

УДК 624.21

Ю.П. СМОЛИН, В.Ф. СКОРКИН

К ВОПРОСУ О СТРОИТЕЛЬСТВЕ ФУНДАМЕНТОВ АВТОДОРОЖНОГО МОСТА ЧЕРЕЗ р. МОСКВУ НА ТРАССЕ КРАСНОПРЕСНЕНСКОГО ПРОСПЕКТА

Автодорожный мост через р. Москву в районе Краснопресненской набережной в г. Москве стоит на двух опорах арочного пилона, который поддерживает на вантах 850-метровый пролет моста. Арочные опоры опираются на свайный ростверк. Бурунабивные сваи опор диаметром 1,5 м погружены в трещиноватые закарстованные известняки. Для проведения цементации известняков ниже острия свай была использована технология, разработанная российскими строителями. Эта технология и описана в настоящей статье.

Правительством Москвы по итогам открытого конкурса, проведенного в 2003 г., был одобрен проект моста через р. Москву в районе Краснопресненской набережной в Серебряном бору. В 2008 г. мост был построен, но для ввода в эксплуатацию необходимо было осуществить независимую экспертизу и сделать по ее результатам заключение. В качестве экспертов были назначены авторы настоящей статьи. Изучив и проектную документацию, и технологии производства строительных работ, авторы посчитали необходимым рассказать об этом уникальном и передовом опыте строительства в отечественном мостостроении, который представляет научный и практический интерес в фундаментостроении.

Мостовой переход через р. Москву состоит из трех частей:

- левобережная эстакада до проспекта Маршала Жукова длиной 202,58 м;
- прибрежная эстакада длиной 375 м, расположенная на 15 опорах;
- центральная часть — собственно вантовый мост.

На рис. 1, 2 показаны план и общий вид мостового перехода.

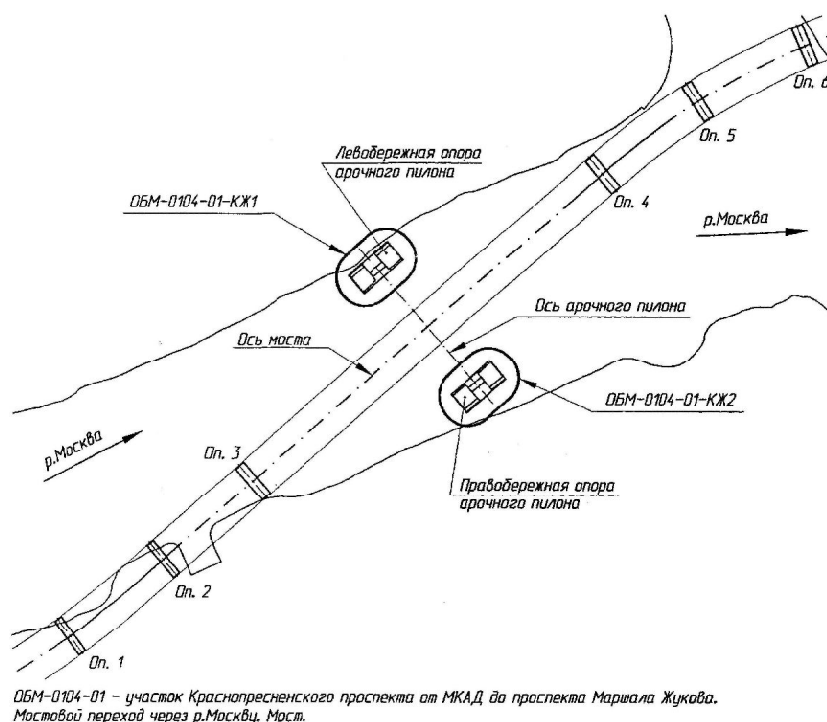


Рис. 1. План мостового перехода через р. Москву с пролетными опорами



Рис. 2. Общий вид моста со стороны левобережной эстакады

Часть моста, непосредственно расположенная над рекой, стоит на шести пролетных опорах и двух опорах арочного пилона. Опоры с третьей по шестую, включительно, и опоры арочного пилона расположены в русле реки. Первая и вторая опоры частично находятся в русле и на берегу.

Все указанные выше опоры моста опираются на свайный ростверк.

Ростверки пролетных опор с первой по шестую опору имеют одинаковый размер в плане (длина — 36,5 м, ширина — 7,0 м). Высота ростверков — 3,0 м. Для ростверков предусмотрен бетон по прочности В30, по морозостойкости F 300 и водонепроницаемости W 8. Арматура ростверков изготовлена из стали А III 25 Г 2С.

