

УДК 624.131

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ОСНОВАНИЯ ОПОРЫ МОСТА НА СТАРОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ

Строкова Людмила Александровна¹,
sla@tpu.ru

Епифанова Екатерина Александровна¹,
epifanova@tpu.ru

Коржнева Татьяна Геннадьевна¹,
korzhneva@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность темы обусловлена необходимостью усовершенствования подходов к оценке и прогнозу деформаций сооружения, работающего в сложных природных условиях. В статье освещено изучение инженерно-геологических условий территории при реконструкции виадука. Особенности реконструкции сооружения связаны с необходимостью укрепления опор, замены пролетных строений, сложностью режима подземных вод, нарушением природного сложения грунтового массива и физико-механических свойств. Поэтому проводимая реконструкция виадука потребовала актуализации расчетных моделей для оценки напряженно-деформированного состояния грунтового основания.

Целью исследования является численная оценка напряженно-деформированного состояния системы «основание–сооружение».

Методика исследования. Исходными данными для моделирования поведения грунтового массива послужили региональные геологические материалы, а также полевые, полученные в 2011–2012 гг. В процессе работ пробурено 11 скважин, пройдено 9 шурфов, отобрано 17 монолитов и 35 проб нарушенной структуры. Выполнено рекогносцировочное обследование участка. Для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива использовался программный комплекс на базе МКЭ. Для оценки деформаций и построения точной трехмерной модели объекта наблюдения использовалась технология лазерного сканирования. Сканирование объекта проводилось лазерным 3D сканером Leica Scanstation C10, планово-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат – с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, обработка массива точек проводилась в программном комплексе Leica Cyclone 8.0, трехмерное моделирование объекта было осуществлено в программном комплексе SolidWorks.

Результаты. Детально изучены инженерно-геологические условия участка изысканий. Создана цифровая расчетная модель. Выполнено сравнение результатов моделирования с пространственно-координатным положением конструкций, установленном при лазерном сканировании. Составлен прогноз изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при реконструкции виадука.

Ключевые слова:

Грунт, лазерное сканирование, моделирование, деформации, механические свойства, метод конечных элементов.

Введение

В рамках государственной программы модернизации железнодорожной инфраструктуры с 2011 г. начались работы по реконструкции виадука на участке магистрали Абакан–Тайшет между станциями Джебь и Щетинкино в Восточном Саяне (Курагинский район Красноярского края). Идея строительства железной дороги через Саяны появилась еще в XIX в. Проектирование магистрали началось в 1930-х гг. Трасса должна была обеспечить доставку транзитных грузов из Средней Азии, Казахстана, Кузбасса в Восточную Сибирь и на Дальний Восток страны. В 1935 г. начались поиски наилучшего варианта трассы через Саяны. Исследователи прорабатывали пять линий трассы [1]. При изысканиях в ноябре 1942 г. погибла изыскательская экспедиция в составе А.М. Кошурникова (выпускника ТТИ-ТПУ 1930 г.), К.А. Стофато, А.Д. Журавлева, обследовавших наиболее перспективное – Нижнеудинское – направление. В 1948–1949 гг. была произведена аэрофотосъемка горной части местности. В 1953–1955 гг. была

завершена съемка всей трассы и проведены наземные привязочные работы на площади свыше 15 тыс. км². В 1959 г. был утвержден проект строительства трассы. Одним из самых сложных участков является перегон Джебь–Щетинкино. Расстояние между станциями Джебь и Щетинкино по прямой – 5,6 км, однако перепад высот между ними составляет 220 м. Проектировщики сумели снизить максимальный уклон до 15 ‰, придумав поистине изящное решение: для набора высоты использовали две соседние вершины, закрутив два полукольца (т. н. Джебская петля) и соединив трассу между горами Козинским виадуком. Для набора высоты длина перегона была увеличена до 14 км, заложено три тоннеля. Железная дорога Абакан–Тайшет, носящая второе название «Трасса мужества» была принята государственной комиссией в постоянную эксплуатацию 20 декабря 1965 г. На рис. 1, в центре, виден виадук, слева вверх – портал второго Джебского туннеля. Дорога уходит в тоннель, огибает гору и через виадук переходит на соседний склон.



Рис. 1. Фотография участка объекта

Fig. 1. Picture of the object site

Козинский виадук (длиной 355 м, пролетные строения опираются на бетонные опоры, высота которых достигает 65 м) после 50-летней эксплуатации выработал свой ресурс, потребовалась его модернизация. На первом ее этапе, в 2015 г., укреплены опоры виадука методом инъекций специальными смесями, они стали иметь повышенную прочность, морозостойкость и водонепроницаемость. Кроме того, опоры виадука дополнительно обернуты особым защитным материалом. Вторым этапом, в 2016 г., стала замена 9 пролётных строений виадука. Железобетонные конструкции длиной 34 м и весом 260 т демонтируют, а на их место устанавливают металлические весом 107 т, при монтаже которых используют современные композитные материалы, они вдвое легче прежних, но гораздо прочнее: их установка позволит пропускать грузовые поезда весом более 7 тыс. т [2]. Весной 2017 г. приступят к торкретированию опор моста. Опоры будут обрабатываться специальным усилом, что даст им дополнительную защиту и усилит прочность бетона.

Инженерно-геологическая характеристика района

Обобщение региональных геологических данных. В тектоническом отношении Восточно-Саянский регион отвечает области докембрийской (байкальской) складчатости. Он сложен наиболее древними архейскими и протерозойскими породами, испытавшими глубокий метаморфизм и интенсивную дислоцированность. В толще метаморфических пород в разрезах Восточного Саяна широко распространены интрузивные породы, представленные гранитами и габбро [3].

Гранитные тела мощностью от 5 до 100 м залегают в зонах тектонических разломов. Склоны мостового перехода состоят из горных пород различного литологического состава: кристаллических сланцев, мрамора, мраморизованных известняков, песчаников и алевролитов. Большую часть массива составляют кристаллические слюдяные и хлоритовые окварцованные сланцы с высокой прочностью (сопротивление сжатию достигает 80 МПа). Мраморы и мраморизованные известняки – крупнокристаллические, массивные, залегают в виде слоев мощностью до 100–250 м, также обладают повышенной прочностью и относятся к категории средней устойчивости. Песчаники представлены кремнистыми разновидностями, характеризующимися повышенной прочностью (50–80 МПа). Алевролиты и аргиллиты с известковым и глинистым цементом в верхней зоне интенсивно выветрены, на склонах образуют осыпи. Прочность их составляет 28–35 МПа. К категории совершенно неустойчивых относятся дисперсные грунты на склонах, представленные щебнем с песчано-глинистым заполнителем и глыбами.

Гидрогеологические условия региона определяются распространением трещиновато-грунтовых и трещинно-карстовых вод в кристаллических сланцах и грунтах карбонатного состава. В зонах тектонических нарушений распространены трещинно-жильные воды.

Геологические процессы. Для региона характерна относительно высокая сейсмичность, до 8–9 баллов по шкале MSK-64. Активность Главного Саянского разлома подтверждается многочисленным количеством эпицентров землетрясений

