimin, S.S. and Derkach, V.N. (2022) Effectiveness of reinforcing stone vaults with composite materials. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, **2(100),** 44-54. https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-100-2-44-54
22. Stolyarov, O.N. and Gorshkov, A.S. (2009) Application of high-strength textile materials in construction. *Magazine of Civil Engineering*, **4(6),** 21-25. https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-vysokoprochnyh-tekstilnyh-materialov-v-stroitelstve
23. Orlovich, R.B. and Zimin, S.S. (2023) Bearing Capacity Reserves of Stone Spacer Structures. *Stroitel'nye materialy,* **(9),** 32-37. https://journal-cm.ru/index.php/en/journals/2023/all-articles-in-2023/bearing-capacity-reserves-of-stone-spacer-structures
24. Liu, B., Sarhosis, V. and Yan, Z. (2024) Mechanical Behavior of Brickwork Multi-ring Masonry Arch Bridges Constructed with Different Bond Types. In: *Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2023), RILEM Bookseries*, **47**, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39603-8_67
25. Reccia, E., Milani, G., Cecchi, A. and Tralli, A. (2014) Numerical study of the influence of backfill on the behaviour of masonry arches. *Engineering Structures*, **73**, 139-150. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.008
26. Ghiassi, B. and Milani, G., Eds. (2019) Numerical Modeling of Masonry and Historical Structures: *From Theory to Application. Woodhead Publishing, London*. https://doi.org/10.1016/C2017-0-01579-3
27. Smirnov, B.A. and Polunin, V.M. (2025) Review and Analysis of Nonlinear Models Used for Numerical Modeling of Masonry Structures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov,* **22(2),** 41-54. https://doi.org/10.23968/1999-5571-2025-22-2-41-54
28. Derkach, V.N. (2012) Evaluation of anisotropy of compressive strength of masonry in the inspection of old buildings. *Vestnik of Brest State Technical University*, **2-2(147),** 259-264. https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/459/52-55.pdf?sequence=4&isAllowed=y