Все ростверки опираются на буронабивные железобетонные сваи диаметром 1,5 м. Сваи заходят в тело ростверка на глубину 100 мм. Для жесткой заделки свай в ростверке из свай в ростверк заведена арматура каркаса сваи на глубину 750 мм. В ростверках следующее число свай:

опора 1 — 16 шт., опора 2 — 18 шт.,
опора 3 — 21 шт., опора 4 — 25 шт.,
опора 5 — 25 шт., опора 6 — 23 шт.

Правобережная и левобережная опоры арочного пилона (рис. 3) сваи расположены: 5 свай в ряду вдоль моста, 12 свай в ряду поперек моста (всего 60 свай в каждой опоре).

В результате инженерно-геологических изысканий, проведенных под русловыми опорами и опорами арочных пилонов до глубины 45 м, было установлено, что до 22–25 м залегают пески и глинистые отложения (песчанистые супеси, суглинки и тяжелые глины). Ниже дисперсных грунтов на неопределенную глубину распространяются карбонатные отложения закарстованных известняков.

Существование зон разуплотнения, разрушения и карстовых пустот, конечно, повлияло бы отрицательно на работу основания под нагрузкой, поэтому проектом и предусматривалось укрепление этих зон. Но особенно важно

ответить на вопрос: продолжаются ли процессы суффозии в известняках, и если да, то с какой скоростью, или же процесс приостановился. На наш взгляд, в настоящее время в известняках данного объекта суффозные процессы практически не происходят. Подземные воды в горизонте известняков имеют гидравлическую связь с р. Москвой, уровень которой зарегулирован и практически не меняется. Подземные воды находятся в квазистатическом состоянии, концентрация растворенных элементов в воде предельная, и поэтому дальнейшее растворение известняков не происходит. Из-за трещиноватости и закарстованности известняков в основании свай проектировщики приняли верное решение — известняки инъектировать цементным раствором.



Рис. 3. Вид левобережной арочной опоры в процессе строительства

Сваи опор арочного пилона погружены до скального основания и рассматриваются как сваи-стойки. Шнековое бурение скважин в обсадных трубах для буронабивных свай производилось таким образом, чтобы концы свай углублялись в скальный массив на величину ≥ 2 м. После окончания бурения устанавливался арматурный каркас. Каркас оборудовался двумя стальными трубками: одна — диаметром 0,76 м, другая — 121...133 мм. Трубки диаметром 0,76 м нужны для контроля сплошности буровых столбов неразрушающими методами (ультразвуковой метод). Трубки диаметром 121...133 мм необходимы для цементации известняков в основании свай. (Трубки приваривались к каркасу.)

После установки арматурного каркаса в скважину опускалась бетонолитная труба диаметром 240...325 мм на глубину, не доходящую до дна скважины на 20...30 см. (Трубки зачеканивались снизу, чтобы в них не попал раствор.)

Укладка бетонной смеси в скважину производилась на всю глубину скважины. Обсадная труба постепенно производила возвратно-поступательное движение: на 20–30 см приподнималась вверх, а затем на 10–15 см опускалась вниз.

Таким образом формировалась рифленая боковая поверхность сваи. К заполнению скважины бетоном приступали через 24 ч после окончания бурения.

Фактическое погружение свай в скальную породу устанавливалось по результатам штамповых испытаний. Штамповые испытания производились выше проектной отметки при бурении скважины, на расстояние примерно 2...2,5 м. Первые испытания проводились в соответствии с требованиями, заложенными в проекте, по результатам которых устанавливалась прочность известняков под штампом. Если прочность известняка не отвечала прочности, принятой по проекту, то бурили ниже, примерно на один метр, и вновь производили штамповое испытание. Если известняк соответствовал проектной прочности, то эта отметка пробуренной скважины принималась как фактическая отметка погружения сваи. Если прочность грунта вновь была ниже проектной, то бурили ниже и снова определяли прочность известняка.

Штамповые испытания проводились на каждой опоре:

опоры 1, 2, 4, 5 — по трем сваям в двух отметках;

опора 3 — по трем сваям на шести отметках;

опора 6 — по трем сваям на трех отметках.

Важнейшей операцией в технологии изготовления свай-столбов является цементация трещиноватых и закарстованных обводненных известняков в их основании.

