

АРХИТЕКТУРНЫЕ ПАМЯТНИКИ: ДИАЛЕКТИКА СОХРАНЕНИЯ ПОДЛИННОСТИ И МЕХАНИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Бенедетта Орфео, магистр-инженер в области гражданского строительства,
Политехнический университет Мадрида

Игнасио Менендес Пидаль, профессор, магистр-инженер в области гражданского строительства,
Политехнический университет Мадрида.

Введение

Каменные мосты играют важную роль в обеспечении базовой функциональности, украшают также пейзаж благодаря своей эстетической привлекательности. Однако несмотря на то что, некоторые из этих сооружений служат веками, но и они подвергаются повреждениям. Эти повреждения могут выражаться в разной форме, например, размыв основания опоры, скольжение арки пролета вследствие осадок и вращений, продольные трещины в сводах, переворачивание опорных надводных стен и т.д. Кроме того, кислотные дожди разъедают известковый соединительный раствор и бутовый камень, циклы замерзания-оттаивания или биологические причины (например, корни деревьев) также способствуют ухудшению состояния мостов. Своевременный ремонт и усиления каменных мостов крайне важны для продолжения обеспечения их эксплуатационной пригодности, а также для их сохранения. Существуют многочисленные методы ремонта и усиления каменных мостов, технологии осуществления которых зависят от вида повреждения. Необходимо понять первопричину разрушения до того, как начинать работы, это позволит избежать проведения ненужных или инвазивных вмешательств. Также важно правильно выбрать совместимые материалы, чтобы обеспечить сохранение существующего сооружения.

Хотя существует несколько подходящих технологий увеличения несущей способности каменного моста, критический анализ показывает, что усиление-«оседлывание» опорной части представляет собой одну из наиболее интересных технологий увеличения прочности каменного моста. Однако следует упомянуть некоторые ограничения, связанные с данной технологией: для усиления-«оседлывания» необходимы значительные работы по экскавации и реконструкции, в результате которых происходит выемка и транспортировка большого количества материала. Более того, замещения пористого материала насыпи твердым бетоном может повлиять на дренажный режим (могут потребоваться дополнительные дренажные системы), а для стабилизации арки моста во время выполнения работ также может потребоваться центровка. Кроме того, хотя существует несколько способов поддержания транспортного потока, обычно применение технологии усиления-«оседлывания» подразумевает перекрытие дороги, что приводит к частичному или полному прекращению движения транспорта, а поскольку может оказаться так, что в определенных областях нет других путей передвижения, возникает необходимость устройства временных мостов.

Несмотря на существенные недостатки усиление-«оседлывание» остается очень интересной технологией, которая редко применяется на практике. Вероятно, это происходит из-за инвазивности изменения моста, и что более важно, высоких рисков обрушения во время проведения работ. Другой причиной редкого применения технологии является ограниченное понимание особенности работы каменных мостов, которое имеют современные инженеры. Другими словами, нежелание применять технологию часто коренится в страхе перед неизвестностью.

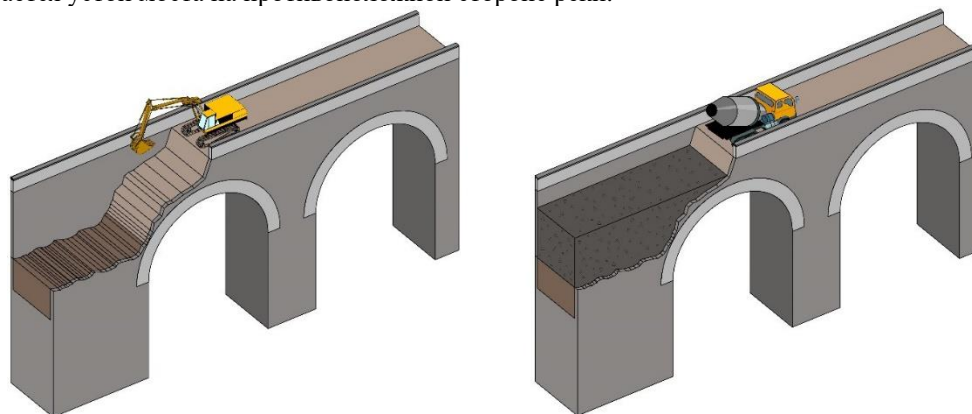
Цель данного исследования – пролить свет на конструкционную безопасность каменного сооружения во время выполнения усиления-«оседлывания» для различных конфигураций мостов, чтобы способствовать более широкому использованию данной технологии.

