

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИИ ГРУНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФУНДАМЕНТА САМОЙ ВЫСОКОЙ БАШНИ В СИНГАПУРЕ*

Высокий спрос на недвижимость в Сингапуре приводит к необходимости планировать строительство новых зданий в районах с плотной городской застройкой. Как правило, это здания повышенной этажности, нижняя нежилая часть которых вместе с фундаментом уходит на значительную глубину под землю. Местные регулирующие органы устанавливают строгие



Рис. 1
Проект башни Guoco Tower



Рис. 2
Подиум и подземная часть башни Guoco Tower, прилегающая к станции метрополитена

критерии к величине деформаций существующих зданий, вызванных строительством новых.

Одним из таких масштабных проектов ведущей региональной компании по недвижимости GuocoLand (Singapore) PTE LTD стало проектирование и строительство башни Guoco Tower стоимостью 3,2 млрд сингапурских долларов. Ранее этот проект был известен как проект смешанной застройки Tanjong Pagar Center. Башня Guoco Tower представляет собой 64-этажное здание высотой 290 м с офисными и жилыми помещениями, гостиничным блоком средней этажности, шестиэтажным подиумом для использования в коммерческих целях и трехэтажной нежилой подземной

частью глубиной 18 м, с паркингом и прямым выходом к станции Сингапурского метрополитена (рис. 1, 2). Несмотря на масштаб и сложность проекта, место строительства самой высокой башни в стране было выбрано в центре оживленного делового района Сингапура.

По материалам инженерно-геологических изысканий было ясно, что грунты, залегающие в районе строительства башни, будут представлять серьезную проблему. На участке возведения фундамента присутствовали доломит, известняк, аргиллит, песчаник и сланец. Для такого типа грунтов характерна высокая проницаемость и изменчивость свойств. Значительный объем земляных работ при выемке грунта для возведе-

* Статья подготовлена пресс-службой компании Bentley Systems.



Рис. 3

Вид строительной площадки башни Guoco Tower с существующими зданиями

ния подземной части башни и фундамента создаст риск деформации уже построенных зданий и сооружений на прилегающей территории.

В связи с этим регулирующие органы Сингапура установили критерии к величине смещений существующих зданий, которые могли возникнуть из-за строительства башни Guoco Tower (рис. 3).

Смещение конструкций станции Сингапурского метрополитена, функционирование которого будет продолжаться на протяжении всего строительства башни, не должно превышать 15 мм в любом направлении.

Неравномерность смещения отдельных участков железнодорожных путей метрополитена должна быть в пределах 1:1000.

Смещения двух зданий (магазинов), являющихся объектами культурного наследия Сингапура, с фундаментами неглубокого заложения и расположенных менее чем в 20 м от башни, не должны превышать 25 мм.

Конструкция фундамента должна обеспечивать неравномерную усадку между областью подошвы фундамента и областью с максимальной нагрузкой башни в отношении 1/500.

Эти нормативные требования создавали значительные технические трудности при проекти-

ровании фундамента башни и разработки технологии ее строительства.

Кроме того, были установлены довольно сжатые сроки на разработку проектного решения. Предложение по конструкции фундамента требовалось подготовить сразу после проведения инженерно-геологических изысканий.

▼ Обоснование безопасности выемки грунта при устройстве фундамента с помощью программы gINT

Компания GuocoLand (Singapore) PTE LTD заключила контракт на оказание услуг по проектированию и строительству башни Guoco Tower с компанией Arup Singapore PTE LTD. Она является местным филиалом международной компании Arup Group LTD, которая предоставляет услуги по проектированию, архитектуре, разработке, планированию, управлению проектами и консалтингу по всему миру, а реализованные

ею проекты представлены в 143 странах.

Специалисты компании Arup Singapore на этапе предварительного проектирования провели детальное исследование состояния геологического строения грунтов, а также тщательно проанализировали опыт предыдущих проектов в аналогичных условиях. Были рассмотрены все эмпирические и аналитические методы, позволившие определить, что для обеспечения безопасного и успешного проведения земляных работ при строительстве подземной части потребуется внимательно следить за смещением грунта с использованием надежных геотехнических решений. Именно такой подход должен был сыграть ключевую роль в предупреждении нежелательных последствий выемки грунта.

