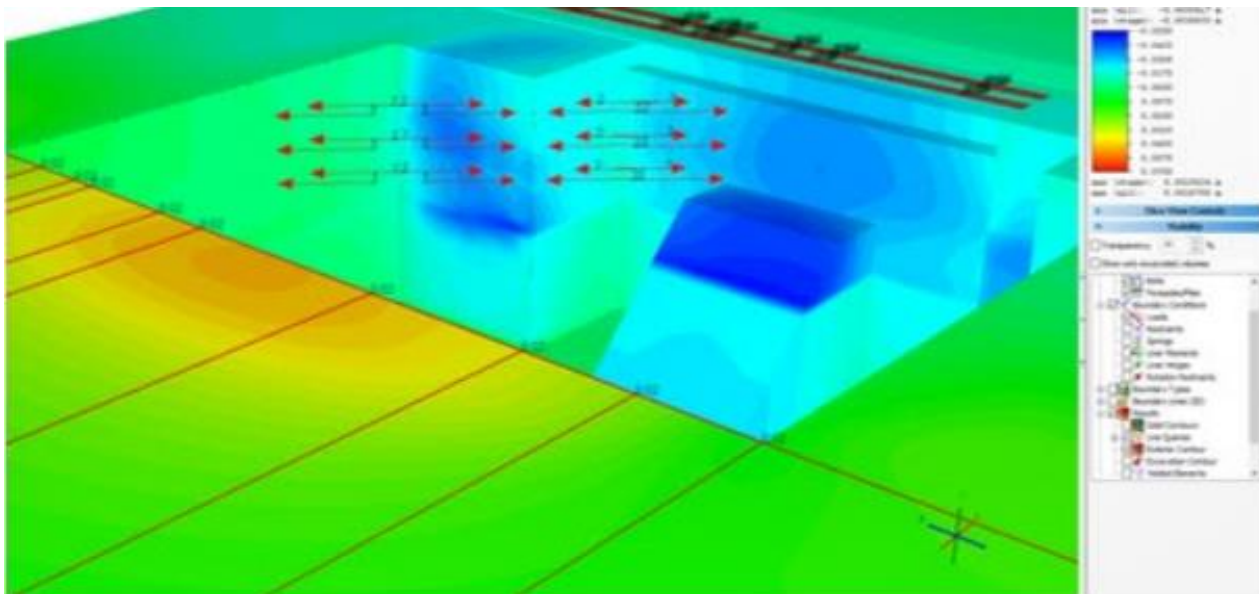


Трехмерный конечноэлементный анализ строительства глубокого котлована и оценка реакции грунта



Компания Rocscience, основанная в 1996 году на базе Университета Торонто в Канаде, является одним из мировых лидеров по разработке, усовершенствованию и распространению 2D и 3D программного обеспечения для инженеров-строителей, горных инженеров, инженеров-геологов и геотехников. На сайте этой компании недавно появилась заметка «Трехмерный конечноэлементный анализ строительства глубокого котлована и оценка реакции грунта» [1], которая является кратким обзором доклада «Конечноэлементный анализ глубокого котлована и пример реакции грунта на его создание в сиднейском песчанике» [2], сделанного П. Хьюиттом и М. Китсоном (ведущими сотрудниками австралийского представительства канадской инженерно-консалтинговой компании WSP) на Международной конференции Rocscience в 2021 году.

Предлагаем вниманию читателей адаптированный перевод вышеуказанной заметки [1] с привлечением дополнительных материалов [2–4].

Консультационную помощь редакции оказали сотрудники ООО «Современные Изыскательские Технологии» – официального представителя компании Rocscience в России.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА «ГЕОИНФО»

info@geoinfo.ru

ООО «СОВРЕМЕННЫЕ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ADVANCED SURVEY TECHNOLOGIES) – ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПРЕДСТАВИТЕЛЬ КОМПАНИИ ROCSCIENCE В РОССИИ

info@geoast.pro

Введение

Значительные смещения грунта из-за создания глубоких котлованов могут серьезно повлиять на расположенные поблизости инфраструктурные объекты и инженерные коммуникации. Для оценки последствий этого влияния и для планирования фундаментальных мер по их минимизации чрезвычайно важно учитывать смещения грунта и конструкций.