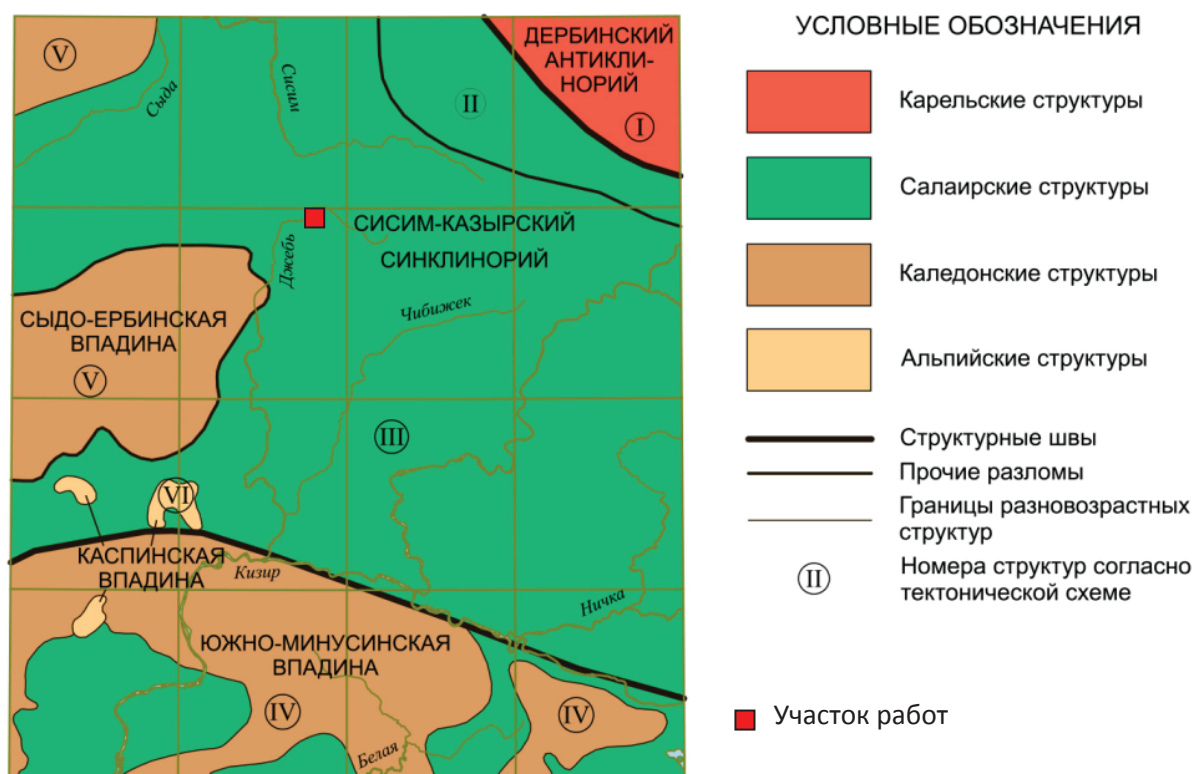


Рис. 2. Схема тектонического районирования района работ. Масштаб 1:1 000 000 [3]

Fig. 2. Scheme of tectonic zoning of the study area. Scale 1:1 000 000 [3]

интенсивностью от 5 до 7 баллов. Широкое распространение карбонатных пород обусловило развитие карстовых процессов, как древних, так и современных. Развиты поверхностные карстовые формы: воронки, поноры, котловины; и подземные формы карста: пещеры, находящиеся на стадии активного развития. Карстовые полости заполнены водой, обладают значительными статическими запасами воды. По склонам долин широко развиты обвалы, осыпи и курумы, обусловленные скоплением крупнообломочного материала на отлогих участках хребтов.

Инженерно-геологическое строение площадки. Полевые работы на объекте проводились в августе 2011 г. В процессе работ пробурено 11 скважин, пройдено 9 шурфов, отобрано 17 монолитов и 35 проб нарушенной структуры. Выполнено рекогносцировочное обследование участка [4].

Согласно инженерно-геологическим изысканиям, на участке в геологическом строении до исследованной глубины 10,0 м принимают участие сверху вниз следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ).

ИГЭ-1. Насыпной техногенный грунт, представленный загрязненным щебнем путевого балласта, осыпью выветрелых аргиллитов и алевролитов, в верхней зоне с включением почвенно-растительных остатков, глыб и песчано-глинистого заполнителя. Мощность слоя составляет от 0,5 до 3,6 м.

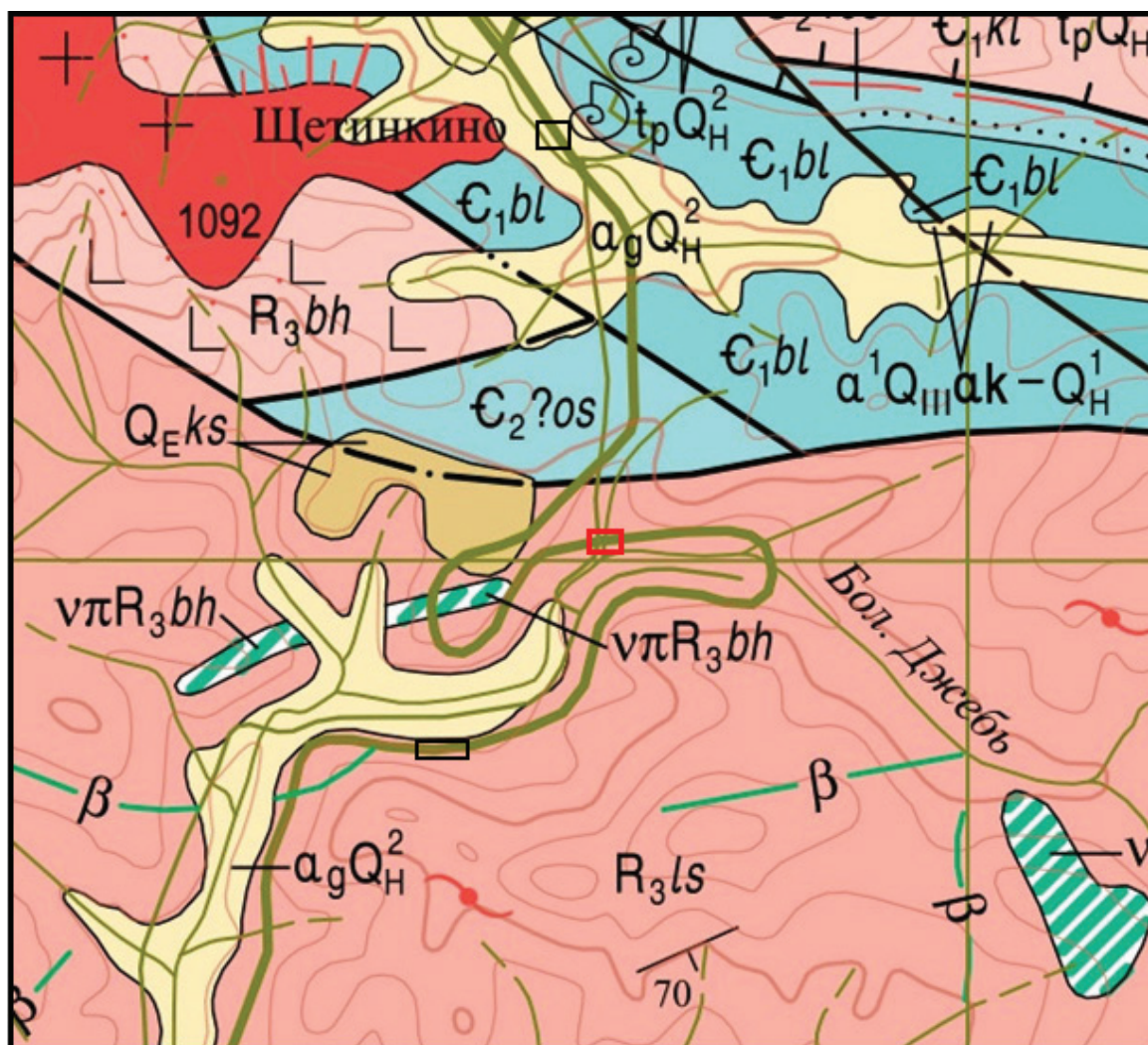
ИГЭ-2. Грунт крупнообломочный дресвяный (алевролитовая дресва). Вскрыт в верхней части долины ручья при проходке шурфа под подошвой самой деформируемой опоры. Мощность слоя изменяется от 1,6 до 3,7 м.

ИГЭ-3. Суглинок гравелистый от тугопластичной до мягкопластичной консистенции. Нормативное значение плотности грунта составляет 1,92 г/см³.