Чтобы решить эту задачу, проектное подразделение компании использовало программу gINT компании Bentley Systems, предназначенную для детального исследования, анализа и управления поступающими инженерно-геологическими данными по всему проекту, включая данные буровых колонок и результаты испытаний грунта в лаборатории и на объекте, а также информацию, полученную в результате топографо-геодезических работ. С помощью программы gINT были исследованы сложные осадочные отложения, что позволило получить полную информацию о геологическом строении и свойствах грунтов, залегающих в месте будущего фундамента башни. Всего за

Программное обеспечение gINT для геотехнических исследований

Программное обеспечение gINT, разработанное компанией Bentley Systems, предназначено для централизованного управления данными о грунтах, полученных при инженерно-геологических изысканиях. Позволяет создавать и визуализировать виртуальные геотехнические отчеты любого типа, в том числе по кернам. Строить пространственные диаграммы, поперечные сечения и профили, карты участков изысканий, графики и таблицы на основе единой базы данных. Обеспечивает управление геотехническими данными как одного, так и нескольких проектов. Предоставляет возможность работать с инженерно-геологическими данными в 2D и 3D. Обеспечивает обмен данными с другими приложениями для проектирования.

одну неделю после завершения инженерно-геологических исследований был подготовлен полный детальный геотехнический отчет о проведенной оценке всех свойств грунта и рисков, связанных с ним на любом заданном участке строительства. С помощью программы gINT специалисты проектного подразделения смогли наглядно и доступно представить результаты своих исследований всем участникам проекта.

Исследования, проведенные с помощью программы gINT, показали, что состояние геологических слоев на строительной площадке находится в достаточно хорошем состоянии и подходит для возведения фундамента. Тем не менее, анализ также показал, что для 290-метровой башни потребуется фундамент глубокого заложения. Это необходимо для того, чтобы не произошло непредвиденных деформаций и разрушений близлежащей станции Сингапурского метрополитена. В идеале фундамент должен минимизировать смещения строительных конструкций станции, но при этом оставаться достаточно гибким, обеспечивая устойчивость башни при строительстве и дальнейшей эксплуатации.

▼ Точный прогноз поведения грунта средствами ПО PLAXIS — ключ к эффективному проектированию

Для создания геологической модели грунтов и уточнения первоначального проекта специалисты компании Arup Singapore, используя данные, полученные из программы gINT, и фактические результаты геодезического мониторинга, определили точную нагрузку на грунт и его смещение с помощью функции PLAXIS 2D SoilTest ПО PLAXIS 3D. Это позволило выбрать конструкцию фундамента, сочетающую плиту и многочисленные буронабивные сваи (рис. 4), и определить

Программное обеспечение PLAXIS для геотехнического моделирования методом конечных элементов

Программное обеспечение PLAXIS предназначено для использования в области геотехнического проектирования и механики горных пород. Позволяет по двумерным и трехмерным моделям проводить анализ устойчивости грунта и скальных пород, рассчитывать методом конечных элементов деформации, вызванные взаимодействием сооружения с грунтом и влиянием тепловых потоков и грунтовых вод. В программе предусмотрены все необходимые инструменты для моделирования нелинейного и меняющегося со временем поведения грунта и расчета взаимодействия сооружения с грунтом в проектах любого типа, включая котлованы, фундаменты, насыпи, туннели, горные работы и выемку грунта.

сложное взаимодействие между предлагаемым плитно-свайным фундаментом, поэтапной выемкой грунта и существующими конструкциями зданий и станции метрополитена.

Для моделирования производительности отдельных свай

общая модель фундамента была дополнена независимыми трехмерными моделями (рис. 5), которые в последующем калибровались с помощью данных нагрузочных (штамповых) испытаний на строительной площадке (рис. 6). Вычислив точ-

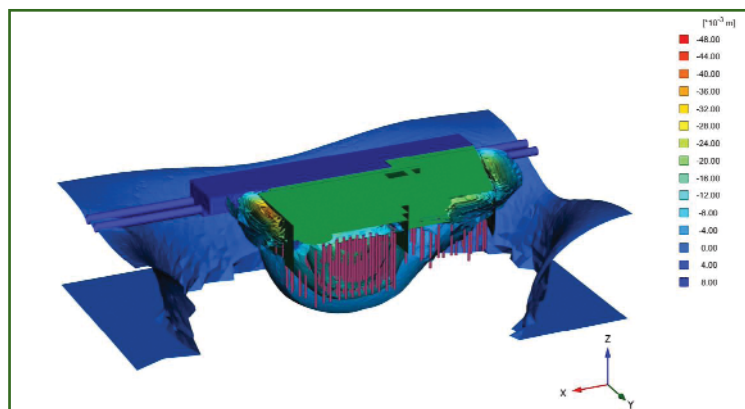


Рис. 4

Модель комбинированной конструкции фундамента в ПО PLAXIS 3D (Arup Singapore)

