

«НЕДРЕНИРОВАННЫЙ» АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ В ПРОГРАММЕ RS2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ГРУНТА

КИЕН ДАНГ

Менеджер группы конечноэлементного анализа компании Rocscience

АЗАМИ АЛИРЕЗА

Директор по научному и маркетинговому продвижению программных продуктов компании Rocscience

АННОТАЦИЯ

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 статья «Недренированный» анализ поведения глубокого котлована в глинистых грунтах в Rocscience RS2 с использованием модели упрочняющегося грунта» [1], основанная на случае из практики. Предлагаем вниманию читателей адаптированный и немного сокращенный перевод этой статьи [1] с привлечением информации из дополнительных источников [2, 3, 5]. Источники [4, 6] были использованы авторами переведенной статьи.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

глубокий котлован; подпорная стенка; «стена в грунте»; выемка грунта; метод «сверху вниз»; стальные распорки; железобетонные плиты перекрытий; программа Rocscience RS2; горизонтальные смещения; осадки поверхности грунта; конечноэлементное моделирование; численные расчеты; полевые измерения.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Киен Д., Азамы А. «Недренированный» анализ поведения глубокого котлована в глинистых грунтах в программе RS2 с использованием модели упрочняющегося грунта // Геоинфо. 2023. № 3. С. 46–52
DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-3-46-52

UNDRAINED ANALYSIS OF A DEEP EXCAVATION IN CLAYEY SOILS USING PLAXIS HARDENING SOIL MODEL IN RS2

DANG KIEN

FEM Group Manager, Rocscience Inc.

ALIREZA AZAMI

Director on Business and Research,
Rocscience Inc.

ABSTRACT

The Rocscience company, which was founded in 1996 on the basis of the University of Toronto in Canada, is one of the world leaders in the development, improvement and distribution of 2D and 3D software for civil engineers, mining engineers, engineering geologists, and geotechnical engineers. The web-site of this company has recently published the paper "Undrained analysis of a deep excavation in clayey soils using PLAXIS Hardening Soil model in RS2" [1], which is based on a case study. We bring to the readers' attention an adapted and slightly abridged translation of this article [1] with the involvement of information from additional sources [2, 3, 5]. Sources [4, 6] were used by the authors of the translated paper.

Some consulting assistance in the preparation of the translation was provided by employees of Advanced Survey Technologies LLC that is the official representative of Rocscience in Russia.

KEYWORDS:

deep foundation pit; retaining wall; diaphragm wall; soil excavation; top-down method; steel struts; reinforced concrete floor slabs; Rocscience RS2 program; horizontal displacements; soil surface settlements; finite element modeling; numerical calculations; field measurements.

FOR CITATION:

Kien D., Azami A. "Nedrenirovannyi" analiz povedeniya glubokogo kotlovana v glinistykh gruntah v programme RS2 s ispol'zovaniyem modeli uprochnyayushchegosya grunta. *Geoinfo*. 2023. 3: 46–52
DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-3-46-52 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

При анализе, проводимом для решения геотехнических задач, используются различные расчетные параметры в зависимости от того, для каких условий рассматривается поведение грунтов – дренированных или недренированных. «Дренированный» анализ обычно используется для материалов с высокой водопроницаемостью (например, для песков, гравия) или для материалов, долгое время находящихся под нагрузкой. С другой стороны, при моделировании поведения глинистых грунтов при кратковременном нагружении необходимо учитывать параметры недренированного материала. Поскольку недренированная прочность не является неотъемлемым свойством глины, эта характеристика изменяется на разных глубинах модели по мере изменения поля напряжений.

То есть дренированное или недренированное поведение зависит от типа грунта и/или от скорости нагружения.

В программном комплексе RS2 от компании Rocscience «недренированный» анализ может быть смоделирован с помощью трех разных подходов.

1. С применением недренированных параметров прочности и жесткости (используя коэффициент Пуассона, близкий к 0,5, и обратный расчет недренированного модуля Юнга E по эффективному модулю сдвига G). При таком подходе не будет создаваться избыточное поровое давление, так как оно учтено в используемых параметрах (аналог – Undrained C в программе Plaxis. – *Ред.*).

2. С применением параметров недренированной прочности и эффективных параметров жесткости. При этом подходе избыточное поровое давление может быть получено, но оно может быть неточным (аналог – Undrained B в Plaxis. – *Ред.*).

