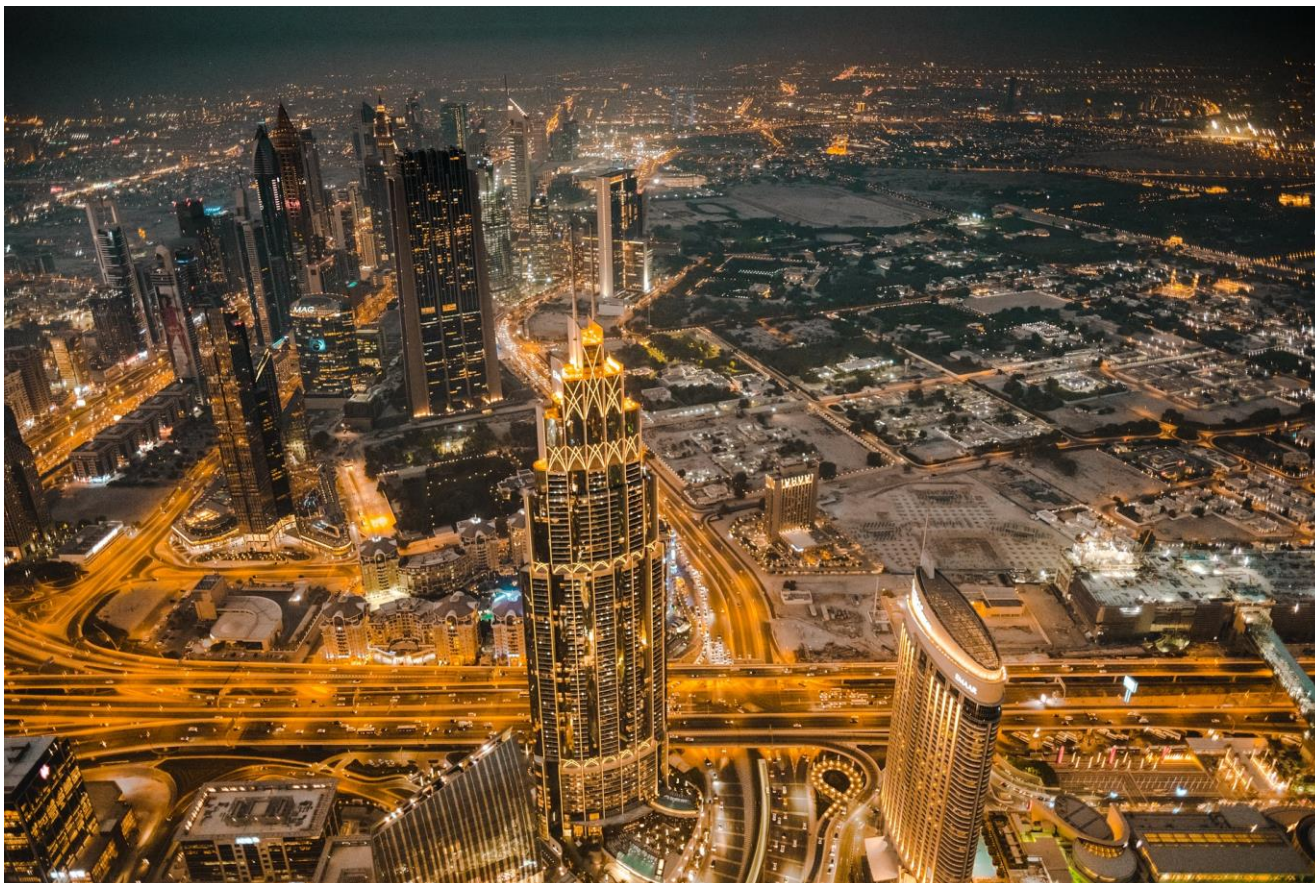


Численные и аналитические расчёты влияния 3D эффектов на выдёргивающую способность анкерных блоков



В представленной статье предпринята попытка на примере реального проекта в Дубае (Объединенные Арабские Эмираты) провести аналитические и численные исследования для определения выдергивающей способности анкерных блоков в 2D и 3D моделях за шпунтовой стенкой и проследить, как учёт трёхмерных эффектов с помощью PLAXIS помог оптимизировать конструкцию без излишнего консерватизма.

Материал переведен с английского и предложен редакции для публикации специалистами ООО «НИП-информатика».