Рассмотрим случай из практики [1, 2], который демонстрирует возможности трехмерного конечноэлементного анализа в программе RS3, разработанной канадской компанией Rocscience. Эта программа использовалась в качестве основного инструмента для обработки результатов наблюдений и проектирования во время работы над проектом котлована на морском побережье к северу от Сиднея (Австралия). На начальных этапах использовалась также программа RS2 от той же компании. (RS2 и RS3 – это универсальные программы соответственно для 2D и 3D анализа напряжений методом конечных элементов, которые могут использоваться при подземных горных работах, для проектирования тоннелей, карьеров, котлованов, систем их крепления, фундаментов, для оценки устойчивости оползневых склонов и пр. [3, 4].)

О проекте

Речь идет о проекте строительства комплекса зданий на улице Кристи (д. 88) в городе Сент-Леонардс, являющемся пригородом Сиднея (рис. 1). Этот комплекс состоит из двух жилых высотных зданий с максимальной высотой 47 этажей и одного коммерческого здания с 15-ю надземными и 10-ю подземными этажами до глубины 43 м (для обширных торговых площадей). Подземная часть площадью в плане 8 тыс. кв. м расположена рядом с основной инфраструктурой автомобильной и железной дорог, простираясь почти до границы с пригородной пассажирской железнодорожной сетью Сиднея (Sydney Trains) (рис. 2).

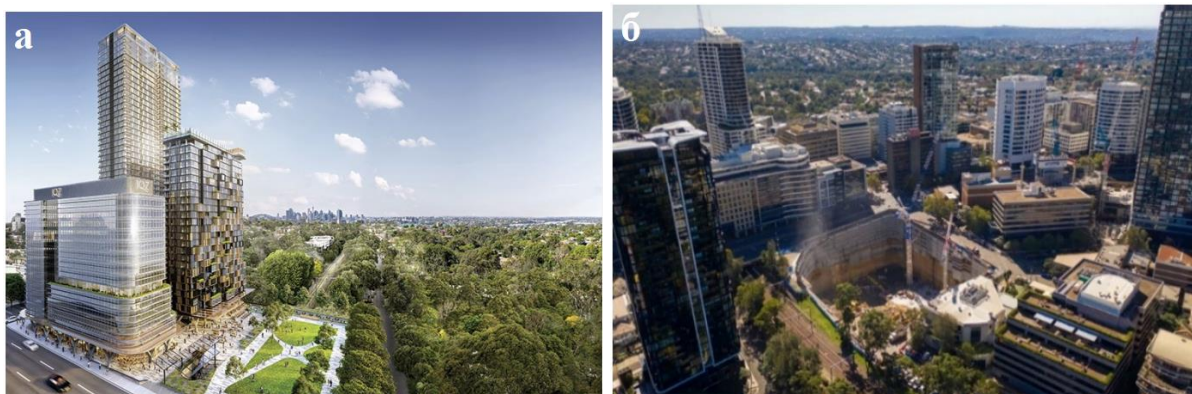


Рис. 1. Визуализация проектируемого комплекса зданий (а) и вид строительной площадки и окружающей застройки (б)



Рис. 2. Вид сверху на территорию строительства с указанием прилегающей транспортной инфраструктуры (а) и на строящийся котлован (б)

О прилегающей инфраструктуре

Площадка строительства была окружена подземными коммуникациями, автодорожной и железнодорожной инфраструктурой, а также зданиями. Ранее запланированный проект железной дороги, идущей к деловому центру Сиднея, включал в себя два тоннеля в 14 м от западного края пятна застройки (рис. 3), но от этого проекта отказались и для железнодорожного сообщения был выбран другой маршрут (проект Sydney Metro City & Southwest сейчас находится на стадии строительства).