Для достижения этой цели исследования используется подход постепенного моделирования, разработанный в программе LimitState:Ring, он помогает анализировать конструкционную безопасность на каждой стадии процесса усиления-«оседлывания». Затем методология распространяется на несколько конфигураций мостов, чтобы исследовать влияние геометрических параметров моста на конструкционную безопасность.

Усиление-«оседлывание»

Технология «оседлывания» - метод усиления, подходящий для каменных сводов, которые имеют недостаточную несущую способность вследствие, например, ухудшения свойств материала, увеличения нагрузки (например, изменение ширины дорожного покрытия), или смещения

надсводной конструкции. Данная технология подразумевает откопку существующей обратной засыпки наверху каменного свода и ее замещение инъектируемым на месте бетоном. Схема показана на рис. 1, приводится трехмерный эскиз рабочего процесса (он начинается на одном краю моста); на рис. 1а показан процесс выемки обратной засыпки, на рис. 1б - заполнение бетоном вновь образовавшейся пустой зоны. В большинстве случаев обратная засыпка не вынимается в один заход (это возможно для очень крепких мостов), но процесс начинается с того, что у одного из устоев моста происходит откопка обратной засыпки, бетонирование, когда бетон затвердевает, вышеописанный процесс продолжается у следующей опоры. Он продолжается до тех пор, пока не достигается устой моста на противоположной стороне реки.



а) Рис. 1. Технология усиления-«оседлывания»: а) откопка обратной засыпки, б) ее замещение бетоном.

В зависимости от соединения существующего каменного свода и нового бетонного элемента опорный элемент («седло») может быть самоподдерживающийся или соединенный. Самоподдерживающееся усиление-«оседлывание» представляет собой помещение нового свода над существующим, причем оба элемента структурно независимы. Данное решение целесообразно в тех случаях, когда недостаточная несущая способность существующего свода критична. Как альтернатива, новый свод, помещаемый наверху существующего свода, может быть соединен с ним должным образом, так образуется композитный свод. В отличие от предыдущего решения данная альтернатива подходит, когда свод испытывает конструкционную недостаточность только при переменных нагрузках.

Как упоминалось выше, усиление-«оседлывание» вызывает скепсис у технических специалистов из-за отсутствия знаний о внутренней конфигурации каменных мостов, а в некоторых случаях и о механической работе этих сооружений. Каменные мосты имеют продольные опорные надсводные стены, которые опираются на верхнюю поверхность арки и достигают импоста в основании парапетов. В основном эти элементы имеют «двухслойную» обратную засыпку: бутовая кладка и песчано-гравийная засыпка.

Собственный вес обратной засыпки играет важную роль в обеспечении устойчивости каменного моста. Он помогает сохранить вертикальную линию распора, пересекающую арку свода, таким образом, способствуя общей устойчивости моста. Следовательно, важно четко понимать, какое максимальное количество песчано-гравийной засыпки можно извлечь (даже если это делается симметрично), чтобы не спровоцировать частичное или полное обрушение моста. Обычная технология усиления-«оседлывания» состоит в замещении всей песчано-гравийной обратной засыпки бетоном, инъектируемым *in-situ*. Однако есть альтернативный подход, предполагающий замещение материала только в вертикальной траншее, которая проходит вдоль всего моста. Хотя это решение может оказывать меньшее влияние на несущую способность моста, оно имеет преимущество: в некоторых случаях удается избежать полного перекрытия движения. Это становится возможным, поскольку требуется откопка лишь узкой траншеи, а не замещение всей песчано-гравийной засыпки.