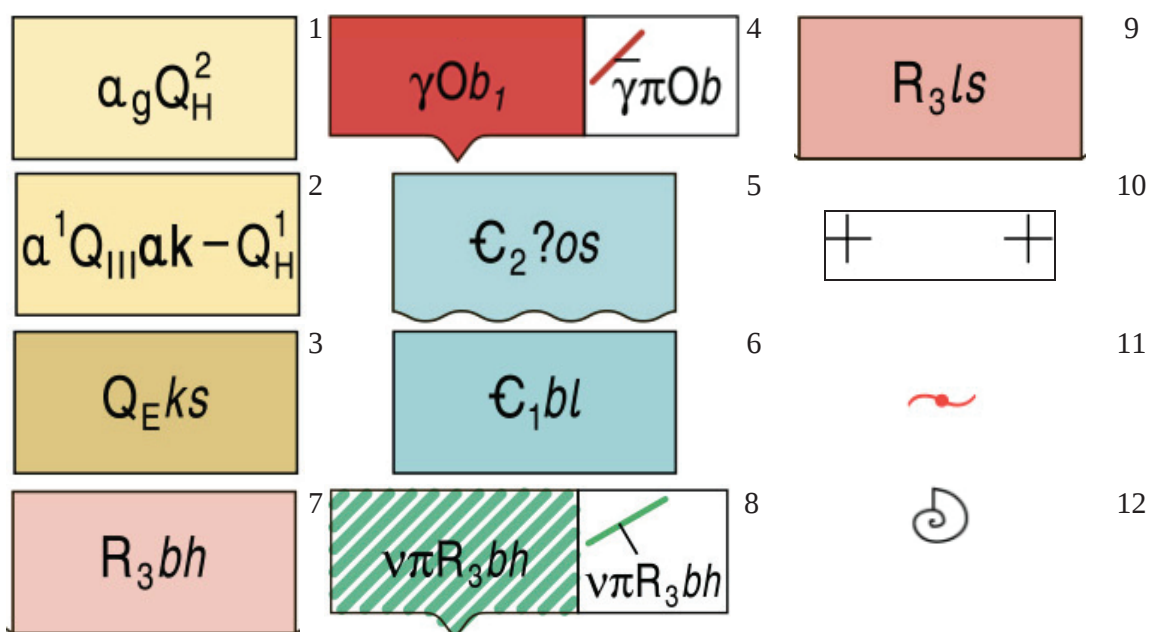
ИГЭ-4. Метаморфические и осадочные скальные грунты средней прочности, слабовыветрелые, неразмываемые, представленные крепкими кристаллическими темно-зелеными сланцами, алевролитами, реже мраморизованными известняками и песчаниками. Подошва слоя при бурении не вскрыта.

Следует отметить, что прочностные характеристики всех ИГЭ приняты по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», т. к. наличие в них крупного заполнителя не позволило произвести полный комплекс лабораторных исследований их механических характеристик [4].

Гидрогеологические условия площадки. На период проведения изысканий (середина августа 2011 г.) грунтовые воды были встречены на глубине 4,3–5,0 м (абс. отм. 643,25–643,58 м) от дневной поверхности в тальвеге. По гидравлическим признакам воды на участке обследования – ненапорные, по степени минерализации – пресные.



Участок работ



По химическому составу гидрокарбонатно-кальцевые, нейтральные.

Инженерно-геологические процессы и явления. Грунты разреза непучинистые, ненабухающие, непросадочные, незасоленные, без значительного содержания органики, реакционно-способные минералы в составе грунтов отсутствуют.

Следов эрозии склона, вывалов, осыпей не обнаружено – поверхность склона покрыта травянистой растительностью и кустарником и на момент изысканий обсыпана мощным слоем загрязненного щебеночного балласта, сброшенного с пролетных строений при производстве ремонтных работ.

Обследование конструкций фундаментов. В составе инженерно-технического обследования по определению геометрических параметров и состояния конструкций фундаментов произведены следующие работы:

- выбор и согласование с Заказчиком мест расположения горных выработок; рекогносцировочное обследование на объекте и уточнение участков вскрытия фундаментов;
- вскрытие конструкций фундаментов шурфами на запланированных участках;
- необходимые обмеры фундаментов.

По результатам обмерных работ и данных архивных материалов выполнены:

- чертежи фундаментов;
- необходимые обмерные работы по надземным конструкциям для последующей планово-высотной привязки вскрытых участков фундаментов;
- инструментальный поиск наличия армирования в теле фундаментов;

- графическая и фотографическая фиксация повреждений и дефектов обследуемых конструкций;

- определение прочности бетона на участках вскрытых конструкций фундаментов.

Исходя из условия, что обследовательские работы проводились на эксплуатируемом сооружении, инструментальное обследование конструкций фундаментов, связанное с нарушением целостности и повреждением сохраняемых обследуемых конструкций, производилось только в доступных местах и преимущественно – методами неразрушающего контроля. Железнодорожный мост десятипролетный, двухпутный, сооружен по схеме $9 \times 33 + 15,80$ м. Фактический продольный уклон моста составляет около 14 ‰. Мост расположен на прямом участке пути между двумя тоннелями и перекрывает ручей. Подходы к сооружению находятся в выемках. Опоры моста двухпутные индивидуального проектирования. Устои выполнены массивными. Промежуточные опоры имеют в надфундаментной части тонкостенчатую конструкцию из армированного бетона. Фундаменты выполнены массивные, мелкого заложения, различной конфигурации из бутобетона, армированные каркасом: сталь арматуры Ст. 3, профиль периодический по ГОСТ 5181-58, диаметр стержней 12 мм. Глубина заложения фундаментов у различных опор различна. Разница в конфигурации фундаментов и отметках их подошв, по результатам обследования и данным проекта, незначительна.

На всех вскрытых участках фундаментов следов вертикальной гидроизоляции не обнаружено.

Рис. 3. Фрагмент геологической карты района работ [3]. 1 – Голоценовые аллювиальные отложения пойм горных рек – валунно-галечниковые отложения с гравием, песком (1..12 м); 2 – Верхнечетвертичные аллювиальные отложения первой террасы – галечники, пески, суглинки (3,5..15 м); 3 – Эоплейстоценовые отложения каспийской свиты. Делювиальные и пролювиальные отложения карстовых западин, пологих склонов. Красноцветные пластичные глины, суглинки с обломками различных пород, оолитовыми стяжениями гидроокислов марганца и железа (1..30 м); 4 – Ордовикские интрузивные образования. Ольховский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс. Граниты; 5 – Среднекембрийские вулканогенно-осадочные образования осиновской свиты. Конгломераты, туфо-конгломераты, туфы, туфопесчаники, реже андезиты, дациты, песчаники (менее 1800 м); 6 – Нижнекембрийские отложения балахтинской свиты. Известняки рифогенные, песчаники, сланцы известково-глинистые, конгломераты (менее 700 м); 7 – Позднерифейский Бахтинский вулканический комплекс. Бахтинская свита. Лавы и лавобрекчии базальтов, их туфы, прослои известняков (более 1800 м); 8 – Бахтинский вулканический комплекс. Субвулканические образования. Силлы, дайки, габбро-порфириты; 9 – Позднерифейский вулканический комплекс. Лысанская свита. Сланцы серицит-хлоритовые, углеродисто-кремнистые, потоки базальтов, их туфы, прослои и линзы мраморов (менее 2500 м); 10 – Граниты; 11 – Зеленосланцевая фация регионального метаморфизма; 12 – Места находок ископаемых остатков морских беспозвоночных

Fig. 3 Fragment of the geological map of the study area [3]. 1 – Holocene alluvial deposits of mountain river floodplains – boulder-pebbly sediments with gravel, sand (1..12 m); 2 – Upper Quaternary alluvial deposits of the first terrace – gravel, sands, clay (3,5..15 m); 3 – Eopleistocene deposits of kaspinskaya suite. Diluvial and proluvial deposits of karst potholes, smooth slopes. Red ball clays, clays with debris of different rocks, oolitic contractions of hydrogen oxides of manganese and iron (1..30 m); 4 – Ordovician intrusive formations. Olkhovsky gabbro-diorite-granodiorite complex. Granites; 5 – Middle Cambrian volcanic-sedimentary formations of osinovskaya suite. Conglomerates, tuff-conglomerates, tufa, sand tuff, andesites more seldom, dacite, sandstones (less than 1800 m); 6 – Low Cambrian deposits of balakhtinsonskaya suite. Reefogenic limestones, sandstones, calcareo-argillaceous slates, conglomerates (less than 700 m); 7 – Late-Riphean Bakhtinsky volcanic complex. Bakhtinskaya suite. Lava and lava-breccia of basalts, their tufa, limestones layers (more than 1800 m); 8 – Bakhtinsky volcanic complex. Subvolcanic formations. Sills, dikes, gabbro-porphyrates; 9 – Late-Riphean volcanic complex. Lysanskaya suite. Sercite-chloritic, carbon-silicate slates, basalt flows, their tufa, marble layers and lens (less than 2500 m); 10 – Granites; 11 – greenschist facies of regional metamorphism; 12 – Areas of findings of fossils of marine invertebrates

В процессе обследования вскрытых участков фундаментов опасных трещин, вывалов бетона и других серьезных повреждений в конструкциях фундаментов, влияющих на их несущую способность, не обнаружено. Общее состояние фундаментов, по результатам обследования вскрытых участков, признано работоспособным.

Прочность бетонов конструкций фундаментов определялась методом неразрушающего контроля прибором ОНИКС-2.5. По результатам замеров класс бетона по прочности на сжатие вскрытых участков фундаментов составляет не менее В12,5. Поиск арматуры в конструкциях фундаментов производился методом неразрушающего контроля прибором ПОИСК-2.5 [4].