Рамеш Ванданану

Доцент кафедры гражданского строительства, Университет Амити, Дубай

Акаш Шарма

Инженер-геотехник, Fugro Geoconsulting, Дубай

Марван Альзайлае

Старший менеджер по геотехнике, Управление по развитию Дубая

Инженеры-геотехники часто проектируют земляные подпорные сооружения консервативно, чтобы соответствовать требованиям по эксплуатационной пригодности и строительным нормам. Это, несомненно, увеличивает бюджет проекта. Между тем, в обязанности инженеров входит оптимизация конструкции без ущерба для безопасности. Хотя инженеры и изыскатели стараются проводить лабораторные испытания как можно ближе к реальности, моделируя полевые ситуации/условия, из-за сложности их реального воспроизведения всегда существуют ограничения и допущения. То же верно и для аналитических подходов, поэтому большинство методов проверены в двухмерной постановке из-за трудностей и сложностей, связанных с проведением трёхмерного расчёта.

Развитие технологий позволило упростить процесс трёхмерных расчётов с помощью численных методов с использованием программного обеспечения конечно-элементного анализа. Однако всегда рекомендуется аналитически проверять результаты, полученные в результате численного расчёта. В данном исследовании была предпринята попытка на примере реального проекта в Дубае, Объединенные Арабские Эмираты, провести аналитические и численные исследования для определения выдерживающей способности анкерных блоков в 2D и 3D моделях за шпунтовой стенкой и проследить, как учёт трёхмерных эффектов с помощью PLAXIS помог оптимизировать конструкцию без излишнего консерватизма.

Предмет исследования

Проект расположен в эмирате Дубай, ОАЭ, где требовалось поднять существующий уровень поверхности на отметке +5,5 м DMD (муниципальная точка отсчета Дубая) до +11,75 м DMD, т.е. на высоту 6,25 м над уровнем земли (рис. 1) в пределах участка. Кроме того, в будущем ожидается выемка грунта (с правой стороны от шпунтовой стенки на рисунке 1) до уровня +2,5 м DMD, т.е. на 3 м ниже существующего уровня земли. Также ожидается небольшая транспортная нагрузка (10 кПа) на верхнюю часть насыпи.

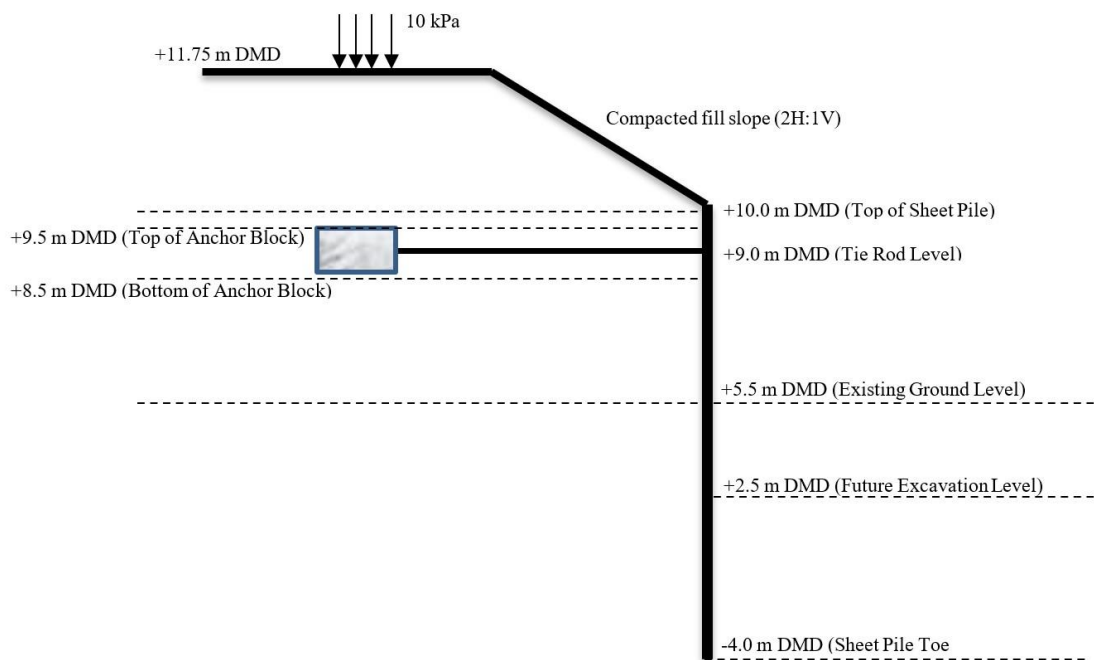


Рис. 1. Схема шпунтовой стенки с расположением анкерных блоков (без масштаба)