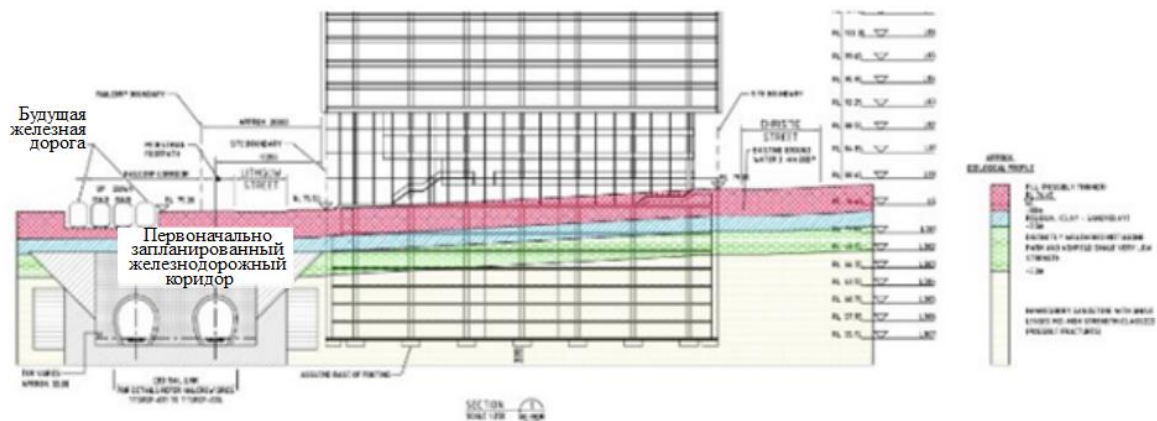


Рис. 3. Схематичный поперечный разрез нижней части проектируемого комплекса зданий с первоначально предлагавшейся железнодорожной линией в 14 м от западного края пятна застройки

Подповерхностные условия и проект котлована

Подповерхностные условия оценивались по результатам бурения 52 скважин, исследований образцов керна, определения показателей прочности пород и дефектов грунтового массива (трещин, в том числе трещин напластования).

Имевшиеся ограничения для строительства включали следующее:

- нельзя было использовать анкерные системы в месте прохождения железной дороги и вплотную к ней;
- строительство и эксплуатация комплекса зданий не должны были повлиять на устойчивость железнодорожной инфраструктуры;
- смещения в пределах Тихоокеанской автомагистрали не должны были превышать 30 мм;
- требовался мониторинг смещений грунта и конструкций дорог из-за строительства котлована.

Были установлены следующие основные конструкции для крепления котлована (например, рис. 4):

- сплошная стенка из бетонных свай вместе с закрепленной анкерами стенкой из торкрет-бетона;
- грунтовые анкеры в пределах 20-метрового квадратного в плане выступа скальных пород в южном углу котлована;
- грунтовые анкеры через 20 м в северном углу возле автодорожной эстакады над железной дорогой.



Рис. 4. Система крепления котлована вдоль границы с железной дорогой (с запада)

Оценка воздействий на окружающие объекты

При оценке воздействий на окружающие объекты анализировались последствия создания котлована и нагрузок от здания, а также поле естественных напряжений, зависящее от качества грунтового массива.

Первоначальная численная оценка реакций грунта и установленной системы крепления котлована была выполнена с использованием двумерного конечноэлементного анализа в программе Rocscience RS2 (рис. 5) и анализа методом конечных разностей в программе FLAC 3D, разработанной американской компанией Itasca Consulting Group.

Однако для более детальной и реалистичной оценки того, как строительство повлияло на существующую инфраструктуру, было проведено трехмерное численное моделирование на основе метода конечных элементов в программе Rocscience RS3.