Лазерное сканирование объекта

Современные требования нормативных документов к проектированию ответственных сооружений предполагают наблюдение за его состоянием на протяжении всего жизненного цикла от проектирования до закрытия. При осуществлении такого наблюдения проверяется верность размеров, допусков, установленных проектом, соответствие выполненных работ положениям СНиП и стандартизированным документам проекта производства работ, замеры собранных строительных элементов и определение достоверности реальных и допускаемых предельных положений, фиксируются различные наружные дефекты и повреждения, возможность производства дальнейших работ по необходимой технологической последовательности.

Одним из методов такого контроля является определение деформаций зданий и сооружений согласно ГОСТ 24846-2012. Использование традиционных геодезических приборов, таких как нивелиры, теодолиты и фототеодолиты, требует огромного количества измерений и времени для этих измерений. Особые проблемы возникают при наблюдениях таких объектов, как мосты, путепроводы, эстакады, надземные коммуникации, и других объектов, имеющих сложные сплайновые поверхности. Построение трехмерных моделей традиционными методами сбора информации в большинстве случаев просто невозможно. С помощью наземного лазерного сканирования (НЛС) поставленные задачи решаются безошибочно, так как все данные

съемки находятся в одном трехмерном координатном поле. Корректность построения частных элементов модели и достоверность их взаимного расположения определяются точностью сканирующей системы. Лазерное сканирование фиксирует абсолютно все детали рельефа, находящиеся в пределах планируемой съемки, и в процессе камеральной обработки позволяет уточнять реальное положение того или иного элемента [5–15].

Данный вид съемки полностью является трехмерным отображением реального положения объекта в момент осуществления съемочных работ, что разрешает выполнять следующие прикладные задачи:

- определение большинства геометрических характеристик технологических элементов и конструкций (расстояний, размеров, высот, объемов и т. п.);
- выполнение профилей, разрезов, сечений;
- выполнение различных планов объекта;
- выполнение проектно-изыскательских работ;
- мониторинг технологического оборудования и состояния объектов;
- анализ и прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций.

Цифровая модель выгодна для эксплуатации объекта, а 3D-графика в сравнении с двухмерными чертежами обладает несомненно большей визуализацией и информативностью, что может позволить применять ее в ходе геотехнического мониторинга для прогноза незапланированных ситуаций.

Параметры сканирования задаются вручную. Например, для частой застройки с высокой плотностью существующей наземной инфраструктуры самыми оптимальными настройками сканирования будут такие: 1 точка на 0,5 см² на расстоянии 50 м от сканера. Избыточный объем данных лазерного сканирования позволяет получить максимально полную информацию, исключив ошибки при полевых измерениях. Данные измерений объекта составляют от десятков тысяч до нескольких сот миллионов точек. Полученные данные лазерного сканирования конвертируются в программы для проектирования и ГИС (например, в AutoCad). Интеграция фотокамеры и лазерного сканера в одном устройстве выполняет автоматическую фотофиксацию объекта в процессе работы.

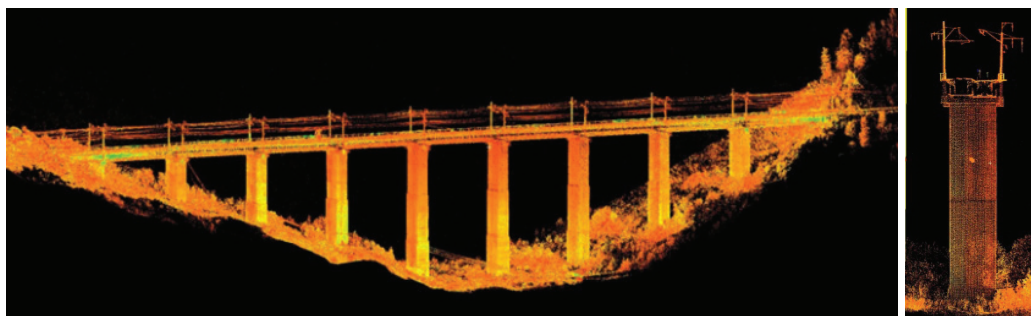


Рис. 4. Исходные данные в виде облака точек

Fig. 4. Original data in the form of a point cloud

Важным преимуществом совместного использования лазерного сканирования с программами для проектирования и ГИС является вариативность обработки результата сканирования – облака точек. В зависимости от способа обработки облака точек решаются следующие задачи:

- получение трехмерной модели объекта, чертежей, разрезов, сечений;
- выявление дефектов конструкций при сравнении облака точек с проектной моделью;
- оценка и определение деформаций при сравнении с предыдущими измерениями;
- создание топографических планов.

Точность получаемой информации составляет ~10 мм.

«Центром лазерных технологий» при кафедре ЛИСТ ИФВТ ТПУ был проведен комплекс работ по съемке моста в 2012 г. Цель работы – получение массива данных, создание комплекса обмерочных чертежей, фиксация крупных дефектов (трещин, смещений, разрушений, повреждений) несущих и ограждающих конструкций, разработка твердотельной трехмерной модели виадука [16]. Наземное лазерное сканирование объекта проводилось Leica Scanstation C10 в светлое время суток и заняло 2 рабочих дня. Съемка проводилась методом тахеометрического хода в два этапа: под мостом по несколько станций на каждый пролет и по мосту. Всего было создано 33 точки установки сканера. На каждой станции измерения выполнялись в течение 5–7 минут.

Перед началом съемки было произведено планово-высотное обоснование и привязка пунктов обоснования к местной системе координат с использованием электронного тахеометра LEICA TS15 и GNSS приемника LEICA GS10, а также определены на местности наиболее оптимальные места для станций сканера, чтобы конечное облако точек содержало наиболее полную информацию обо всех конструктивах моста.

Результатом наземного лазерного сканирования является массив точек (рис. 4), где каждая точка имеет координаты положения в пространстве и интенсивность.

Камеральная обработка результатов сканирования заняла 1 неделю и состояла из следующих этапов:

1. Уравнивание в системе координат, определение оценки точности измерений и сшивка в единое облако точек данных, полученных в результате сканирования с каждой станции. Обработка массива точек от «шумов» и элементов, не несущих в себе сведений об объекте, в программном комплексе Leica Cyclone 8.0. Общий объем начальной информации, полученной по данным лазерно-сканирующей съемки, составлял облако в 500 млн точек, после удаления лишней информации размер общего скана сократился до 400 млн точек. Среднеквадратическая погрешность «сшивки» всех полученных «облаков точек» в единую систему координат составила 4 мм.
2. Детальное трехмерное моделирование объекта в программном комплексе SolidWorks, формирование информационной базы элементов объекта. Каждый элемент: колонны, опоры, пролеты, ограждение и т. д., строился методом точного встраивания в облако точек, благодаря чему были получены точные твердотельные копии реальных объектов. Однако, ввиду того, что лазерный сканер не может производить съемку объектов, которые скрыты за препятствиями, некоторая часть внутренних конструкций моста была построена по проектным документам. Построенные элементы собирались в общую сборку с жесткой привязкой элементов друг к другу в соответствии с реальным их положением друг относительно друга.

В результате полученная трехмерная твердотельная модель (рис. 5) является точной копией сооружения [16].