Для закрепления трещиноватых и закарстованных известняков рекомендовано было использовать инъекционный раствор на основе В/Ц + бентонит = 0,5, прочностью 15 000 кПа (15,0 МПа). Состав: вода — 599 л, цемент — 1164 кг, бентонит — 35 кг. Плотность инъекционного раствора составляла $\rho = 1,8 \text{ г/см}^3$.

Через трубку диаметром 121–133 мм производилось бурение известняков с прямой промывкой водой буровой установкой УРБ 2А2 (СКБ-4) с захватками по 1,5...2,0 м.

Диаметр зоны закрепления грунта должен быть равен 2,6 м; толщина слоя закрепления — 7,0 м. Если в забое скважины сильно трещиноватые известняки, скважина добурируется до глубины 10 м (до прочных известняков).

Технология инъектирования предусматривала:

- бурение скважины на величину заходки;
- промывку скважины;
- определение удельного водопоглощения;
- инъекцию известняков до «отказа»;
- разбуривание цементного камня в захватке и определение удельного водопоглощения, по результатам которого принимается решение о разбуривании цементного камня последующей захватки или о повторном инъектировании;
- бурение скважины на величину второй захватки и повторение предыдущих операций.

Опытные работы по инъектированию грунтов, проведенные на первых скважинах, показали, что можно отказаться от описанной выше методики, а для осуществления цементации принять методику, разработанную ОАО «ЦНИИС НИЦ «Тоннели и метрополитены». По этой методике цементация кавернозных известняков производится в два этапа (основной и контрольно-заключительный). Цементация выполняется через направляющие металлические трубы диаметром 108 мм, находящиеся в свае (о них упоминается выше, хотя диаметр

принимается 121–133 мм). Через эти трубки производится бурение скважин одной заходкой 7 и 10 м буровой установкой УРБ 2 АГ.

Фактическое состояние известняков и расход цементного раствора для закрепления грунтов определялись по провалам бурового инструмента, поглощению промывочного раствора и коэффициенту фильтрации, установленному методом налива.

Для ограничения распространения цементного раствора в грунтовом массиве в раствор добавлялось до 20 % силиката натрия. Нагнетание цементного раствора в скважину производилось последовательно в две фазы: раствор в скважину подавался самоизливом и нагнетанием с помощью инъекционно-смесительной установки «Турбо-100».

Нагнетание раствора соответствовало давлению «отказа». Под «отказом» принималось нулевое поглощение или сокращение расхода раствора до 5,0 л/мин. При выполнении основного контрольно-заключительного этапа цементации 15 кг/см^2 (0,15 МПа) за отказ принималось нулевое поглощение или расход раствора меньше 0,5 л/мин.

Контроль качества и оценку достаточности объема материала по цементации грунта необходимо проводить на всех этапах работ по нагнетанию раствора в скважину с составлением актов об освидетельствовании скрытых работ.

После проведения цементации в скважине и после набора прочности цементом, в закрепленном грунте производились испытания на удельное водопоглощение при гидроопробовании контрольных скважин. Закрепленный грунт считается водонепроницаемым, когда фильтрация не превышает 0,05–0,1 л/мин·м² водного столба. При этом на основном этапе работ по цементированию на всех сваях опор был получен отказ при 0,10 МПа, расход раствора в скважинах колебался от 0,2 до 20 м³.

При контрольном инъектировании при 0,15 МПа отказ имел место только для отдельных свай.

Как уже было сказано выше, имеется опасность существования в основании карстовых полостей и зон пониженной плотности и разрушения известняка до состояния щебня и даже «муки». Геофизические исследования показывают, что такие зоны весьма обширны. Представляет практический интерес вопрос эффективности инъектирования в основание свайных столбов при их устройстве.

Для решения этого вопроса по указанию авторов данной статьи строителями было пробурено пять контрольных скважин: три у левобережной опоры и две у правобережной. Скважины пробурены глубиной по 42 м, т.е. ниже концов свай не менее 2 м. Бурение колонковое — с выкладкой керна из всей скальной и полускальной толщи.

На рис. 4 а, б, в показано типичное состояние керна в зоне концов столбов, а на рис. 5 — стенд для испытания кернов известняка на одноосное сжатие.

Контрольное бурение в основном подтверждает результаты инженерно-геологических изысканий.

При контрольном бурении у правобережной опоры пилон обнаружилось, что обратная засыпка котлована выполнена некачественно, появились провалы грунта от веса бурового станка в виде воронок.