Поэтому в определенных ситуациях данный подход может рассматриваться как целесообразный вариант. Такая же идея использовалась при усилении церкви Санта Каталина, расположенной в Талавера де ла Рейна (Испания), **рис. 2**. Главный неф церкви представляет собой кирпичный цилиндрический свод с соотношением пролет-толщина примерно равным 100 (толщина 120 мм на пролет 12.50 м). Для увеличения несущей способности свода использовались каменные ребра жесткости толщиной 200 мм, которые встраивались на разных высотах и помещались на недостаточно усиленных продольных отрезках, зачастую в разных поперечных сечениях. Этот метод усиления

широко применяется для культовых сооружений, он использовался для таких значительных зданий как Лонха де ла седа (Шелковый рынок) в Валенсии (Испания), рис. 3, и Бостонская библиотека (инж. Гуаставино).



Рис. 2. Церковь Санта Каталина в Талавера де ла Рейна (Испания) после усиления (2018 г.)

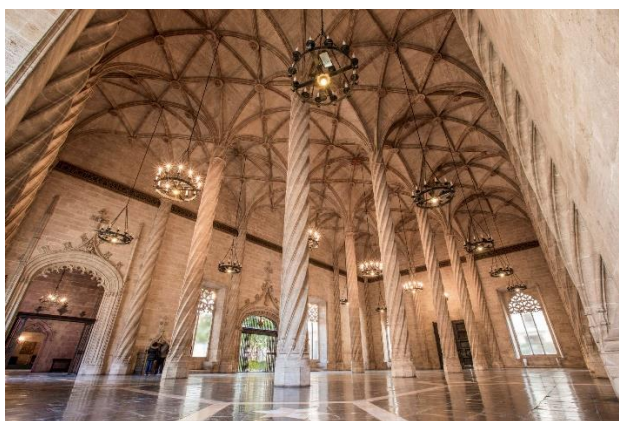


Рис. 3. Лонха де ла седа в Валенсии (Испания)

На внутренней поверхности сводов образовались несколько продольных трещин, что способствовало принятию трех мер для улучшения конструктивной безопасности здания. Во-первых, высота существующих ребер жесткости увеличивалась 4 м (примерно 2/3 общей высоты, что представляло наиболее благоприятную конфигурацию). Во-вторых, были дополнительно устроены семь кирпичных ребер жесткости для уменьшения расстояния между существующими ребрами жесткости, сохранения поперечной симметрии и обеспечения более равномерного нагружения. Наконец, между ребрами жесткости были построены горизонтальные кирпичные арки толщиной 100 для равномерного распределения распора свода. Результаты этих работ представлены на рис. 4.

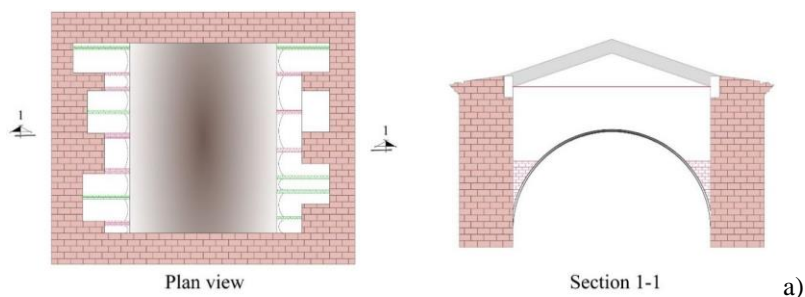




Рис. 4. Церковь Санта Каталина: вид в плане и разрез внешней поверхности свода с существующими (красные) и усиленными новыми ребрами жесткости (зеленые) (а); внешние поверхности свода после усиления (б).