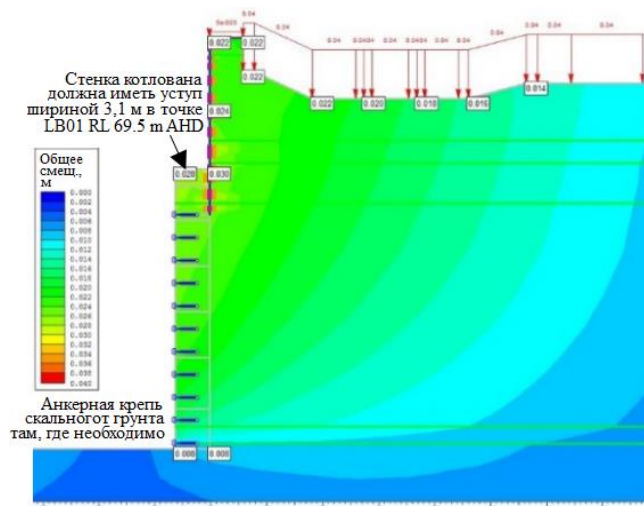


Рис. 5. Общие смещения грунта на разрезе в направлении В-3, спрогнозированные с помощью двумерной оценки в программе RS2

Для контроля деформаций поверхности земли из-за бокового давления грунта в верхних частях окружающего котлован грунта была спроектирована система крепления котлована анкерными сваями и анкерами, которая была откалибрована с использованием результатов мониторинга различных глубоких котлованов в Сиднее и окрестностях.

Анализ строительства котлована в программе RS3

Исследование западной стороны котлована вблизи железной дороги показало, что на глубине около 40 м между слоями песчаника могут присутствовать прослой более слабых глинистых сланцев. Поэтому для контроля смещений грунта из-за прогиба подпорной стенки котлована там был временно установлен анкер высокой жесткости. Пока шла выемка грунта, автоматический инклинометр зафиксировал более выраженные горизонтальные скользящие движения песчаника по этим двум прослоям сланцев, которые превысили прогнозные (рис. 6). Эти смещения вызывались снятием природных напряжений в песчанике со стороны котлована во время выемки грунта.

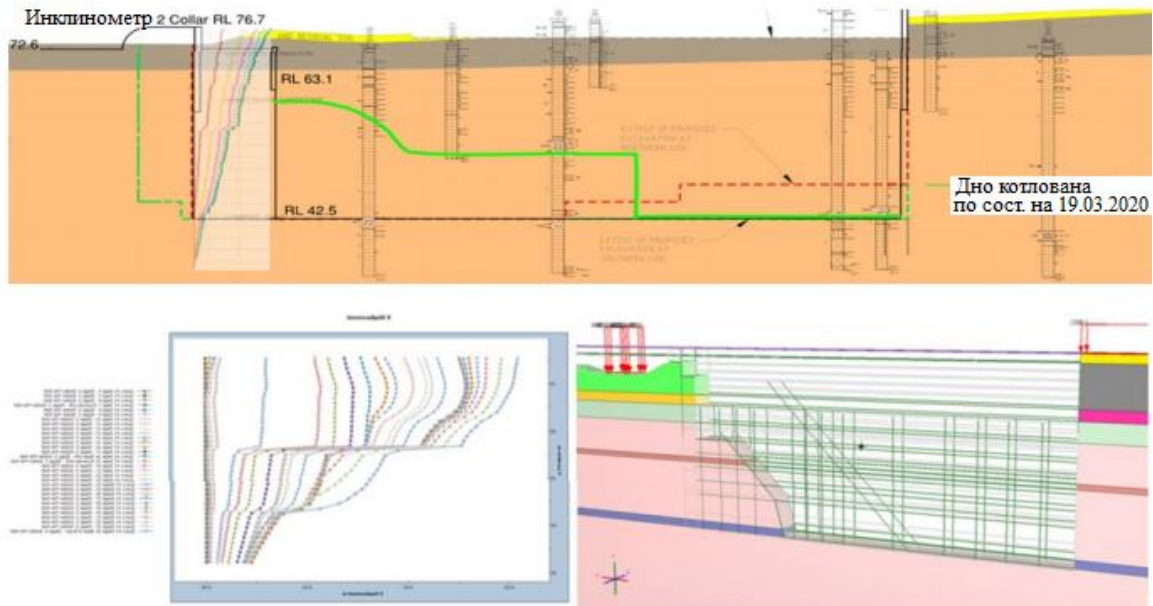


Рис. 6. Ход выемки грунта на разрезе с запада на восток (сверху) и трехмерная модель части котлована и окружающего грунта вдоль этого разреза в программе RS3 (внизу справа), откалиброванная с помощью результатов измерений инклинометром с 14 ноября 2019 г. по 19 марта 2020 г. (внизу слева)