Назначенный на стройплощадку подрядчик уже применял многоразовые шпунтовые секции (AU-20) высотой 14 м. Учитывая важность экономического аспекта строительства, было решено спроектировать подпорную стену с их использованием. Учитывая условия участка и высоту имеющихся шпунтовых секций, после нескольких испытаний было решено засыпать грунт с уклоном, как показано на рисунке 1, с верхним уровнем шпунта на отметке +10 м DMD и свободной высотой шпунта 4,5 м над уровнем поверхности земли, увеличенной до 7,5 м после завершения земляных работ с правой стороны. Это привело к поперечному изгибу >100 мм на свободном конце шпунтовой сваи, что является наименьшей величиной изгиба из всех проведенных испытаний. Однако это превысило допустимый предел (50 мм) в соответствии с местными нормативами. Чтобы контролировать поперечный изгиб шпунтовых свай, было решено разработать систему анкерного крепления. Поскольку у подрядчика на площадке уже имелись кубические бетонные блоки размером 1 м, было решено использовать их в качестве анкерных блоков, как показано на рисунке 2, для контроля изгибов. Проектирование системы анкерного крепления в первую очередь включает в себя расстояние между блоками, которое косвенно зависит от выдергивающей способности анкерного блока. Выдергивающая способность анкерных блоков сначала была определена аналитически, а затем численно.



Рис. 2. Анкерные блоки за шпунтовой стеной для контроля изгибов

Аналитические подходы: 2D и 3D

Выдерживающая способность анкерных блоков в 2D подходе была рассчитана аналитически с использованием методов, основанных на теориях Ранкина, Кулона и теории «Логарифмической спирали», которые обычно используются инженерами-геотехниками в ОАЭ. После проведения необходимых расчётов было установлено, что допустимая выдерживающая способность анкерного блока составляет 123 кН после учёта коэффициента запаса устойчивости 1,5, что является слишком консервативным решением согласно нашему опыту аналогичных работ. Это означало, что либо потребуются анкерные блоки большого размера, либо они должны быть установлены очень близко, чтобы соответствовать требованию по выдерживающей способности.

Поэтому была предпринята попытка рассчитать сопротивление выдергиванию анкерных блоков с учётом 3D эффектов, которые ближе к реальности. В большинстве случаев аналитические решения проводятся только в 2D с достаточным коэффициентом запаса устойчивости. Это связано, прежде всего, со сложностями, возникающими при составлении аналитических уравнений с учётом 3D эффекта.

Тем не менее мы провели аналитические расчёты с учётом 3D эффекта. После проведения расчётов пересмотренное допустимое сопротивление выдергиванию анкерного блока с учётом 3D эффекта увеличилось с 123 кН (в 2D) до 285 кН после учёта коэффициента запаса устойчивости 1,5. Это увеличило сопротивление выдергиванию в 2,3 раза при учёте 3D эффекта и привело к увеличению расстояния между анкерными блоками.

Однако при формулировании любых математических выражений для инженерных задач неизбежно возникают допущения, особенно при учёте 3D эффекта. Поэтому для проверки и подтверждения результатов, полученных аналитическими методами, был проведён одновременный численный анализ с использованием программы PLAXIS, подробности которого приведены в следующих разделах.

Численные подходы: 2D и 3D

Выдергивающие способности анкеров были рассчитаны с помощью численных 2D и 3D подходов, учитывающих задачи плоской деформации и объёмного моделирования с использованием геотехнического расчёта методом конечных элементов (FEA) программного обеспечения PLAXIS.

2D конечно-элементный анализ

В этом подходе уплотнённый заполнитель и бетонный анкерный блок моделировались как элемент плоской деформации (рис. 3). Уплотнённая засыпка была задана с помощью модели материала Мора-Кулона. Для бетона в расчёте использовалась линейно-упругая модель. Между блоком и уплотнённой засыпкой был задан элемент границы раздела с $R_{inter}=0,67$. Расчёт проводился в три фазы:

- Фаза 1: Начальная фаза, где процедура K0 использовалась для задания начальных напряжений в модели.
- Фаза 2: Активация блоков и интерфейсных элементов в модели.
- Фаза 3: Активация нагрузки.