Методология

Основа проектирования

Выполнение усиления-«оседлывания» каменных мостов моделировалось на всех стадиях строительства, также оценивалась соответствующая конструкционная безопасность. В данном разделе методология иллюстрируется на примере обычного арочного моста со следующими характеристиками (рис. 5.):

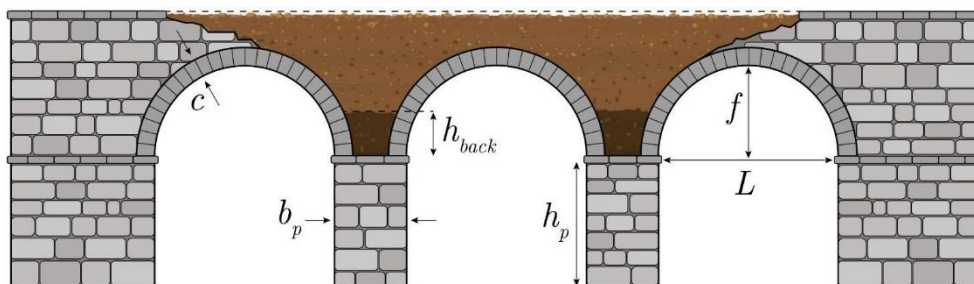


Рис. 5. Определение геометрических параметров анализируемых каменных мостов.

Предполагается, что каменный свод был сделан из песчаника среднего качества, удельный вес 24 кН/м^3 , прочность на сжатие 19 МПа . Мост состоит только из одной несущей арки с высотой опоры (h_{back}) $f/2$. Рассматриваемые в анализе нагрузки включают собственный вес моста и переменную нагрузку от экскаваторов. Хотя также можно было учесть вес бетономешалки, он примерно равен весу экскаваторов (в большинстве случаев даже ниже). Кроме того, чтобы избежать перенагружения моста и вследствие пространственных ограничений, экскаваторы и бетономешалки помещались попеременно. Следовательно, для упрощения анализа рассматривались только экскаваторы.

Для определения конструкционной безопасности моста на каждом этапе осуществления усиления-«оседлывания» использовалась программа LimitState:Ring. Данная программа рассчитывает коэффициент адекватности (AF), оцениваемый как повышающий коэффициент переменных нагрузок, необходимый для разрушения, при том что постоянная нагрузка остается неизменной. Программа анализирует только предельное состояние и не показывает линию распора в ситуации эксплуатации при прилагаемых нагрузках. Кроме того, нельзя получить AF для отдельных элементов моста, поскольку программа рассчитывает только AF, который приводит к разрушению всего моста. После начала численного моделирования могут возникнуть разные сценарии:

- $AF > 1$: мост может выдержать собственный вес и AF, умноженный на прилагаемые переменные нагрузки;

- $0 < AF < 1$: сооружение может выдержать постоянную нагрузку, но не все переменные нагрузки;
- $AF < 0$: нагрузка должна прикладываться снизу вверх, чтобы обеспечить устойчивость моста;
- $AF = \text{неустойчивый}$: мост не может выдержать одну постоянную нагрузку, нельзя вообще учитывать переменную нагрузку.

При двух последних сценариях мост не может выдержать ни постоянную, ни переменную нагрузку. Для упрощения интерпретации результатов оба случая рассматриваются как «неустойчивые» (U).

Во время анализа рассматривалось несколько гипотез. Во-первых, используемая в исследовании программа не позволяет добавление никакого материала, кроме бутовой кладки или песчано-гравийной засыпки. Поэтому для моделирования усиления-«оседлывания» вместо инъецирования нового материала бутовая кладка увеличивается до необходимой высоты. Это не может рассматриваться как ограничение процесса, поскольку бутовая кладка – несущий элемент, его использование приводит к тем же численным результатам. Интересно также подчеркнуть, что программа напрямую не позволяет линии распора проходить через бутовую кладку. Программа рассматривает бутовую кладку как «специальную реализацию горизонтального элемента обратной засыпки», в котором прочность на сжатие устанавливается на высоком значении (5 МПа по умолчанию)»; согласно Руководству пользователя Limitstate:Ring: разрешается «учитывать переход сжимающих усилий между (или по направлению от) пролетами, где есть сильный материал. Наконец, важно отметить, что из-за ограничений программы бутовая кладка не может доходить до дорожного покрытия, только до внешней поверхности свода арки. В результате снимается часть стабилизирующей вертикальной нагрузки, что ведет к противоречивому анализу, который проводится в более безопасных условиях.