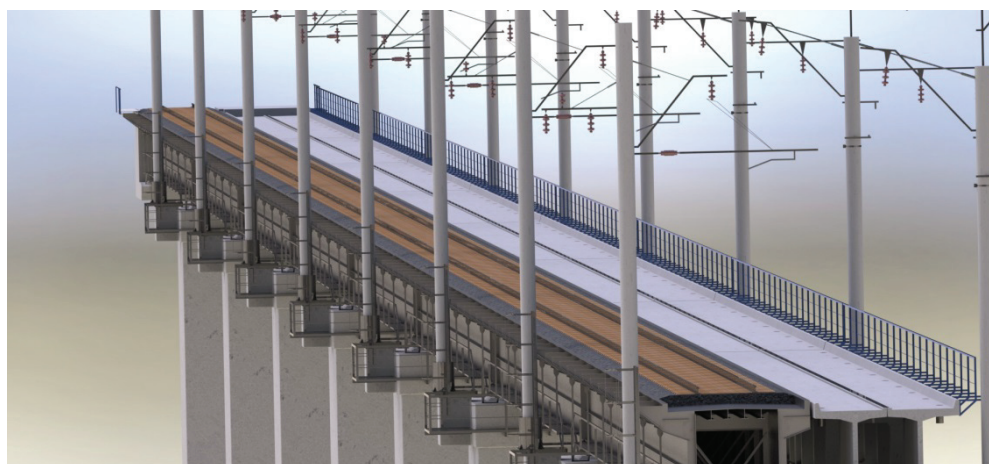


Рис. 5. Трехмерная модель моста

Fig. 5. Three-dimensional model of the bridge

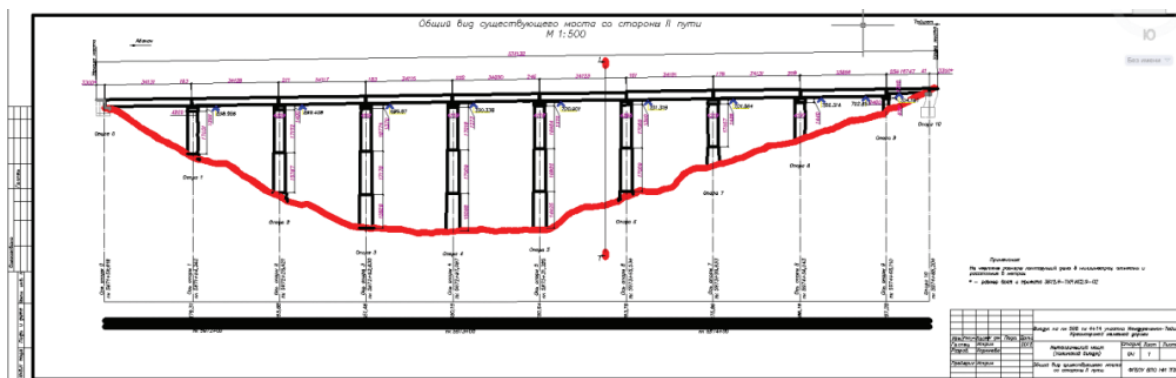


Рис. 6. Обмерочный чертеж модели

Fig. 6. Model working drawing

- Высокая точность модели (5–10 мм) позволяет:
- произвести замер геометрических параметров любого элемента в модели и сделать разрез или сечение в любом месте;
 - построить в автоматическом режиме двумерный чертеж любого элемента, либо части модели, либо модели в целом;
 - произвести анализ текущего состояния сооружения, а также прочностной расчет в специализированных программах;
 - создать информационную систему конструкций с необходимыми чертежами и спецификацией, выявить отклонения от проектной документации;
 - нарушения и анализ опор на вертикальность.

На основе трехмерной модели в автоматическом режиме построены обмерочные чертежи моста (рис. 6) с нанесением размеров и дефектов конструкций [16]. На основе результатов сканирования построен также топографический план участка 500 масштаба.

Значительные отклонения от проектного положения наблюдаются у одной опоры сооружения,

для которой нами выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов в декабре 2016 г.

Анализ напряженно-деформированного состояния грунтового массива методом конечных элементов

В данном исследовании использован программный комплекс PLAXIS (2006). PLAXIS – комплекс, разработанный нидерландскими геотехниками de Borst, Vermeer (1984), успешно показал себя при решении многих геотехнических задач [17].

Грунтовой массив длиной 40 м, высотой 23 м представлен в виде 2D-модели на рис. 7.

После построения геометрической модели и задания свойств грунта PLAXIS автоматически сгенерирована сетка конечных элементов (рис. 8) из 5407 неправильных треугольных 15-узловых элементов. При расчете конечного элемента смещения рассчитываются по узлам, напряжения – в 943 интегральных точках Гаусса (или точках напряжения).

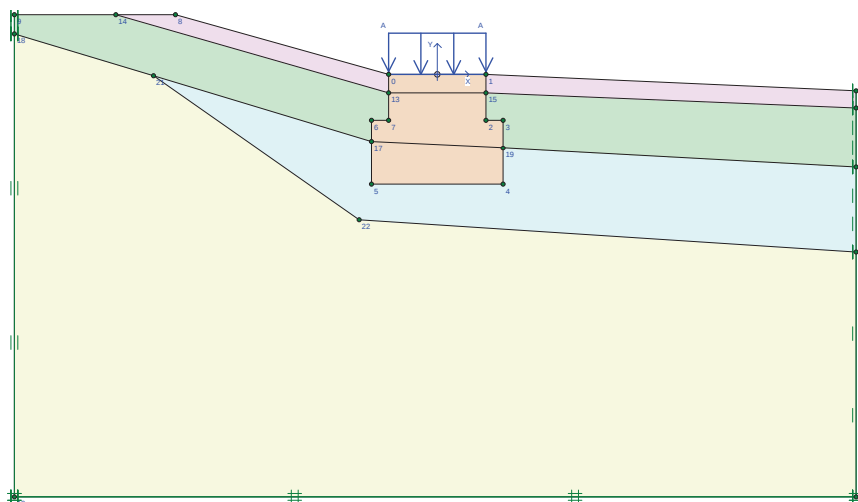


Рис. 7. Геометрическая модель грунтового массива

Fig. 7. Geometry model of the site

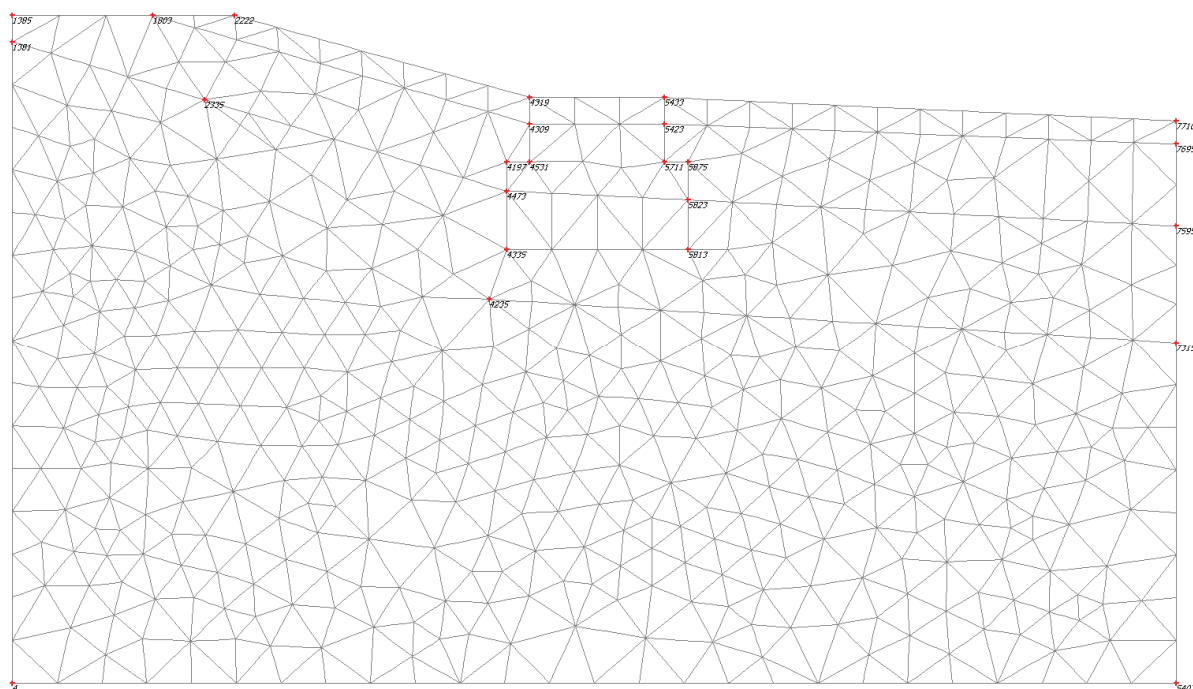


Рис. 8. Сетка конечных элементов с базовыми узлами

Fig. 8. Mesh of finite elements with significant nodes

Вертикальная нагрузка от веса опоры до обреза фундамента, веса пролетных строений, подвижного состава задана опцией *Distributed loads A* – до ремонта принята 200 кН/м/м, а после замены пролетных строений на более легкие и усиления опор принята, равной 100 кН/м/м.