3. С применением эффективных параметров прочности и жесткости. При

таком подходе в зависимости от использованных комплексных геомеханических (конститутивных) моделей поведения грунта может быть точно сгенерировано избыточное поровое давление (аналог – Undrained A в Plaxis. – *Ред.*).

При использовании подходов 2 и 3 в программе RS2 можно смоделировать поведение недренированного грунта, либо активировав опцию Undrained («Недренированное») в пункте меню Consolidation analysis («Анализ процесса консолидации»), либо выбрав опцию Undrained («Недренированное») в пункте меню Material behaviors («Поведение материалов»). Но следует обратить внимание, что должна быть выбрана только одна из опций.

Напомним, что программный комплекс RS2 представляет собой одну из флагманских геотехнических программ от компании Rocscience. Это универсальный программный комплекс для 2D моделирования и анализа напря-

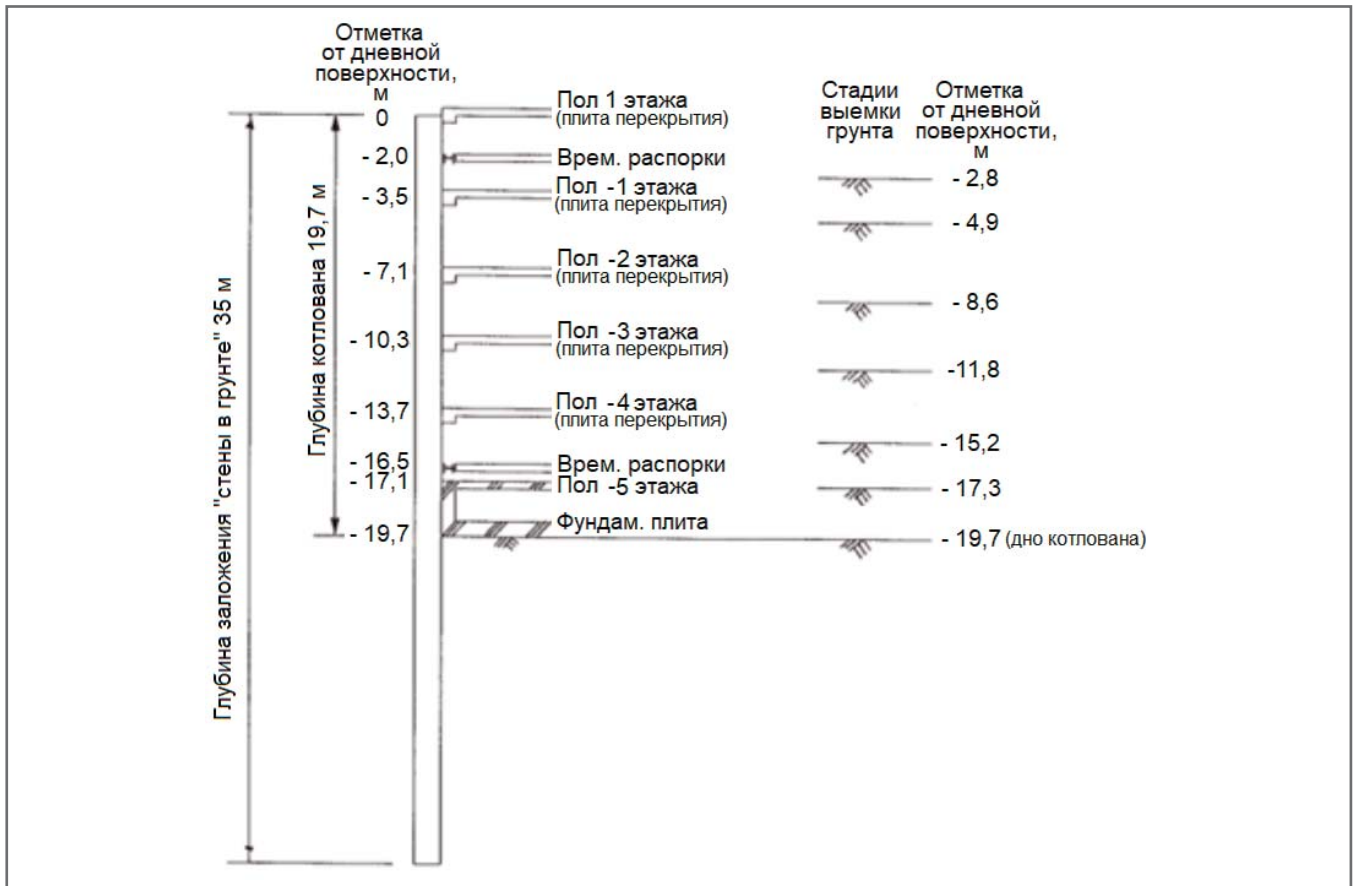


Рис. 1. Поперечный разрез части проектируемого котлована для строительства здания Тайбэйского национального центра предпринимательства (по [4])

Таблица 1. Параметры песчаных грунтов

Параметр	Рыхлый пылеватый мелкозернистый песок	Пылеватый мелкозернистый песок средней плотности	Более плотный пылеватый мелкозернистый песок
	в диапазоне глубины, м		
	5,6–8,0	33,0–35,0	37,5–45,0
Модуль Юнга E , кПа	68 351	265 473	300 247
Коэффициент Пуассона ν	0,3	0,2	0,3
Угол внутреннего трения ϕ , град.	30	33	35
Удельное сцепление c , кПа	0,1	0,1	0,1
Угол дилатансии ψ , град.	0	3	5
Удельный вес γ , кН/м ³	18,93	19,62	19,62
Критерий разрушения	Мора – Кулона	Мора – Кулона	Мора – Кулона

женно-деформированного состояния методом конечных элементов, который может использоваться при подземных горных работах, для проектирования тоннелей, карьеров, котлованов и фундаментов, систем их крепления, а также для оценки устойчивости откосов и склонов и пр. [2, 3].