Первоначально программа RS3 использовалась для калибровки трехмерной модели котлована и окружающего грунта (см. рис. 6 внизу справа) в соответствии со смещениями, измеренными инклинометром. Затем прослой сланцев были смоделированы как части системы трещин в сочетании с использованием параметров Мора – Кулона. После калибровки модели были протестированы разные варианты хода строительства котлована, системы его крепления и конструкций подземных этажей для выяснения того, как уменьшить смещения грунта, обеспечить дополнительную поддержку подпорной стенки и гарантировать отсутствие недопустимого воздействия этих смещений на железную дорогу [1] (например, рис. 7–10). Был выбран вариант, который включил (см. рис. 9, 10):

- выемку выступа скального грунта у южной подпорной стенки котлована в последнюю очередь;
- установку у этого выступа угловой системы гидравлических распорок с приложенным к стенке усилием 2,5 МН;
- увеличение длины южных анкеров в районе указанного выступа (так, чтобы они уходили на достаточную глубину ниже прослой сланцев);
- установку дополнительных анкеров в противоположном углу, чтобы уравновесить силу действия системы угловых распорок [2].

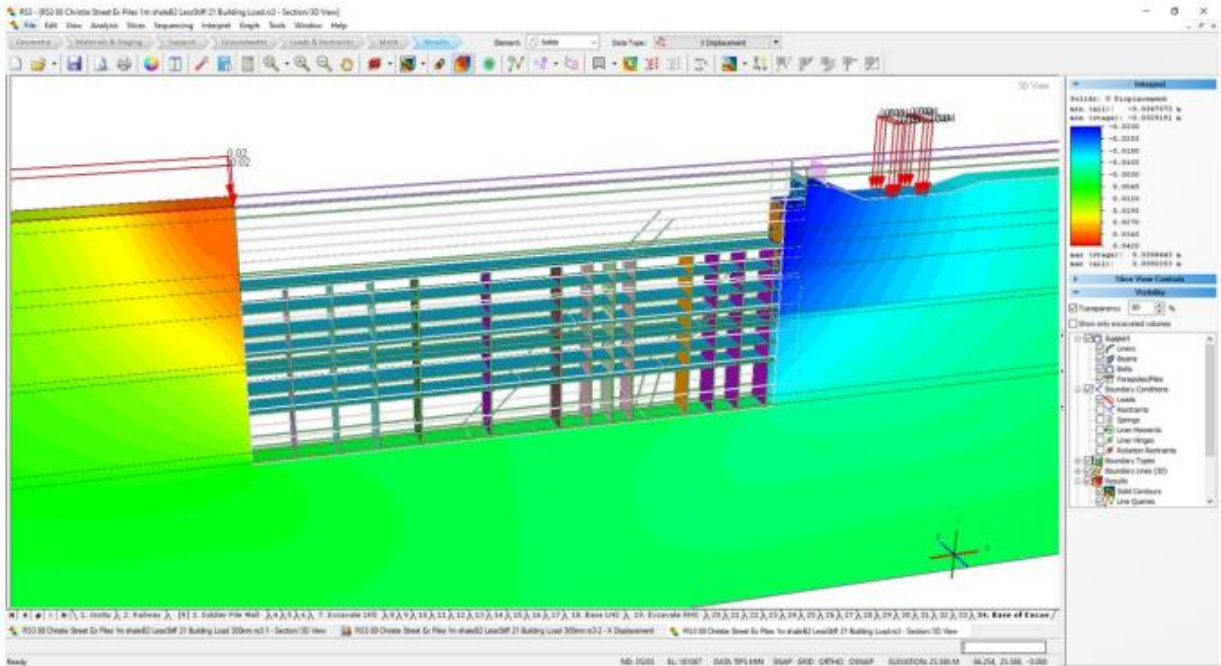


Рис. 7. Трехмерная модель части котлована с перекрытиями и стенами подземных этажей вдоль поперечного среза в программе RS3 с отражением прогнозируемых смещений окружающего грунта и соседней железной дороги