Моделируемый процесс усиления-«оседлывания» включает откопку существующей песчано-гравийной засыпки на половине каменного свода, обычно движение идет от устоя моста. Данная область затем заполняется бетоном, после его затвердения процесс повторяется на следующей части моста. Чтобы полностью понять данный процесс, читатель может обратиться к **рис. 6**, составленному на основе описываемого моста. Процесс начинается (Стадия 0), когда экскаватор помещается наверху первой опоры, чтобы избежать нарушения равновесия. Первая стадия (Стадия 1) представляет выемку песчано-гравийной засыпки с правого устоя моста. Затем в образовавшееся пустое пространство инъецируется бетон (Стадия 2). Экскаватор перемещается к следующей опоре, и процесс повторяется, пока не доходит до противоположного устоя моста (Стадии 3-8).

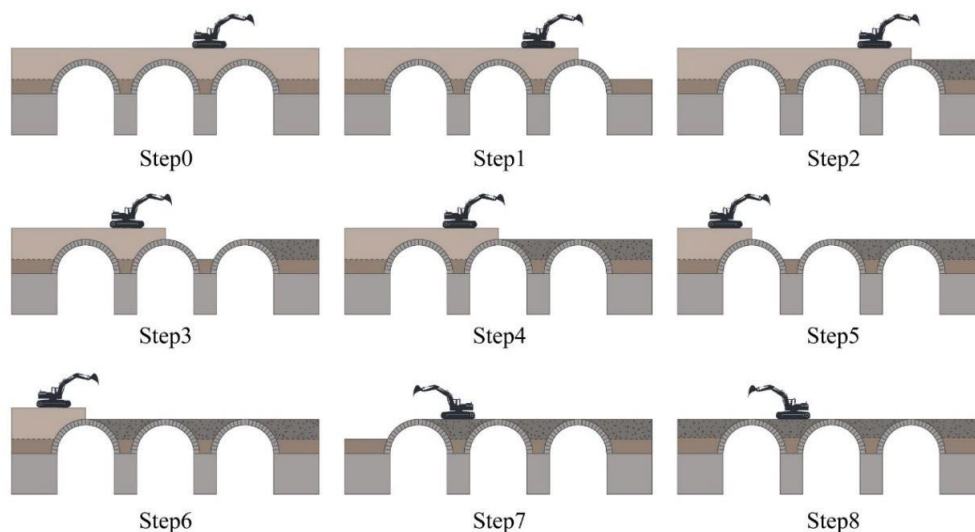


Рис. 6. Графическое описание постепенного осуществления усиления-«оседлывания».

Результаты и описание

В табл. 1 показаны результаты относительно AF , полученного на каждой стадии моделирования процесса усиления-«оседлывания», который осуществлялся на мосте, геометрически описанном на рис. 6. В данном конкретном случае вес рассматриваемого экскаватора составлял 23 т (данная величина взята из технической спецификации экскаватора Caterpillar 320).

Таблица 1. Результаты анализа постепенного осуществления усиления-«оседлывания».

| | Стадия 0 | Стадия 1 | Стадия 2 | Стадия 3 | Стадия 4 | Стадия 5 | Стадия 6 | Стадия 7 | Стадия 8 |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| AF [-] | 267 | 127 | 267 | 127 | 267 | 148 | 420 | 271 | 438 |

Стадии, обозначенные нечетными цифрами (т.е., стадии 1-3-5-7) обычно имеют меньшие величины AF, так как это фазы, когда откапывается песчано-гравийная засыпка, что приводит к более слабой конфигурации моста. Напротив, четные цифры (т.е., стадии 2- 4-6-8) соответствуют симметричной нагрузке, которая менее опасна для сводов и опор. Стадии 1 и 3 являются наиболее критичными в процессе усиления-«оседлывания», тогда как на стадии 5 несколько более высокая величина AF; стадия 7 показывает практически двойную величину по сравнению с предыдущими нечетными стадиями. Это происходит потому, что постепенно из моста вынимается обратная засыпка и он усиливается бетоном. Сравнивая стадию 0 (до процесса усиления-«оседлывания») и стадию 8 (после завершения процесса), становится очевидно, что несущая способность моста увеличивается. Это показывает эффективность процесса усиления-«оседлывания» для улучшения рабочих показателей конструкций моста.