Далее будет рассмотрен конкретный пример анализа поведения бортов глубокого котлована в глинистых грунтах

в недренированных условиях с использованием третьего подхода. Для моделирования поведения недренированных глинистых грунтов была выбрана модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil, HS). Параметры прочности и жесткости выражались в терминах эффективных напряжений, однако на этапах нагружения и выемки грунта материал рассматривался как недренированный.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ ▶

Здание Тайбэйского национального центра предпринимательства (Taipei National Enterprise Center, TNEC) имеет 5 подземных и 18 надземных этажей. Оно было построено в городе Тайбэй (Тайвань) в 1991 году [4]. Котлован для его возведения был построен за 300 дней. Сначала с поверхности земли по периметру будущего объекта была

Таблица 2. Параметры глинистых грунтов для уточненной модели на основе третьего подхода (с применением эффективных параметров прочности и жесткости)

Параметр		Пластичная пылеватая глина					Среднепластичная глина	
		в диапазоне глубины, м						
		0–5,6	8,0–11,8	11,8–17,3	17,3–25,0	25,0–33,0		35,0–37,5
Модуль Юнга E , кПа	E_{50}	4 574	9 375,01	15 952	19 220,3	20 750	21 227	
	E_{oed}	3202	6562	11167	13454	20750	6562	
	E_{ur}	13723	28125	74858.4	57660	14525	28125	
Коэффициент Пуассона ν		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Угол внутреннего трения ϕ , град.		30	29,08	29,08	29,08	29,08	30	
Удельное сцепление c , кПа		1	1	1	1	1	1	
Угол дилатансии ψ , град.		0	0	0	0	0	0	
Удельный вес γ , кН/м ³		18,25	18,15	18,15	18,15	18,15	19,13	
Коэф. переуплотнения OCR		4	1,8	1,5	1,2	1,1	1	
Коэф. бокового давления нормально уплотненного грунта K_{0-nc}		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