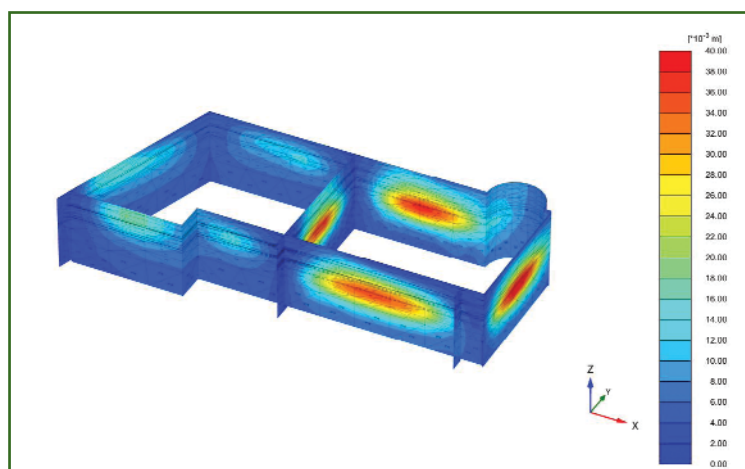


Рис. 5

Проект независимой трехмерной модели в ПО PLAXIS 3D (Arup Singapore)

ные характеристики грунта и созданной модели фундамента и используя итерационные возможности, заложенные в ПО PLAXIS 3D, было рассчитано, как будет происходить оседание башни с течением времени.

Применение ПО PLAXIS 3D в качестве универсального решения для определения воздействия грунта на деформации конструкций станции метрополитена и зданий, находящихся вблизи строительной площадки, позволило компании Arup Singapore:

- сэкономить средства, отказавшись от использования многочисленных программных платформ и ускорив процесс предоставления документации;

- исключить необходимость работ по стабилизации грунта, рассчитав зоны деформации прилегающей территории, вызванные выемкой грунта (выполнить расчет таких прогностических данных с помощью стандартного анализа не представляется возможным);

- оптимизировать процесс выемки грунта, исключив работы, запланированные на берму и некоторые наклонные угловые распорки, проведя анализ производительности земляных работ на строительной площадке и сравнив ее с моделью в ПО PLAXIS 3D.

Во время и после строительства компания Arup Singapore осуществляла мониторинг смещения грунта в районе строительства геодезическими методами и с помощью специальных измерительных инструментов, таких как плоские ячейки, пьезометры и тензометрические датчики, размещенных под фундаментной плитой, с целью соблюдения требований, установленных регулирующими органами Сингапура. Результаты измерений показали, что смещение стен станции Сингапурского метрополитена, находящихся всего в 6 м от места работ



Рис. 6
Буронабивные сваи фундамента башни

по выемке грунта, не превысило 10 мм. Кроме того, осадка грунта на прилегающем к строительной площадке участке составила всего 20 мм.

Разработанная в ПО PLAXIS 3D модель плитно-свайного фундамента позволила облегчить проникновение свай в грунт и снизить нагрузку на буронабивные сваи на 30–35%. Кроме того, методика моделирования, реализованная в данном программном обеспечении, позволила оптимизировать толщину плиты для каждой зоны нагрузки, учитывая неоднородный характер как надземных, так и подземных конструкций.

Строительство башни Guoco Tower было завершено в 2016 г., и она стала одним из знаковых сооружений в Сингапуре (рис. 7). Работа над этим проектом продемонстрировала, как геотехнические приложения и другие передовые технологии разработки проектной документации могут стимулировать инженерные инновации.

В заключение следует отметить, что успешному проектированию и строительству самой высокой башни в Сингапуре способствовал выбор компанией Arup Singapore программных средств компании Bentley Systems — gINT, MicroStation и PLAXIS, позволивших выполнить и наглядно представить

результаты трехмерного моделирования и расширенного анализа, основанного на геотехнической инженерии в сочетании с мониторингом в режиме реального времени.



Рис. 7
Башня Guoco Tower в Сингапуре