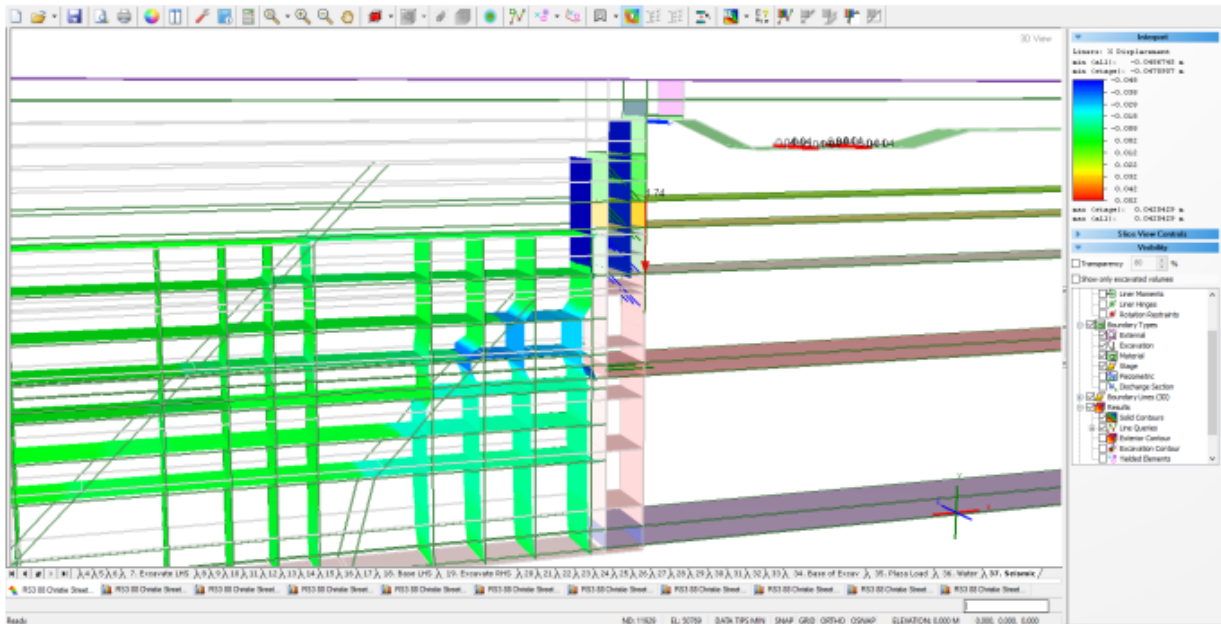


Рис. 8. Трехмерная модель части котлована с перекрытиями и стенами подземных этажей вдоль поперечного среза в программе RS3 с представлением откалиброванных прослоев глинистого сланца и прогнозируемых смещений конструкций