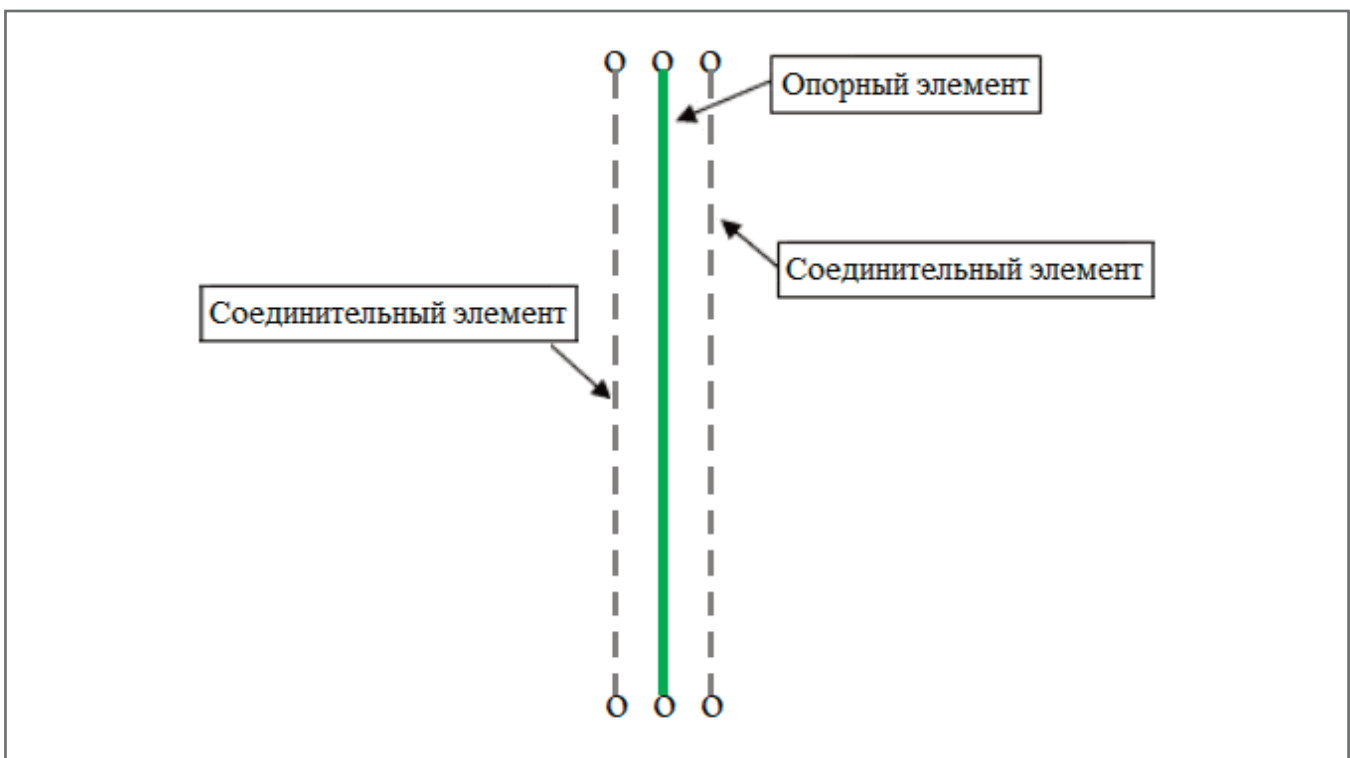


Рис. 2. Схематичное представление компонентов структурного интерфейса (рисунок на основе схемы из архивов сайта rocsience.com добавлен редактором)

сооружена траншейная «стена в грунте», а затем внутри ее периметра сам котлован создавался поярусно по методу «сверху вниз» (top-down) в семь этапов.

1. Грунт был вынут до глубины 2,8 м от дневной поверхности.

2. На глубине 2 м были временно установлены стальные двутавровые балки в качестве горизонтальных распорок (чтобы уменьшить деформации подпорной «стены в грунте» в процессе земляных работ перед установкой железобетонных плит междуэтажных перекры-

тий). Затем был вынут грунт до глубины 4,9 м от дневной поверхности.

3. На глубине 3,5 м была сооружена железобетонная плита перекрытия, после чего были удалены временные распорки, установленные на предыдущем этапе, и вынут грунт до глубины 8,6 м.

Таблица 3. Параметры боковых опор, использованные при моделировании

Параметр	Стальные двутавр. распорки	Железобетонные плиты перекрытий					Стальные двутавр. распорки
	на глубине, м						
	2,3	3,5	7,1	10,3	13,7	16,5	
Жесткость пружины k , кН/м/м	11 720,93	117 209,3	117 209,3	117 209,3	117 209,3	50 331,05	
Коэффициент упругости E , кПа	$2,1 \times 10^8$	$2,1 \times 10^7$	$2,1 \times 10^7$	$2,1 \times 10^7$	$2,1 \times 10^7$	$2,1 \times 10^8$	
Площадь поперечного сечения A , м ²	0,012	-	-	-	-	0,0219	
Шаг, м	8	-	-	-	-	3,4	
Толщина, м	-	0,15	1,5	0,15	0,15	-	