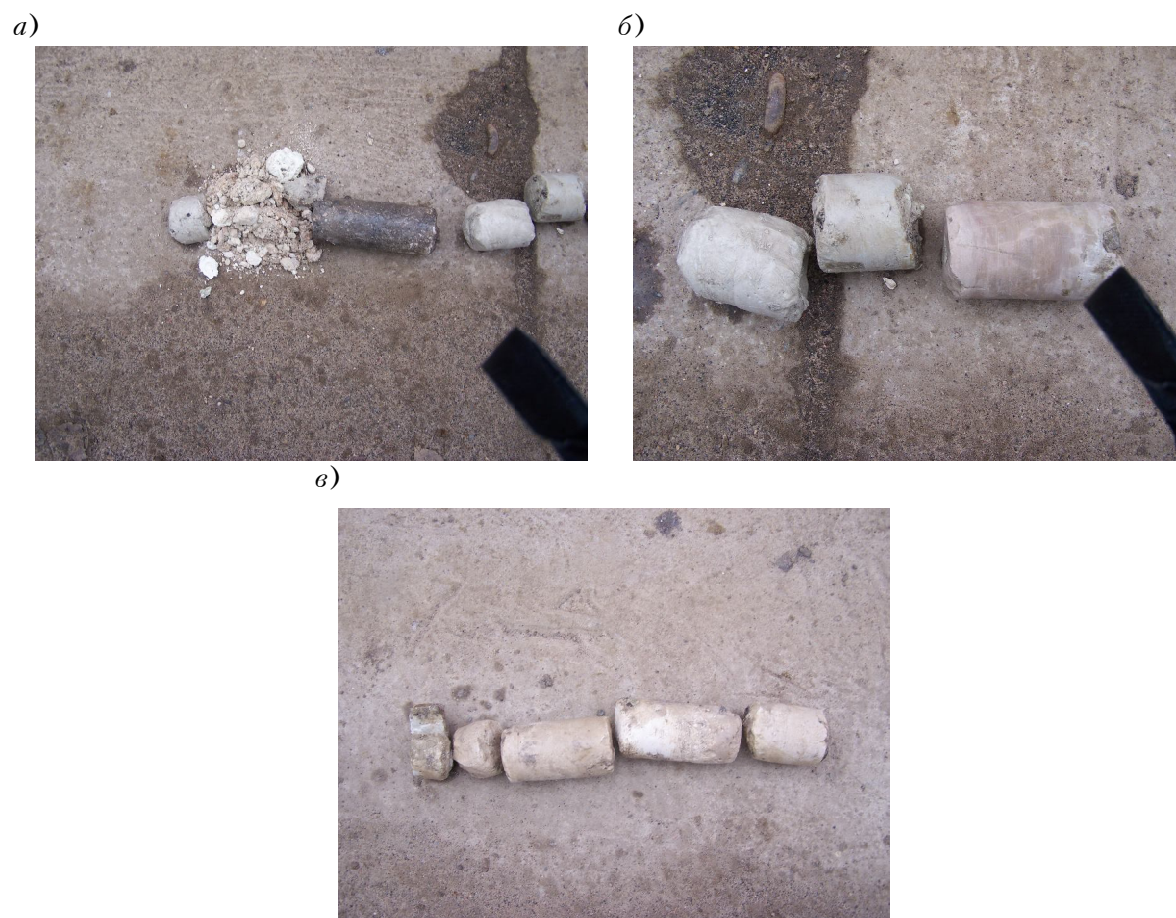


Рис. 4. Состояние керна в одной из скважин:
а — на глубине 33 м; б — на глубине 40 м; в — на глубине 42 м



Рис. 5. Стенд для испытания кернов известняка на одноосное сжатие

Контрольное бурение не выявило в основании фундаментов пилонов обширных зон разрушения известнякового массива, не было обнаружено и карстовых пустот. Поэтому в кернах отсутствовали следы раствора инъецирования.

В разрушенные щебенистые зоны массива раствор не поступил, по-видимому, потому, что эти зоны замкнутые и не сообщались с инъекционным каналом. По данным исполнительной документации можно сделать вывод, что значительные объемы раствора поглощались скальным грунтом. В трещиноватом массиве всегда бывают сквозные трещины, по которым возможно перемещение раствора, и не обязательно эти пути пересекутся скважинами малого диаметра.

В скважинах контрольного бурения на уровне пяток столбов и ниже на 2 м отбирались керны известняка для испытания на одноосное сжатие, проводимое в соответствии с ГОСТ 17245–79. Результаты испытаний на одноосное сжатие R_c и значения модуля упругости E_y сведены в таблицу.