К блоку была приложена нагрузка 500 кПа. Для расчёта сопротивления выдергиванию на основе критерия работоспособности, который ограничивает горизонтальное перемещение до 10 мм, т.е. 1% от высоты блока, была построена диаграмма зависимости предельной нагрузки на выдергивание от горизонтального перемещения (рис. 3). Предельная нагрузка на выдергивание, соответствующая предельному перемещению в 10 мм, составила 246 кН. Соответственно, допустимое сопротивление выдергиванию составило 164 кН после применения коэффициента запаса устойчивости 1,5.

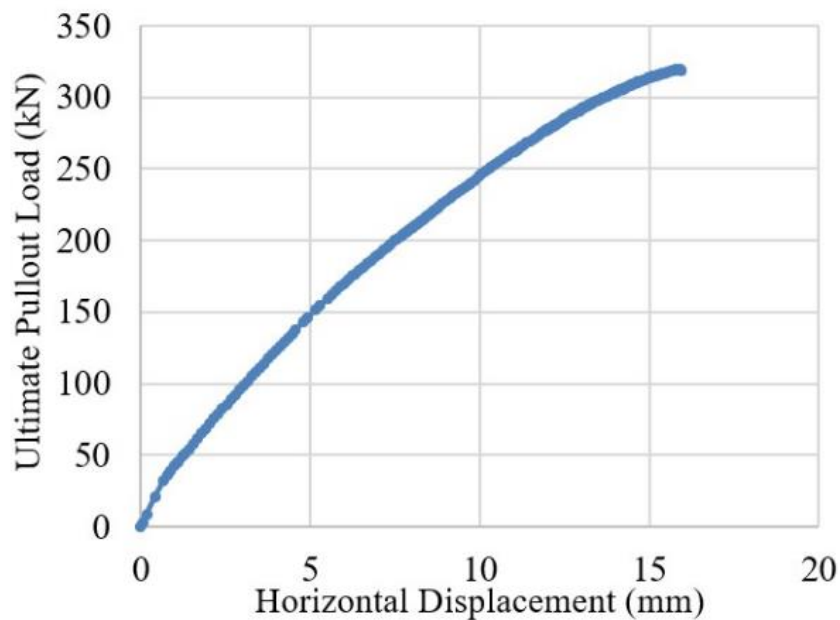
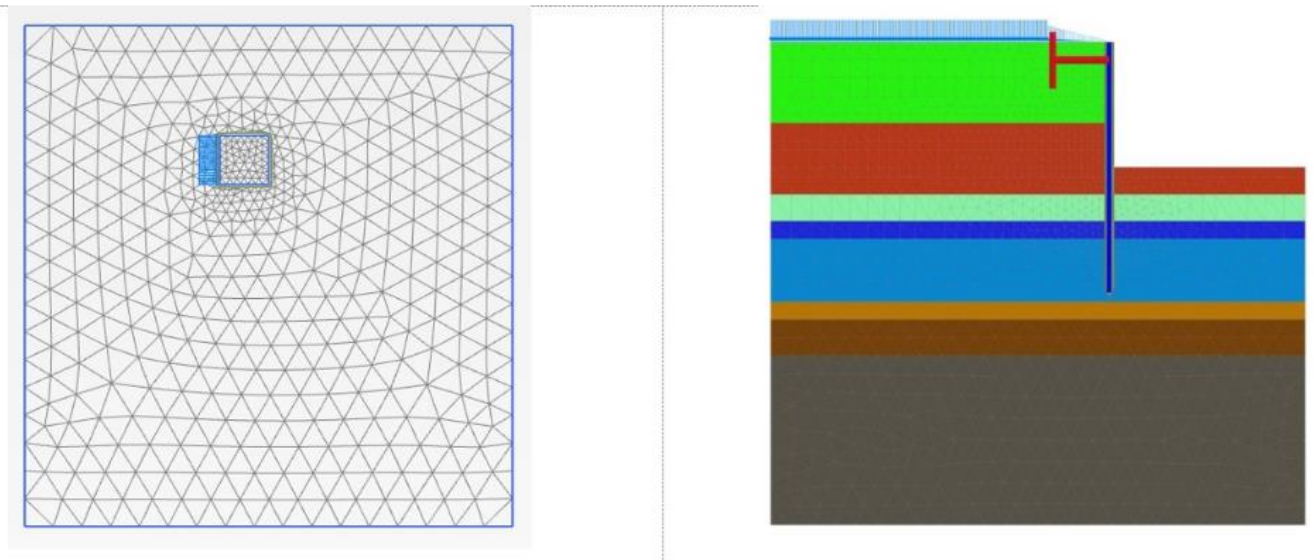