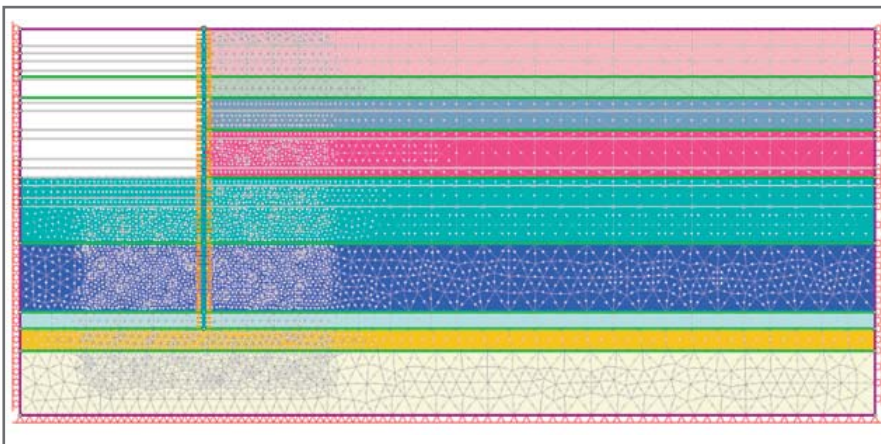


Рис. 3. Геометрия модели и сетка конечных элементов для заключительного этапа выемки грунта

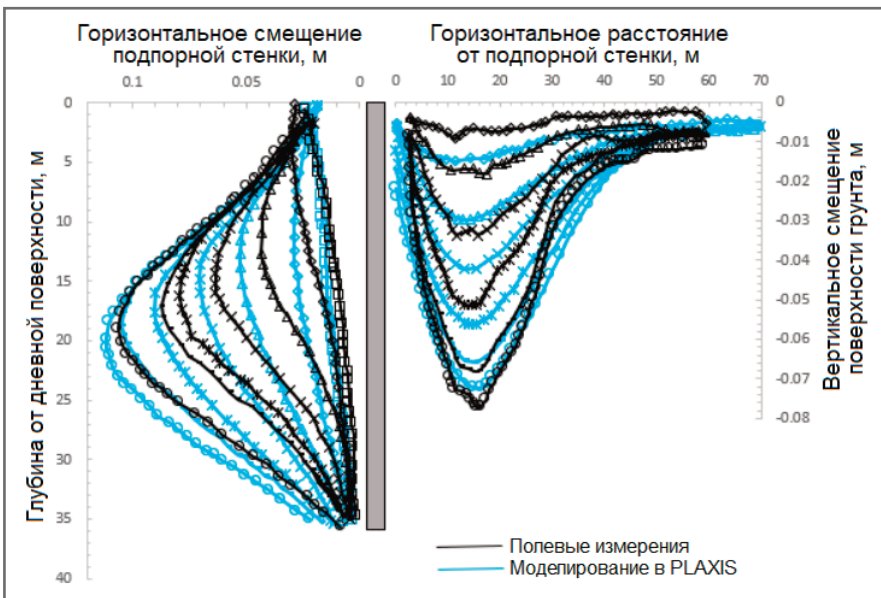


Рис. 4. Сопоставление данных полевых измерений и результатов моделирования в программе PLAXIS, выполненного авторами работы [6], по горизонтальным смещениям подпорной стенки внутрь котлована (слева) и по осадкам поверхности грунта, примыкающего к подпорной стенке снаружи от котлована (справа) для всех этапов выемки грунта

4. Были сооружены плиты перекрытий на глубине 0 м и на глубине 7,1 м. | Затем был вынут грунт до глубины 11,8 м.

5. Была сооружена плита перекрытия на глубине 10,3 м, после чего был вынут грунт до глубины 15,2 м.

6. Была сооружена плита перекрытия на глубине 13,7 м. Далее был вынут грунт до глубины 17,3 м.

7. На глубине 16,5 м были снова временно установлены стальные двутавровые балки в качестве горизонтальных распорок. Затем был вынут грунт до глубины 19,7 м.