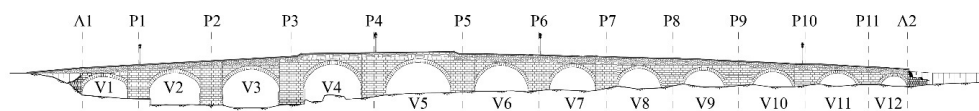
Представленная здесь методология в дальнейшем применялась к мостам других конфигураций, учитывая анализ общей применимости технологии усиления-«оседлывания» и влияния различных геометрических переменных.

Практическое применение усиления-«оседлывания» к мосту Ланга де Дуэро

Каменный мост позднего средневековья, расположенный в Ланга де Дуэро (Испания), рис. 7, реставрировался в 2020 г. При этом использовалась технология усиления-«оседлывания», а также ремонт и усиление северных опор. Данные меры были необходимы из-за ухудшения материала засыпки и внешнего облицовочного бутового камня, а не влияния осадок или размыва. Следует отметить, что опоры и устои моста устраивались на коренной породе, это стратегическое решение, принятое мастером-строителем моста, обеспечило его долгую службу. Примерная длина моста - 100 м, он состоит из 12 сводов разной формы с различными пролетами. Эти вариации возникли в результате последовательных вмешательств и реконструкции, проводимых в 17, 18 и 19 веках.



a)
b)



Downstream view

Рис. 7. Мост Ланга де Дуэро: общий вид (а) и вертикальный разрез (b) моста со стороны вниз по течению с указанием соответствующих устоев (А), опор (Р) и сводов (V).

По рассматриваемому мосту осуществлялось относительно интенсивное движение грузового транспорта из-за наличия сельскохозяйственных земель, скотоводческих хозяйств и других предприятий. В 2018 г. была проведена специальная инспекция, которая выявила следующее: материал засыпки за сводами и опорами оказался в плохом состоянии, на некоторых сводах были свидетельства отделения и протечек воды под опорные надсводные стены, хотя они сами проявляли признаки крена. Более того, под давлением некоторых сводов, особенно оригинальных средневековых, была большая опасность, что делали их более уязвимыми перед потенциальным разрушением. Чтобы решить эти проблемы, была предложена технология усиления-«оседлывания».

В данной работе мы не приводим детальный анализ применения усиления-«оседлывания» с расчетом АФ, мы только представляем работы, выполняемые на площадке. Очевидно, что эти работы основываются на анализе.

Восстановительные работы также проводились на внешнем облицовочном бутовом камне и соседней засыпке, они включали повторное гидравлическое инъецирование известкового раствора. Наконец, частично реконструировались быки моста, как часть общих восстановительных работ проводилась расшивка швов каменной кладки стен.

Первая мера представляла отведение русла реки, что позволило дренировать и осушить рабочую площадку. После выполнения этого, **рис. 8**, стало возможно перестроить основания опор, которые были разрушены вследствие размыва и столкновений с обломками, в том числе ветками деревьев и даже большими камнями, которые переносились водами реки.



a)



b)

Рис. 8. Опора моста Ланга де Дуеро: до (a) и после (b) ремонта.

Следующая стадия состояла в снятии бетонного дорожного покрытия для вскрытия оригинальной брусчатки под более поздним покрытием (рис. 9). Ввиду исторической значимости данного элемента команда, выполняющая проект, остановила работы, чтобы аккуратно перенести каждый камень брусчатки в специально отведенное место на правом берегу реки рядом с мостом. Такой подход позволяет посетителям получить полное представление об изначальном дорожном покрытии.