Рис. 3. 2D модель численного анализа и кривая зависимости «перемещение-нагрузка»

3D конечно-элементный анализ

3D конечно-элементный анализ (рис. 4) проводился с уплотнённой засыпкой, а бетонные анкерные блоки моделировались как объёмные элементы с интерфейсными элементами $R_{inter}=0,67$), заданными между блоком и уплотнённой засыпкой. Последовательность строительства фаз в 3D модели была такой же, как и в 2D модели, а расстояние между центрами блоков составляло 2,25 м.

К блоку была приложена нагрузка 1000 кПа. Для расчёта сопротивления выдёргиванию на основе критерия работоспособности, который ограничивает горизонтальное перемещение до 10 мм, т.е. 1% от высоты блока, была построена диаграмма зависимости предельной нагрузки на выдёргивание от горизонтального перемещения (рис. 4). Предельная нагрузка

на выдёргивание, соответствующая предельному перемещению в 10 мм, составила 436 кН. Соответственно, допустимое сопротивление выдергиванию составило 291 кН после применения коэффициента запаса устойчивости 1,5, что очень близко к значению 285 кН, полученному аналитическим методом с учётом 3D эффектов.

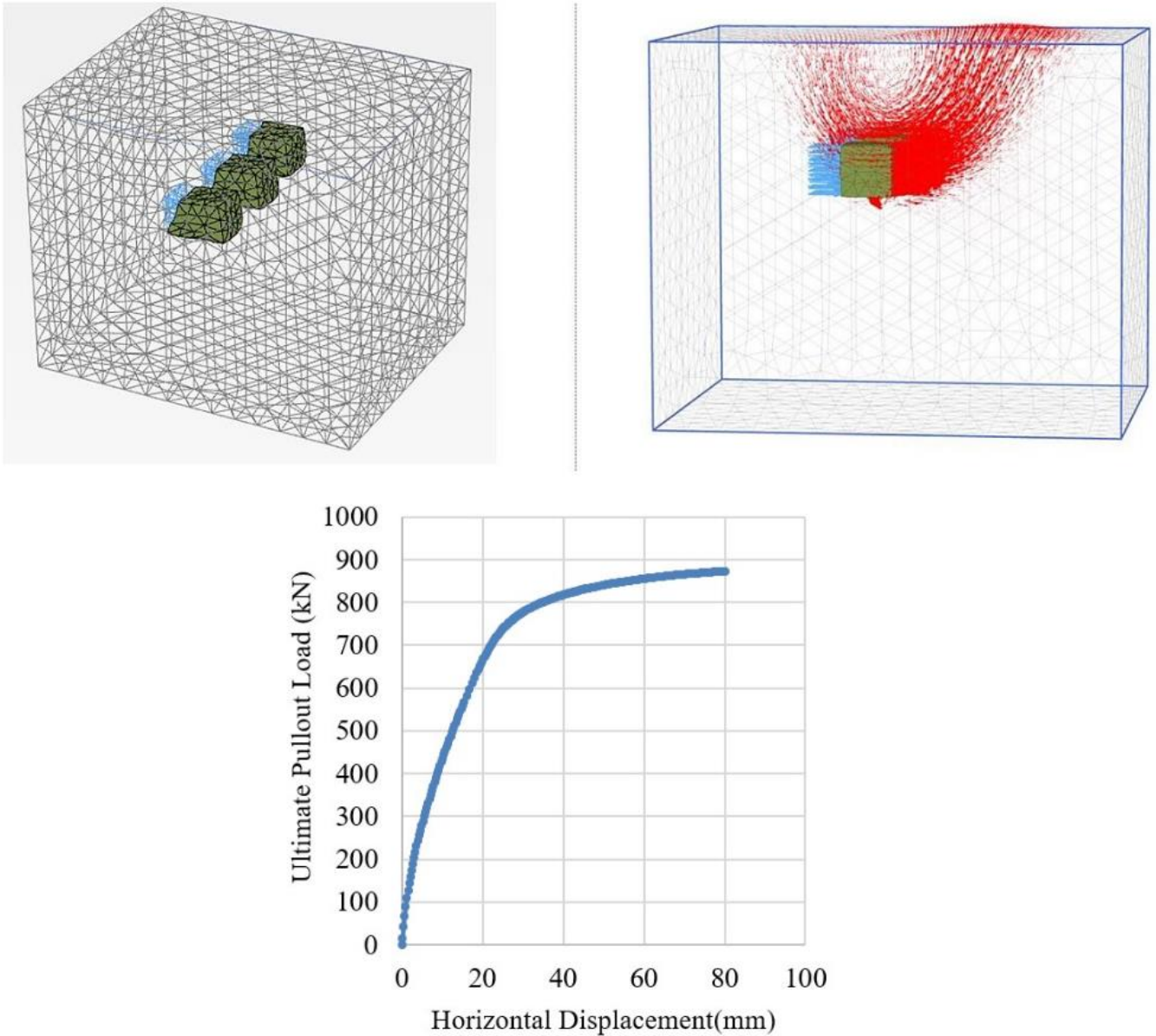


Рис. 4. 3D модель численного анализа и кривая зависимости «перемещения-нагрузки»

Сравнение расчётов

Результаты, полученные с помощью аналитического и численного подходов, обобщены в таблице ниже.

Criteria	Allowable pullout capacity of anchor block (kN)	
	Analytical approach	Numerical approach
With 2D effect	123	164
With 3D effect	285	291
Increment factor	2.3	1.8

Табл. 1. Сопротивление на выдёргивание анкерных блоков в аналитическом и численном подходах

Как в аналитическом, так и в численном подходах значительное увеличение выдёргивающей способности анкерных блоков наблюдалось после учёта 3D эффектов по сравнению со значениями, полученными в 2D анализе. Таким образом, это помогает избежать недооценки выдергивающей способности анкерного блока и тем самым способствует оптимизации конструкции анкерного блока. Кроме того, можно отметить, что выдёргивающая способность, полученная после учёта 3D эффектов в обоих подходах, очень близка по величине. 