После этого были устроены фундаментная плита и пол нижнего подземного этажа, а также выполнены финишные работы по формированию фундамента [5].

На рисунке 1 показан поперечный разрез проектируемого котлована с указанием стадий выемки грунта, уровней временных распорок и железобетонных плит подземных междуэтажных перекрытий и фундамента, а также соответствующих высотных отметок от дневной поверхности.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММЕ ROSSCIENCE RS2

Описание модели

Целью представленной работы являлся анализ поведения бортов рассмотренного выше котлована и окружающего грунта с помощью моделирования в программном комплексе Rocscience RS2. Результаты анализа (горизонтальных смещений подпорной «стены в грунте» и вертикальных смещений (осадок) поверхности окружающего грунта) были сопоставлены с данными полевых измерений и с результатами эквивалентного моделирования в программном комплексе PLAXIS.

Геологический разрез рассматриваемой площадки состоит из разных

слоев песчаных и глинистых грунтов. Было принято, что песчаные слои обладают высокой водопроницаемостью и ведут себя как дренируемые материалы. Их поведение моделировалось с применением комплексной геомеханической (конститутивной) модели Мора – Кулона с использованием показателей свойств, приведенных в таблице 1. Также было принято, что глинистые слои имеют низкую водопроницаемость и ведут себя как недренируемые материалы. Их нелинейное поведение моделировалось с применением конститутивной модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil, HS) с использованием параметров, представленных в таблице 2.

Чтобы установить в модели начальные поля напряжений и порового давления, рассматривалась начальная стадия, для которой было принято, что все материалы являются дренируемыми. Процесс нагружения начинался с устройства «стены в грунте», в результате чего поведение глинистых грунтов изменилось на недренированное.

Начиная с глубины 11,8 м слой глины был разделен на глубинах 17,3; 25,0 и 33,0 м. Соответственно, в этом диапазоне глубин было выделено четыре разных слоя, которые немного различались по параметрам. Для всех этих слоев использовалась конститутивная модель упрочняющегося грунта с параметрами, которые были взяты из ранее опубликованной статьи [6] других авторов.

Стена в грунте с глубиной заложения 35 м и толщиной 90 см и ее взаимодействие с прилегающими грунтами моделировались в RS2 при активировании опции Structural interface («Структурный интерфейс») с помощью опорных элементов и скользящих соединительных элементов, располагавшихся с каждой стороны между опорными элементами и элементами грунта (рис. 2). Коэффициент снижения прочностных свойств соединительного интерфейса из-за нарушения структуры грунта был принят равным 70% от прочности окружающего грунта.

Боковые опоры (временные стальные распорки и бетонные плиты междуэтажных перекрытий) были смоделированы в RS2 с помощью пружинных элементов (при активировании опции Springs в программе RS2), свойства которых перечислены в таблице 3. Величины их удерживающей способности в этой таблице отражены, однако окончательные значения жесткости пружин, которые использовались при

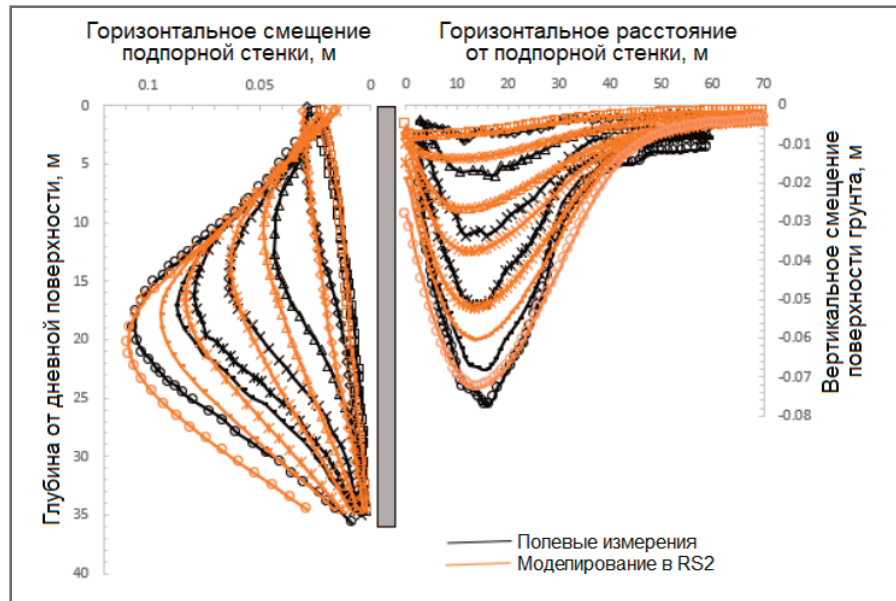


Рис. 5. Сопоставление данных полевых измерений и результатов моделирования в программе Rocscience RS2 [1] по горизонтальным смещениям подпорной стенки внутрь котлована (слева) и по осадкам поверхности грунта, примыкающего к подпорной стенке снаружи от котлована (справа) для всех этапов выемки грунта