Для материала фундамента опоры использовалась упругая модель (Plaxis). Были использованы

следующие параметры: удельный вес 25 кН/м³, коэффициент Пуассона 0,25. Для оценки поведения грунта использована *упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model* (Plaxis). Модель учитывает несовпадение модуля упругости ветвей разгрузки и повторного нагружения, наблюдаемое при лабораторных испытаниях. Модель точно описывает поведение

Таблица 1. Параметры грунтов

Table 1. Soil data sets parameters

Параметры/наименование грунта Parameters/name of soil		Щебень Ballast	Древесный грунт Gravel	Гравелистые суглинки Gravelly loam	Кристалличе- ские сланцы Shale
γ_{unsat}	[кН/м ³] Удельный вес грунта Soil unit weight above phreatic level	19,00	23,00	19,00	25,00
γ_{sat}	[кН/м ³] Удельный вес водонасыщенного грунта Soil unit weight below phreatic level	21,00	24,00	21,00	26,00
$E_{50}^{\text{ref}} = E_{\text{red}}^{\text{ref}}$	[кН/м ²] Модуль Юнга при первичном нагружении Young' modulus	100000	80000	60000	200000
power (m)	[–] Показатель степени компрессионной кривой Power for stress-level dependency of stiffness	0,5	0,3	0,5	0,5
c_{ref}	[кН/м ²] Сцепление Cohesion	10	10	5	5
φ	[°] Угол внутреннего трения Angle of internal friction	45	42	32	30
ψ	[°] Угол дилатансии Dilatancy angle	5	5	0	0
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	[кН/м ²] Модуль Юнга при разгрузке – повторном нагружении Unloading/reloading stiffness	200000	160000	120000	500000
$\nu_{\text{ur}}^{(\text{nu})}$	[–] Коэффициент Пуассона Poissons's ratio	0,2			

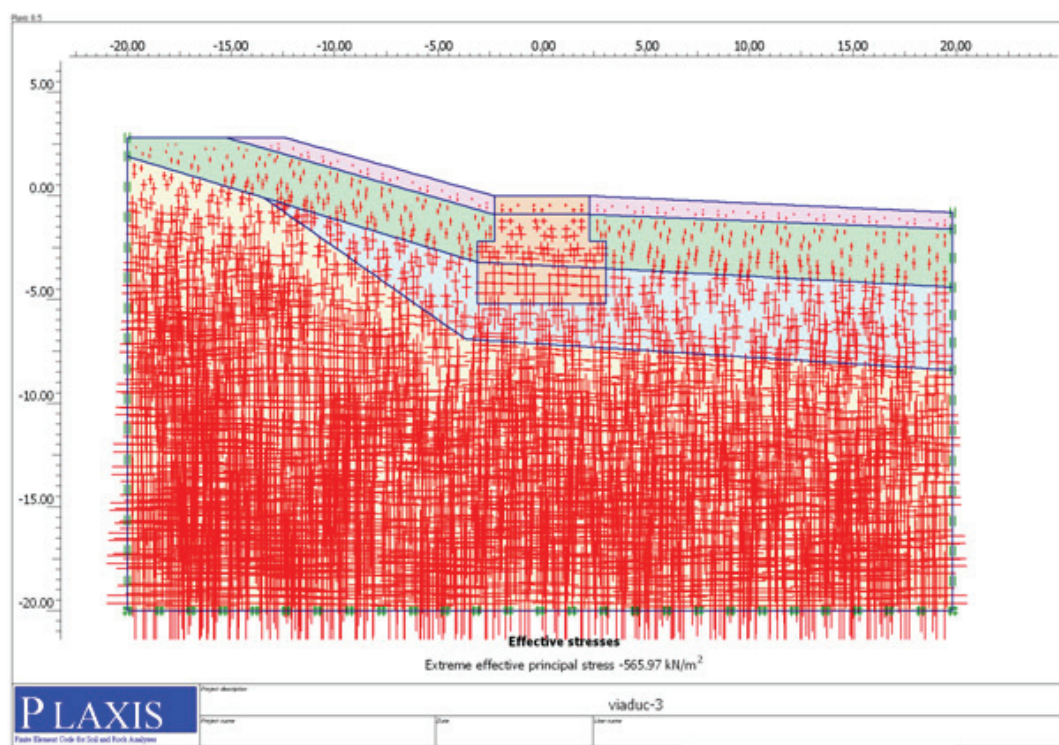


Рис. 9. Поле начальных эффективных напряжений в грунтовом массиве

Fig. 9. Initial stress field in the geometry around the footing

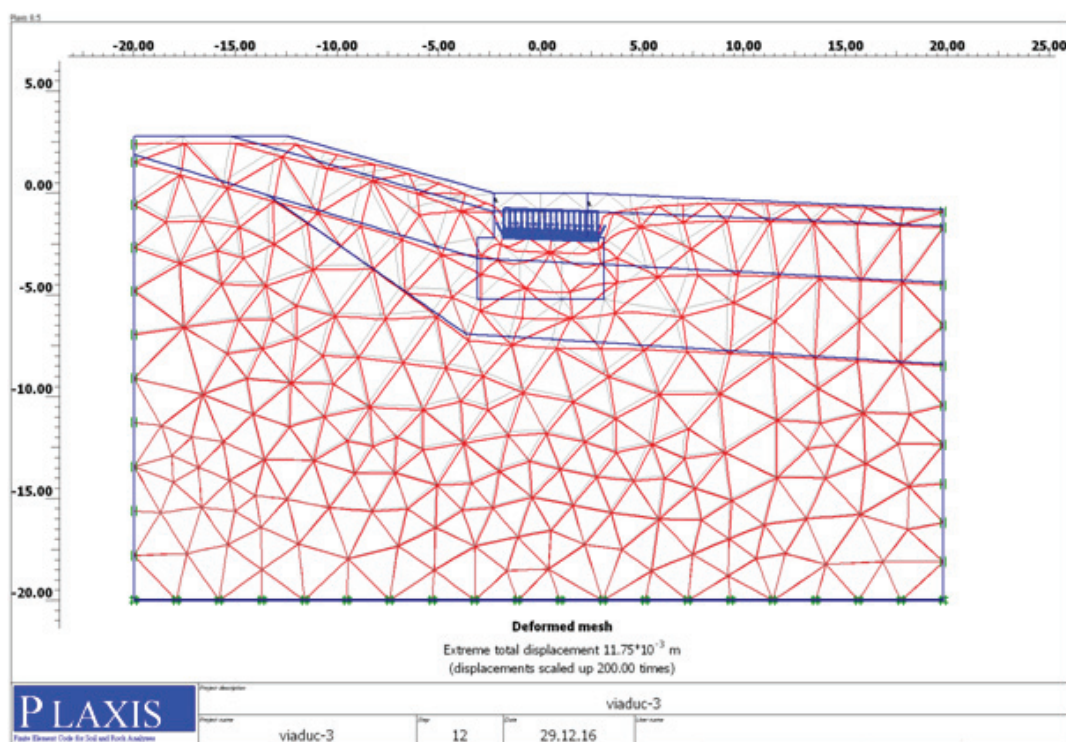


Рис. 10. Деформированная сетка в ходе эксплуатации объекта

Fig. 10. Deformed mesh after loading

грунта при экскавации, при устройстве подпорных стен и проходке туннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения

и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу. Ограничения модели: неспособность учесть явления анизотропии прочности и жестко-

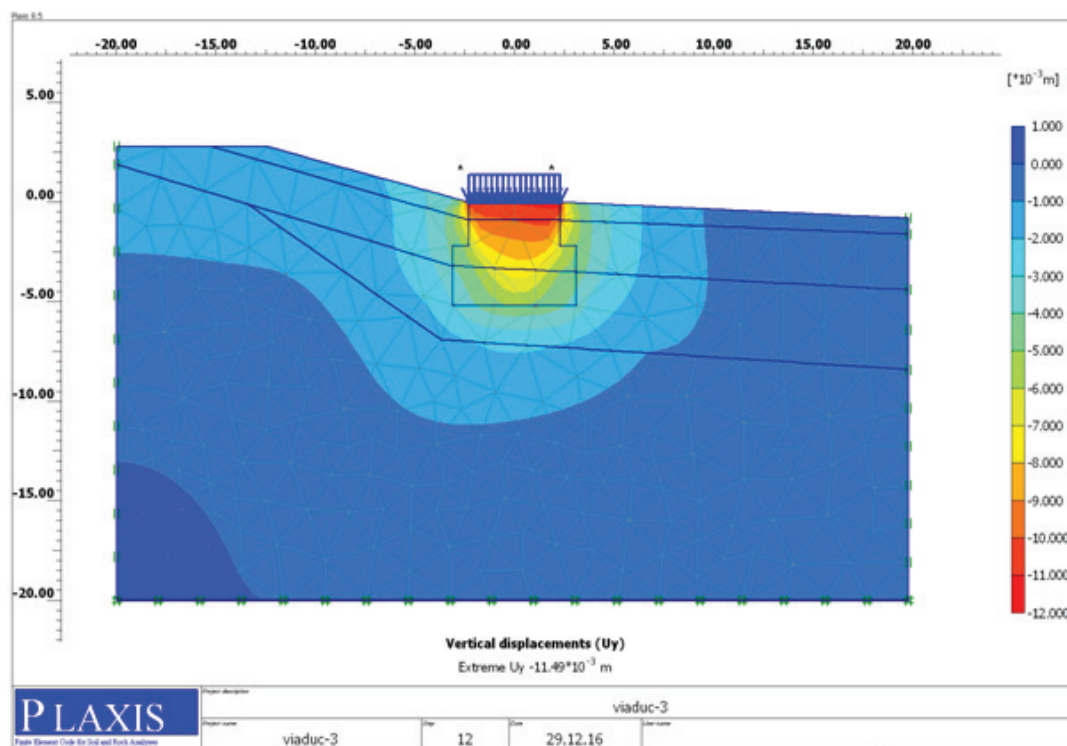


Рис. 11. Вертикальные перемещения грунтового основания при эксплуатации объекта

Fig. 11. Vertical displacements of the site after loading

сти, ползучести и длительной прочности, непригодность для моделирования динамических процессов [17]. Для задания модели необходимо 10 параметров грунтов, приведенных в табл. 1.