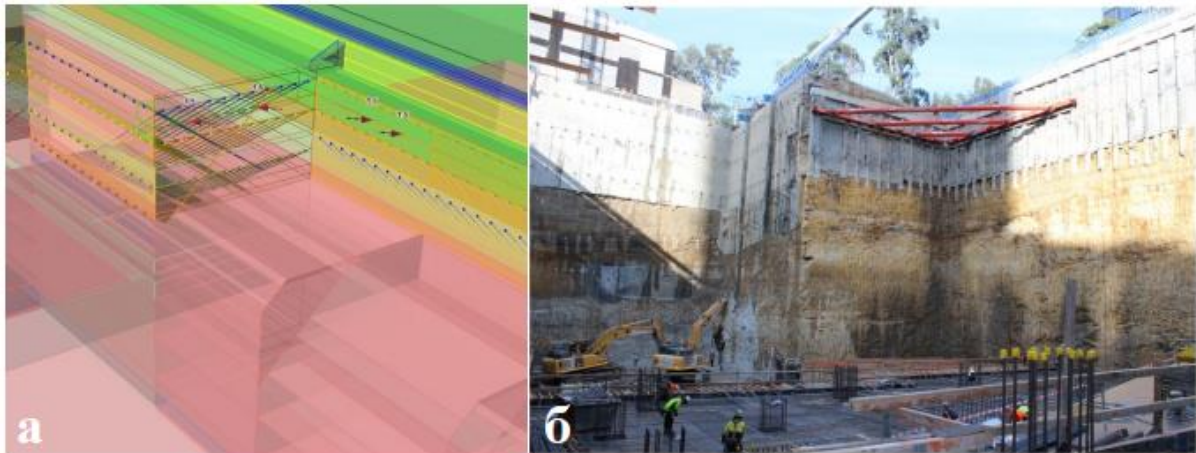


Рис. 9. Модель котлована в программе RS3 (а) и его фотография (б) с системой крепления из свай и анкеров и с угловой системой распорок

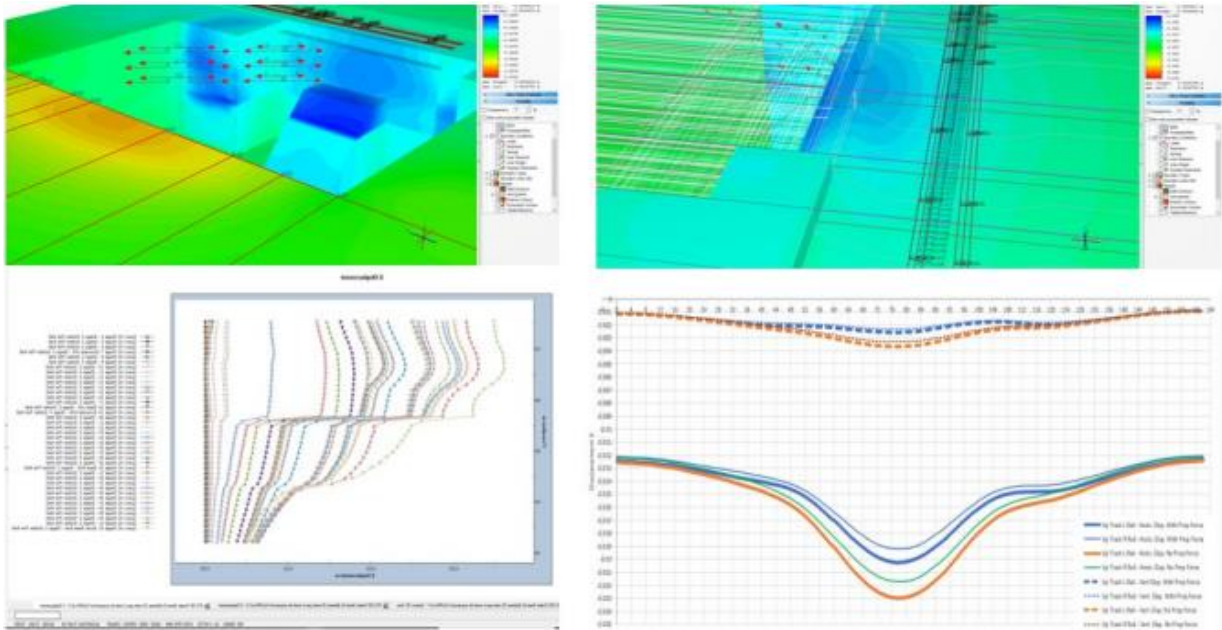


Рис. 10. Модель котлована в программе RS3 с прогнозируемыми воздействиями на железнодорожную линию в случае оставления выступа скальных грунтов у подпорной стенки, идущей вдоль железной дороги (этот выступ должен быть вынут последним), а также при добавлении угловой системы распорок и дополнительных анкерных креплений

Результаты мониторинга

Во время строительства поведение подпорных стен котлована контролировалось с помощью приборов и регулярных визуальных наблюдений. Максимальное измеренное горизонтальное смещение составило 28 мм (в средней точке западной стенки), что соответствует результатам, полученным в RS3 (рис. 11).