3D анализ моделирует реальность с меньшими допущениями и, следовательно, приносит значительную оптимизацию конструкции по сравнению с 2D анализом, независимо от сложности и времени, затрачиваемого на 3D анализ. Выполнение аналитических расчётов в 3D – это утомительная работа, и PLAXIS облегчил нам эту задачу.

Строительные характеристики анкерных блоков

На этапе строительства были проведены измерения поперечного изгиба на свободном конце шпунтовых свай в разных местах для выявления любых нежелательных и чрезмерных боковых перемещений. Из всех наблюдений, проведённых от начала до конца строительства, ни разу прогибы не превышали 30 мм, что вполне соответствует допустимым поперечным изгибам (50 мм) согласно местным рекомендациям. Это в основном объясняется включением анкерных блоков за шпунтовой стенкой для контроля чрезмерных прогибов (>100 мм), замеченных во время расчётов на начальном этапе без какой-либо анкерной системы. Таким образом, анкерные блоки были признаны эффективным средством контроля боковых перемещений шпунтовых свай.

Заключение

Анализ в PLAXIS 3D помог преодолеть недооценку выдёргивающей способности анкерных блоков и тем самым оптимизировать конструкцию анкерных блоков. Кроме того, трёхмерный численный расчёт помог правильно смоделировать данную проблему,

принимая во внимание групповые эффекты блоков и взаимодействие блоков с грунтом и, таким образом, используя меньше допущений.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить компанию Emaar Development — The Lagoons Phase One L.L.C. за поддержку и сотрудничество. Особая благодарность выражается инженерам Abdulqader Abusoud, Arif Ustad, и Omar Bustami из компании Emaar Development.

Исходный материал для перевода: [Numerical Analysis and Analytical Calculations of 3D Effects on Pullout Capacity of Anchor Blocks: Case Study in Dubai, United Arab Emirates \(virtuosity.com\)](http://virtuosity.com)