При задании начальных условий сгенерировано давление воды и начальные напряжения (рис. 9).

Расчеты заключались в определении вертикальных перемещений грунтового основания от массы надфундаментной части. Моделирование процесса нагружения опоры осуществлялось с помощью опции расчета *Staged construction*. Эта опция позволяет активировать или деактивировать вес, жесткость и прочность выбранных компонентов конечноэлементной модели.

В основной модели определены два расчетных этапа, на первом этапе с нагрузкой 200, на второй – 100 кН/м/м. В восьми клонках от основной модели выполнено изменение прочности материала фундамента от 16 до 80 МПа. Ниже представлены некоторые примеры выходных данных расчета, деформированная сетка конечных элементов модели (рис. 10) и вертикальные перемещения грунтового массива (рис. 11) на разных этапах.

Результаты исследований и их обсуждение

Моделирование проводилось с целью оценки изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива в ходе эксплуатации сооружения и прогноза его изменения при реконструкции виадука. Так как в ходе полевых работ установлено, что прочность бетонобетона конструкций фундаментов составляет 16–24 МПа, поэтому она была выбрана основным параметром для варьирования (табл. 3) в расчетах.

Проверка результатов моделирования проводилась путем сравнения расчетных данных с пространственно-координатным положением конструкций, установленным при лазерном сканировании (рис. 12). Значения вертикальных перемещений, предсказанные в ходе упруго-пластического моделирования показывают небольшое отклонение от данных полевых работ. Тот факт, что реальное значение меньше расчетного, можно объяснить переуплотнением грунтового массива в ходе его формирования. Как было установлено в работах [18–22], степень переуплотнения грунтовых массивов (K_0 -OCR) необходимо учитывать при проектировании грунтовых оснований. Для предвари-

Таблица 2. Результаты моделирования

Table 2. Results of simulation

Прочность бетона, МПа Stiffness modulus of concrete, mPa	Факт/Measured	Расчетные значения/FE predictions								
	16,4	16,4	18,4	19,3	20,6	21,7	24	24,4	50	80
Вертикальные перемещения, мм Vertical displacement, mm	43	48,6	44,2	42,4	40,4	38,6	35,8	35,3	22,1	16,3

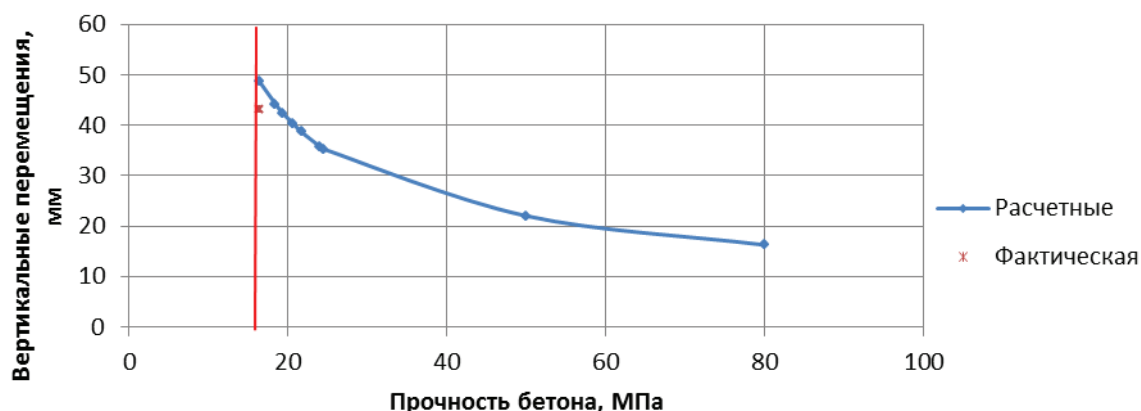


Рис. 12. Сравнение измеренных и расчетных значений вертикальных перемещений

Fig. 12. Comparison of measured vertical displacement with FE predictions

тельной оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива допустимо использовать эмпирические формулы определения K_0 , для стадии рабочей документации следует выполнять специальные лабораторные и полевые исследования.

Кроме того, учитывая факт трудности определения основных параметров механических свойств крупнообломочных грунтов и вынужденного их назначения по литературным данным, этот прогноз можно считать приемлемым для предварительных проектных решений.

Выводы

На основании обобщения региональных геологических данных и анализа результатов камеральной обработки материалов полевых и лабораторных исследований, можно сделать вывод, что участок работ относится к III (сложной) категории сложности инженерно-геологических условий.

Применение наземных лазерно-сканирующих систем дало возможность произвести тотальную

съемку объекта и окружающего рельефа с высокой степенью плотности съёмочных точек, построены векторные обмерные чертежи, разрезы путем преобразования трехмерной модели в двумерные чертежи, создан топографический план 500 масштаба моста и прилегающей территории, выявлены отклонения конструкций от проектного положения.

Разработана цифровая модель грунтового основания самой деформируемой опоры сооружения. Поведение грунтового массива смоделировано с помощью упруго-пластической модели с изотропным упрочнением *PLAXIS Hardening Soil*. Рассчитаны деформации грунтового основания от массы опоры. Обеспечение достаточной точности расчетов связано с необходимостью проведения полноценных лабораторных и полевых исследований для определения механических свойств грунтов. Показано преимущество комплексирования методов по оценке геометрии объекта и МКЭ для описания напряженно-деформированного состояния объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ценюга И.Н. «Трасса мужества» (Строительство трассы Абакан–Тайшет) // Железнодорожник: история российских железных дорог. – 2010–2014. URL: zhelznodorozhnik.spb/istoricheskaja_spravka/trassa_muzhestva.html (дата обращения 02.04.2017).
2. Пасечник Е. Половина пути пройдена // Гудок. – 2015. – № 187 (26089). – С. 3.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Изд. второе. Минусинская серия. Масштаб 1:200000. – ОАО «Красноярскгеолсъемка», 2007. – С. 1.
4. Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях грунтов основания моста на 598 км по объекту «Комплексное развитие участка Междуреченск–Тайшет Красноярской железной дороги. Строительство вторых путей на перегоне Джебь–Щетинкино» / НИЛ «Геология, основания, фундаменты и земляное полотно» СГУПС. – Новосибирск, 2011. – 25 с.
5. Пусков В.И., Караулов А.М., Королев К.В. Основания и фундаменты мостовых опор. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2016. – 66 с.
6. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys / D.D. Lichti, J. Franke, W. Cannel, K.D. Wheeler // J. Spat. Sci. – 2005. – V. 50. – № 1. – С. 75–89.
7. Рыльский И.А., Малеванная М.С. Наземные лазерные методы – новые подходы к информационному обеспечению географических исследований // Геодезия и картография. – 2014. – № 8. – С. 38–48.
8. Селезнева Е.В. Применение лазерного сканирования в геоморфологических исследованиях // Вестн. МГУ. Сер. 5. – 2013. – № 2. – С. 47–53.
9. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: A case study from the Lake District, England / M. Gallay, Ch.D. Lloyd, J. McKinley, L. Barry // Comput. and Geosci. – 2013. – V. 51. – P. 216–227.
10. Geotechnical properties of gully in Tomsk Oblast / A.V. Leonova, K.M. Lomakina, S.A. Dmitrieva, A.V. Baranova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
11. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process develop-