Результаты испытаний кернов на одноосное сжатие

№ п/п	№ скважины	Глубина отбора, м	R_c , МПа	E_y , МПа
1	1к	40	26	20100
2	1к	42	70	17300
3	2к	40	26	9600
4	2к	42	70	20500
5	3к	40	30	11000
6	3к	42	60	26700
7	4к	40	28	7500
8	4к	42	55	20000
9	5к	40	60	30000
10	5к	42	28	9900
Нормативная величина			45,3	16900
Коэф. вариации			0,42	0,47

В расчете свайного фундамента опоры правого арочного пилон использовались данные, взятые из проекта. В результате были определены: осадки свай; горизонтальные перемещения головы сваи; угол поворота; вертикальные усилия (моменты) и поперечные силы в уровне подошвы ростверка; прочность грунта по длине сваи.

Предельная прочность дисперсного грунта ниже дна реки по длине сваи была проверена по рекомендации СП 50-102–2003 г. «Проектирование и устройство свайных фундаментов». Максимальное значение давления свай на грунт близко к предельной прочности грунта, поэтому для обеспечения надежной работы фундаментов арочного пилон проектировщики рекомендовали оставить шпунтовую стенку со стороны берегов на весь период эксплуатации моста.

Несущая способность свай в расчетах принята по несущей способности грунта основания — 15 063,93 кН. Указывается, что предельная нагрузка на голову сваи в уровне подошвы ростверка равна 9 253,0 кН, максимальная нагрузка равна 7 759,0 кН. Это значит, что прочность грунта под столбом больше прочности сечения железобетонной сваи.

Так как керн закрепленного грунта в основании сваи не отбирался, то для определения несущей способности сваи значение сопротивления известняка одноосному сжатию было взято из отчета по инженерно-геологическим изысканиям, где указывается, что прочность известняков колеблется от 5 до 36 МПа. Для расчета приняли прочность известняка 8,5 МПа. Необходимо было в

основании острия свай отобрать керн скального закрепленного грунта (как уже говорилось выше, в рамках проведения данной экспертизы) и испытать его на одноосное сжатие. Эта работа была выполнена при контрольном бурении в марте 2008 г. Прочность известняка составила 16,5 МПа.

Опоры 7, 8, 9 левобережной эстакады запроектированы на свайном фундаменте. Сваи буронабивные железобетонные диаметром 800 мм. На опорах ростверки объединяют висячие сваи: на опоре 7 — 79 свай, на опоре 8 — 24 сваи, на опоре 9 — 66 свай.

В острие свай залегают глинистые грунты — суглинки и глины от полутвердой до твердой консистенции.

Технология изготовления буронабивных свай состояла в следующем. Пробуривалась скважина диаметром 800 мм шнековым бурением без обсадной трубы. В центре бурового шнека проходит бетонолитная труба диаметром 240–325 мм, в которую после окончательного бурения и постепенного извлечения шнека из скважины непрерывно подавался бетон до полного заполнения скважины. Затем в скважину, заполненную еще не схватившимся бетоном, погружался металлический каркас. Для контроля качества бетона и сплошности бетонного столба приваривались к кольцам жесткости арматурного каркаса две металлические трубки диаметром 57 мм. Трубки, приваренные к каркасу снизу, имеют заглушки, чтобы бетон не попал в полости трубок.

На опорах 7, 8, 9 проводились штамповые испытания для определения несущей способности свай. На каждой опоре было проведено по три статических испытания штампами.

После проведения штамповых испытаний на опоре 7 установлено, что предельная несущая способность глины в основании острия свай составила 103 кПа (среднее значение, рассчитанное по результатам четырех испытаний). На опоре 9 прочность грунтов составила 50,0 кПа. По результатам штамповых испытаний пришли к выводу, что необходимо заменить сваи диаметром 1500 мм на сваи диаметром 800 мм и при этом увеличить число свай в ростверке.

Для свай такого диаметра, использованных в фундаменте, были произведены выборочные статические испытания. Нагрузку на сваю создавали при помощи гидравлического домкрата грузоподъемностью 500 тс, установленного на голове сваи и упирающегося в наддомкратную балку.

На каждой опоре проведено два статических испытания. За предельную несущую способность сваи на опоре 7 была принята нагрузка 2 535,0 кН. На опоре 9 испытывались три сваи, предельная нагрузка была установлена равной 2 787,0 кН, что и соответствует предельной несущей способности этих свай.