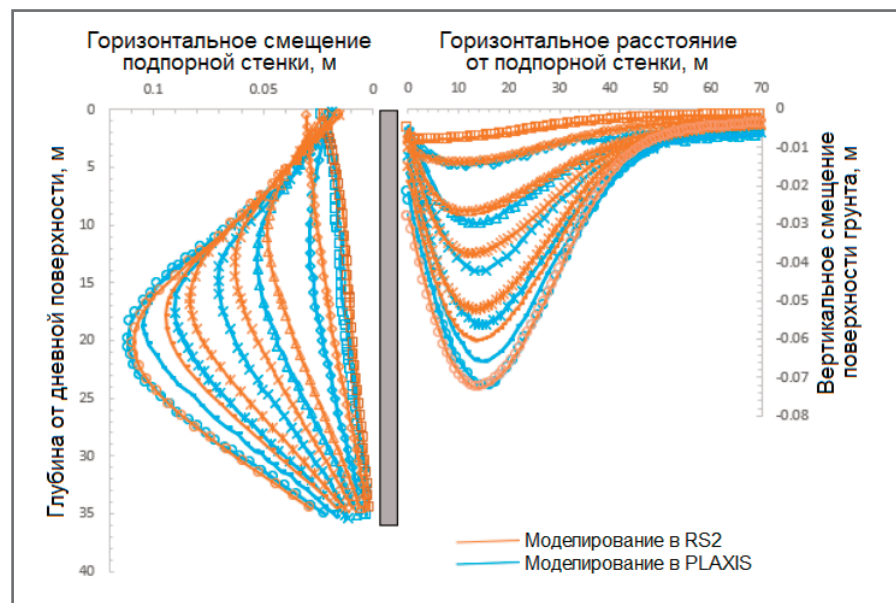


Рис. 6. Сопоставление результатов моделирования в программах Rocscience RS2 [1] и PLAXIS [6] по горизонтальным смещениям подпорной стенки внутрь котлована (слева) и по осадкам поверхности грунта, примыкающего к подпорной стенке снаружи от котлована (справа) для всех этапов выемки грунта

моделировании, были рассчитаны на основе понижающего коэффициента 20% применительно к каждой боковой опоре на основе рекомендации из статьи [6].

На каждом этапе выемки внутри периметра «стены в грунте» выполнялось водопонижение с поддержанием уровня грунтовых вод на 1 м ниже дна котлована. Геометрия, слои грунта и сетка конечных элементов на последнем этапе земляных работ представлены на рисунке 3. Видно, что сетка стужается вокруг зоны выемки

грунта. Это было сделано для повышения точности расчетов.

Полученные результаты ►

Измеренные и смоделированные (в Rocscience RS2 [1] и PLAXIS [6]) горизонтальные смещения подпорной стенки внутрь котлована и осадки поверхности грунта, примыкающего к подпорной стенке снаружи от котлована, сопоставлены в разных сочетаниях на рисунках 4–7.