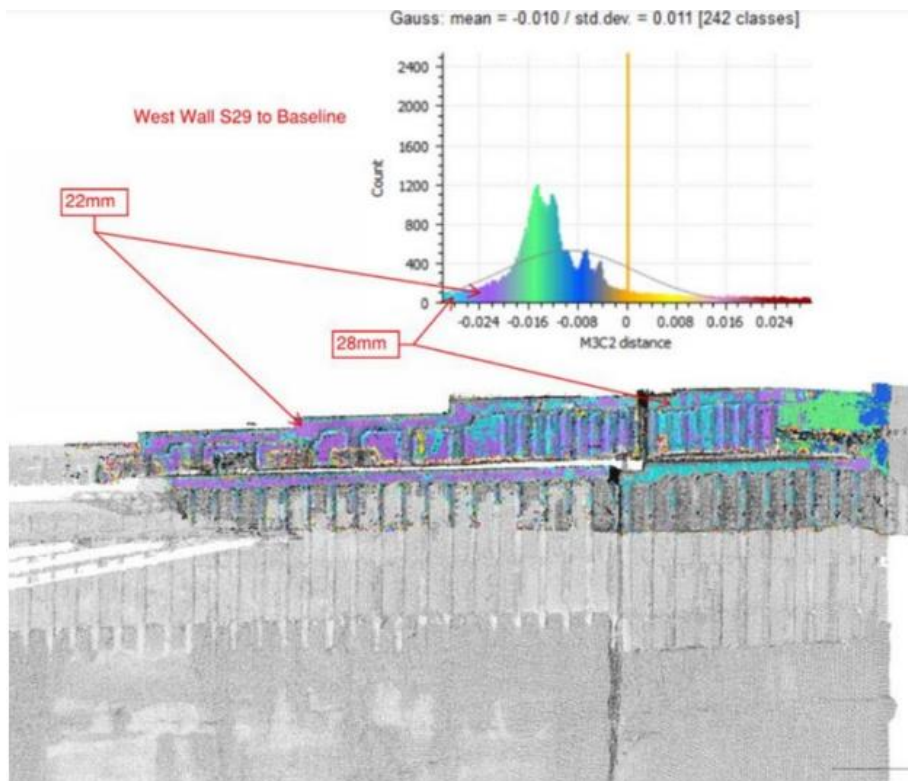


Рис. 11. Результаты лазерного сканирования западной подпорной стенки, которое показало среднее смещение 10 мм и максимальное смещение 28 мм

Заключение

Результаты работы над рассмотренным проектом подчеркнули преимущества анализа методом конечных элементов в программе RS3 для оценки воздействий строительства глубокого котлована и подземной части комплекса зданий на окружающие грунты и инженерные объекты в целях получения точных прогнозов и преодоления геотехнических проблем.

Для получения более подробной информации об этом проекте и ходе конечноэлементного анализа для него можно узнать, прочитав полную статью [2], по которой был составлен переведенный краткий обзор [1].

Источники

1. 3D finite element analysis of a deep excavation and ground response evaluation // Rocscience. May 27, 2022 URL: <https://www.rocscience.com/learning/3d-finite-element-analysis-of-a-deep-excavation-ground-response-evaluation>.
2. Hewitt P., Kitson M. Finite element analysis of a deep excavation: a case study ground response due to deep excavations in Sydney sandstone // Proceedings of the Rocscience International Conference “The Evolution of Geotech – 25 Years of Innovation”, April 20–21, 2021. Taylor and Francis Group, 2021. URL: <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/papers/RICAB52-Maxwell-Kitson-May-Paper.pdf>.

3. <https://www.geoast.pro/rs2>.
4. <https://www.geoast.pro/rs3>.