Рис. 9. Оригинальное дорожное покрытие – брусчатка, вскрытое под верхним слоем дорожной одежды.

После перенесения всего оригинального дорожного покрытия начался процесс усиления-«оседлывания» моста. Учитывая конфигурацию моста, было принято решения оставить часть обратной засыпки нетронутой и откопать только траншею в центре (рис. 10). Данный подход является альтернативной традиционной полномасштабной технологии усиления-«оседлывания». Процесс начался с южного конца и продвигался на север, для каждого свода проводился анализ конструкций: проверялась их устойчивость, выполнялись стадии, приведенные выше.



Рис. 10. Откопка центральной траншеи для дальнейшего заполнения бетоном.

Вследствие ограниченной ширины моста движение на время проведения проекта было полностью прекращено. Для переправы транспорта был организован соответствующий объезд, а для пешеходов был наведен временный пластиковый наплавной мост, расположенный в 180 м вверх по течению.

Во время усиления-«оседлывания» обнаружилось, что свойства засыпного материала были лучше, чем решила специальная инспекция в 2018 г. Это известное явление в геотехнике, когда использование охлаждающей воды при бурении может значительно изменить характеристики засыпки.

После оценки состояния бутового камня было принято решение, что глубина усиления-«оседлывания» довольно невелика и, таким образом, нужно усиливать мост на всю ширину (рис. 11). Тем не менее, конструкционный анализ выполнялся для каждого конкретного случая, для каждого свода проводилась геометрическая характеристика (в том числе измерялась толщина цилиндрического свода и положение засыпки). Анализ подтвердил, что центрирование не требовалось, это привело к более быстрому и дешевому, чем ожидалось, осуществлению процесса. На рис. 12 показан вид моста после реконструкции.



Рис. 11. Заливка бетона в пустое пространство.



Рис. 12. Вид моста после осуществления процесса усиления-«оседлывания».

Заключение

Технология усиления-«оседлывания», которая включает замещение существующей обратной засыпки каменных мостов бетоном, инъецируемым *in-situ*, - эффективный метод улучшения несущей способности подобных конструкций. Однако ее осуществление часто считается опасным для общей устойчивости моста и поэтому редко применяется на практике.

Оценка конструкционной безопасности моста во время использования технологии усиления-«оседлывания» зависит от конфигурации моста. Хорошим примером ее применения является описанный в статье мост Ланга де Дуеро (Испания).

1. Результаты подтверждают, что наиболее критичные стадии во время усиления-«оседлывания» соответствуют стадиям, на которых существующая обратная засыпка асимметрично откапывается и замещается бетоном.
2. Точная количественная оценка безопасности во время процесса усиления-«оседлывания» зависит от геометрической конфигурации моста и свойств материала, а также веса и мест установки экскаваторов.
3. При сохранении тех же величин свойств материалов моста и веса экскаватора для обычных конфигураций моста величины AF варьируются от 0 до 200. Таким образом, на результаты большое влияние оказывают геометрические соотношения моста.
4. Толщина арки играет наиболее важную роль в коэффициенте запаса: более высокие величины соответствуют значительному увеличению безопасности во время осуществления работ.

5. Высота бутового камня и ширина опор также влияют на коэффициент запаса, хотя и гораздо меньше, чем толщина арки. Влияние ширины опоры на величины АФ исчезает, когда размеры моста увеличиваются. Высота опор не оказывает значительного воздействия на результаты для анализируемых геометрических конфигураций. В проанализированных случаях из практики петли расположены только в своде, не на опорах.

Количественная оценка безопасности во время процесса усиления-«оседлывания», с точки зрения величины АФ, имеет фундаментальное значение в определении того, может ли конкретный мост пройти процесс усиления-«оседлывания». Результаты можно использовать для продвижения более широкого применения технологии усиления-«оседлывания» как эффективного и безопасного метода усиления каменной (кирпичной) кладки.