При испытаниях свай статической нагрузкой предельная нагрузка принималась по последней ступени нагрузки, кроме одной сваи на опоре 9. Испытания были прекращены с согласия проектной организации. Ее устраивала расчетная несущая способность свай, равная 2 000 кН, которая обеспечивала значительный запас несущей способности опоры по грунту.

Правобережная эстакада моста насчитывает 15 опор. Фундаменты опор состоят из железобетонных ростверков и забивных призматических свай сечением 35×35 см.

Опора 1 (устой) заделана в два свайных ростверка, в каждом — 49 свай.

Опоры со 2-й по 15-ю имеют также два ростверка, 36 свай в каждом. Всего под эстакаду было забито 1106 свай.

Сваи в ростверках размещены в 2 и 3 ряда, расстояние между их осями составляет 1,2 м. Сваи жестко закреплены в теле ростверка. Головы свай заходят в ростверк на 10 см с выпуском арматуры. Под ростверк укладывается слой щебенки толщиной 10 см.

На площадке строительства эстакады мостового перехода в пределах опор 7 и 8 была забита опытная свая сечением 35×35 см и длиной 14,0 м для проведения испытаний статической нагрузкой с целью определения ее несущей способности по несущей способности грунта.

Строительная площадка в месте расположения опытной сваи по данным инженерно-геологических изысканий характеризуется залеганием в поверхностном слое песков, тугопластичного суглинка и полутвердой (до твердой консистенции) глины. Опытная свая забивалась на глубину 13,6 м, в острие сваи залегали глины.

В ходе испытаний нагрузка на сваю была доведена до 2 000,0 кН, и свая получила осадку 8,7 мм. Критической нагрузки в опыте не достигли. За несущую способность сваи по грунту приняли максимально достигнутую при испытании нагрузку 2 000,0 кН.

В пределах опор 12 и 13 испытали сваю сечением 40×40 см длиной 14,0 м. Нагрузка на сваю была также доведена до 2 000,0 кН, осадка произошла на 6,2 мм.

Кроме указанных выше свай для испытаний статической нагрузкой было забито еще по четыре сваи около опор 1, 2, 4 и 10. Все сваи забивались и испытывались гидромолотом. Полученные «отказы» свай после «отдыха» более 10 дней составили от 1,5 до 5,0 мм. При этих отказах подсчитывалась несущая способность свай. Для свай сечением 35×35 см несущая способность составила 1 100,0...1 830,0 кН, для свай 40×40 см — от 1 590,0 до 1 930,0 кН.

На основании проведенных исследований проектной организацией ОАО «Метрогипротранс» для проектирования свайных фундаментов были приняты сваи сечением 35×35 см длиной 11,0 м.

При расчете свайного фундамента опор 1, 2 была принята несущая способность свай 800,0 кН. На опорах 3...15 несущая способность сваи принята 1 100,0 кН.

Расчет свайного фундамента показал, что максимальное усилие в голове свай составляет: на опорах 1...2 — 740,5 кН, а на опорах 3...15 — 867,0 кН, что примерно в два раза меньше предельной нагрузки сваи по грунту.

Проверка расчетов свайных фундаментов по первой группе предельных состояний, по результатам статических и динамических испытаний показала, что фундаменты всех 15 опор правобережной эстакады устойчивы.

На основании экспертного заключения были сделаны выводы:

1. Проектно-изыскательские работы, проведенные перед сооружением оснований и фундаментов, выполнены на достаточно хорошем уровне и в основном отвечают требованиям и рекомендациям действующих строительных норм.

2. Строительные работы по сооружению фундаментов произведены в соответствии с проектом, о чем свидетельствует исполнительная документация.

3. Несущая способность основания обеспечена с некоторым запасом. Это подтверждается контрольными исследованиями основания фундаментов в опорах арочного пилона.

4. Негативные геологические процессы, такие как суффозии, карстообразование, стабилизированы и в обозримой перспективе не будут представлять опасности.

5. Учитывая большую значимость и уникальность сооружения, необходимо продолжать мониторинг за поведением оснований и фундаментов в течение 2–3 лет специализированной организацией с последующей передачей этой функции эксплуатирующей организации. Реализация комплекса мер по осуществлению наблюдения, контроля за состоянием данного объекта позволит быстро отреагировать на появление недопустимых осадок опор, угрожающих устойчивости моста, и вовремя укрепить основание.