- ment in urban areas (the case of Kemerovo-city) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.
12. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27. – 6 p.
13. Комиссаров А.В., Широкова Т.А., Комиссаров Д.В. Общий подход к изучению погрешностей наземной лазерной съемки, вызванных метрологическими свойствами объектов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
14. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures / H. Yang, M. Omidalizarandi, X. Xu, I. Ingo Neumann // Composite Structures. – 2016. – P. 93–105.
15. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring / R. Vezocnik, T. Ambrožič, O. Sterle, G. Bilban, N. Pfeifer, B. Stopar // Sensors. – 2009. – № 9. – P. 9873–9895.
16. Применение наземного лазерного сканирования и трехмерного информационного моделирования для неразрушающего контроля / А.Н. Яковлев, Е.В. Токмаков, О.В. Павлов, В.Г. Ли, А.Н. Искрин, Т.Г. Коржнева // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 12. – Ч. 2. – С. 72–75.
17. Plaxis. Material Models Manual. – 2016. – 216 p.
18. Knudsen B.S. Comparison of 2D and 3D FEM Calculations, Strengthening of the Little Belt Bridge of 1935 in Denmark // Proc. 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference, Barcelona 2–5 September 2014 / Eds. M. Arroyo, A. Gens. – Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2014. – P. 77–80.
19. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia) / L.A. Strokova, E.M. Dutova, A.V. Ermolaeva, I.N. Alimova, A.B. Strelnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27. – 6 p.
20. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
21. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting in Land Subsidence while Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p.
22. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 33. – 6 p.

Поступила 05.04.2017 г.

Информация об авторах

Строкова Л.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Епифанова Е.А., аспирант кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Коржнева Т.Г., ассистент кафедры лазерной и световой техники Института физики высокой технологии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

NUMERICAL ANALYSIS OF BRIDGE FOUNDATION BEHAVIOUR ON THE OLD RAILWAY LINE

Lyudmila A. Strokova¹,

sla@tpu.ru

Ekaterina A. Epifanova¹,

epifanova@tpu.ru

Tatiana G. Korzhneva¹,

korzhneva@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The topic is relevant due to the necessity to improve approaches to estimation and prediction of deformations of structures operating in harsh natural conditions. The article deals with the study of engineering-geological conditions of the area during reconstruction of the viaduct. It is necessary to introduce new technologies, such as laser scanning technology for constructing the accurate three-dimensional model of the object, finite element method for prediction of soil behaviour.

The aim of the study is to prove the effectiveness of the method of terrestrial laser scanning over traditional tacheometry.

Research methodology. The initial data for simulating the behaviour of the soil massif were obtained through regional geological works and field study in 2011–2012. In the course of the work 11 wells were drilled, 9 holes were trenched, more than 50 samples were selected. A reconnaissance survey of the site was completed. A program complex on the basis of FEM is used to forecast the stress-strain state of soil massif. Laser scanning technology is used for evaluating deformations and construction of accurate three-dimensional model of the object. The terrestrial laser scanning of the object was held by 3D laser scanner Leica Scanstation C10; horizontal, vertical justification and binding study points to a local coordinate system were carried out using Total Station LEICA TS15 and GNSS receiver LEICA GS10; handling cloud of points was held in the software package Leica Cyclone 8.0; three-dimensional object modeling was carried out in the software package SolidWorks.

The results. Engineering geological conditions of the research site are studied in detail. A digital design model is developed. The forecast of stress-strain state of the soil massif in reconstruction of the viaduct is made.

Key words:

Soil, laser scanning, modeling, deformation, mechanical behavior, finite element method.

REFERENCES

1. Tsenyuga I.N. «Trassa muzhestva» (stroitelstvo trassy Abakan–Tayshet) [Trail of courage (construction of the railway Abakan–Tayshet)]. Available at: железнодорожник.рф/istoricheskaja_spravka/trassa_muzhestva.html (accessed 2 April 2017).
2. Pasechnik E. Polovina puti proydna [Half of the way is passed]. *Gudok*, 2015, no. 187 (26089), p. 3.
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Minusinskaya seriya. Masshtab 1:200000 [State geological map of the Russian Federation. Minusinsk series. Scale 1:200000]. OAO «Krasnojarskgeolsemka», 2007. p. 1.
4. Tehnicheskij otchet ob inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh gruntov osnovaniya po obektu. Kompleksnoe razvitiye uchastka Mezhdurechensk–Tayshet Krasnoyarskoy zheleznoy dorogi. Stroitelstvo vtoroykh putey na peregone Dzheb–Shchetinkino [Technical report on geological engineering survey of soil foundation of bridge. The project «Integrated development of the plot Mezhdurechensk–Tayshet section of the Krasnoyarsk railway. The construction of the second track on the stretch Dzheb–Shchetinkino»]. NIL «Geologiya, osnovaniya, fundamenty i zemlyanoe polotno» [Geology, foundation and subgrade]. Novosibirsk, 2011. 25 p.
5. Puskov V.I., Karaulov A.M., Korolev V.K. Osnovaniya i fundamente mostovykh opor [Foundations of bridge piers]. Novosibirsk, SGUPS Publ. house, 2016. 66 p.
6. Lichti D.D., Franke J., Cannel W., Wheeler K.D. The potential of terrestrial laser scanners for digital ground surveys. *J. Spat. Sci.*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 75–89.
7. Rylsky I.A., Malevannaya M.S. Nazemnye lazernye metody – novye podkhody k informatsionnomu obespecheniyu geograficheskikh issledovaniy [Terrestrial laser methods are the new approaches to information support of geographical research]. *Geodeziya i kartografiya*, 2014, vol. 8, pp. 38–48.
8. Selezneva E.V. Primenenie lazernogo skanirovaniya v geomorfologicheskikh issledovaniyakh [Application of laser scanning in geomorphologic studies]. *MSU Vestnik. Series 5*, 2013, vol. 2, pp. 47–53.
9. Gallay M., Lloyd Ch.D., McKinley J., Barry L. Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: a case study from the Lake District, England. *Comput. and Geosci.*, 2013, vol. 51, pp. 216–227.
10. Leonova A.V., Lomakina K.M., Dmitrieva S.A., Baranova A.V. Geotechnical properties of gully in Tomsk Oblast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 012037.
11. Leonova A.V., Khabibullin R.R., Baranova A.V. Geotechnical conditions contributing to negative geological process development in urban areas (the case of Kemerovo-city). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 012043.
12. Brakorenko N.N. Impact of oil on groundwater chemical composition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 6 p.
13. Komissarov A.V., Shirokova T.A., Komissarov D.V. Obshchy podkhod k izucheniyu pogreshnostey nazemnoy lazernoy semki, vyzvannykh metrologicheskimi svoystvami obektov [General approach to the study of errors of terrestrial laser shooting caused by metrological properties of objects]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka*, 2013, no. 1, pp. 36–42.
14. Yang H., Omidiazarandi M., Xu X., Ingo Neumann I. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures. *Composite Structures*, 2016, vol. 149, pp. 93–105.

15. Vezočnik R., Ambrožič T., Sterle O., Bilban G., Pfeifer N., Stopar B. Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, 2009, no. 9, pp. 9873–9895.
16. Yakovlev A.N., Tokmakov E.V., Pavlov O.V., Li V.G., Iskrin A.N., Korzhneva T.G. Primenenie nazemnogo lazernogo skanirovaniya i trekhmernogo informatsionnogo modelirovaniya dlya nerazrushayushchego kontrolya [Application of terrestrial laser scanning and three-dimensional information modeling for non-destructive testing]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12 (2), pp. 72–75.
17. *Plaxis. Material Models Manual*. 2016. 216 p.
18. Knudsen B.S. Comparison of 2D and 3D FEM Calculations, Strengthening of the Little Belt Bridge of 1935 in Denmark. *Proc. 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference*. Barcelona 2–5 September 2014. pp.77–80
19. Strokova L.A., Dutova E.M., Ermolaeva A.V., Alimova I.N., Strelnikova A.B. Karst hazard assessment in the design of the main gas pipeline (South Yakutia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, 6 p.
20. Strokova L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
21. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting in Land Subsidence while Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p.
22. Purgina D.V., Strokova L.A., Kuzevanov K.I. Modeling of changing hydrogeological conditions during construction of pier foundations on the Kama river bank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, 6 p.

Received: 5 April 2017.

Information about the authors

Lyudmila A. Strokova, Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University.

Ekaterina A. Epifanova, postgraduate student National Research Tomsk Polytechnic University.

Tatiana G. Korzhneva, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.