Из рисунков 4–7 видно, что численные расчеты на основе моделирования

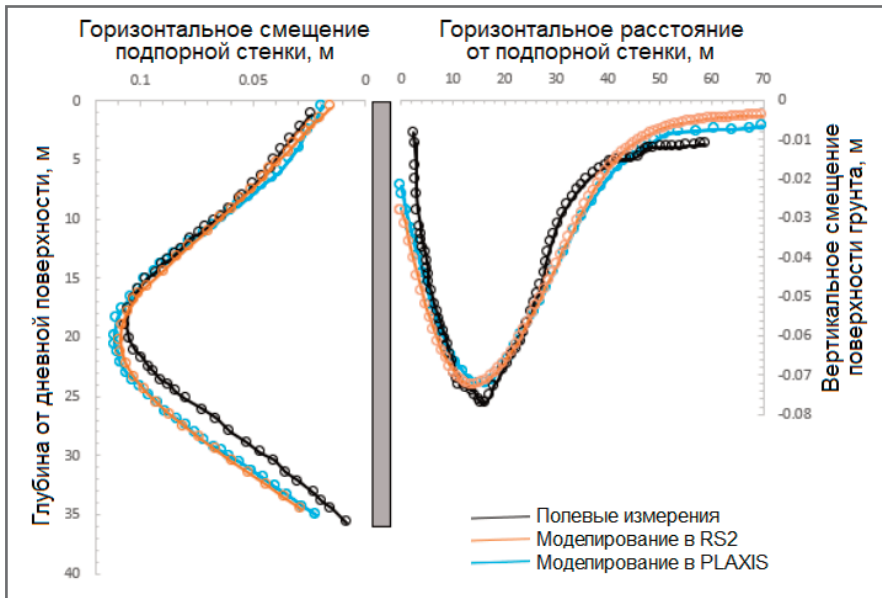


Рис. 7. Сопоставление данных полевых измерений и результатов моделирования в программах Rocscience RS2 [1] и PLAXIS [6] по горизонтальным смещениям подпорной стенки внутрь котлована (слева) и по осадкам поверхности грунта, примыкающего к подпорной стенке снаружи от котлована (справа), для заключительного этапа выемки грунта

в программах Rocscience RS2 [1] и PLAXIS [6] дали очень близкие друг к другу результаты, которые одинаково хорошо

соответствовали данным полевых измерений на всех этапах выемки грунта при строительстве котлована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено исследование устройства глубокого котлована в слоях глинистых (преимущественно) и песчаных грунтов для строительства здания Тайбэйского национального центра предпринимательства. Выполнялось численное моделирование в конечноэлементной программе Rocscience RS2 с использованием комплексной геомеханической (конститутивной) модели упрочняющегося грунта для глин и конститутивной модели Мора – Кулона для песков. Для глин моделировалось поведение в недrenированных условиях, для песков – в дренированных.

Полученные результаты показали, что с помощью конечноэлементного моделирования в программах Rocscience RS2 [1] и PLAXIS [6] можно одинаково успешно прогнозировать прогибы подпорной стенки и осадки грунта во время земляных работ. Их величины были очень близки друг к другу для этих двух инструментов даже при таком сложном многоэтапном моделировании, какое было рассмотрено.

Источники

1. Undrained analysis of a deep excavation in clayey soils using PLAXIS Hardening Soil model in RS2 // Rocscience.com. 13 March 2023. URL: rocscience.com/learning/undrained-analysis-for-deep-excavation-in-clayey-soils-using-rs2?utm_source=rocnews&utm_medium=email&utm_campaign=March2023.
2. RS2 // Advanced Survey Technologies (ООО «Современные изыскательские технологии»). 2022. URL: geoast.pro/rs2.
3. RS2 // Rocscience. 2022. URL: rocscience.com/software/rs2.
4. Ou C.-Y., Shiau B.-Y., Wang I.-W. Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history // Canadian Geotechnical Journal. 2000. Vol. 37. № 2. P. 438–448. DOI:10.1139/t00-018.
5. Метод «топ-даун» в строительстве. // Топ-рейтинги. 01.11.2022. URL: topreytings.ru/metod-top-daun-stroitel-stvo/
6. Lim A., Ou C.-Y., Hsieh P.-G. Evaluation of soil constitutive models for analysis of deep excavation under undrained condition // Journal of GeoEngineering. 2010. Vol. 5. № 1. P. 9–20. DOI:10.6310/jog.2010.5(1).2.

References

1. Undrained analysis of a deep excavation in clayey soils using PLAXIS Hardening Soil model in RS2. Rocscience web site. 13 March 2023. URL: rocscience.com/learning/undrained-analysis-for-deep-excavation-in-clayey-soils-using-rs2?utm_source=rocnews&utm_medium=email&utm_campaign=March2023.
2. RS2. Advanced Survey Technologies web site (ООО “Sovremennyye Izyskatel'skiye Tehnologii” web site). 2022. URL: geoast.pro/rs2 (in Rus.).
3. RS2. Rocscience web site. 2022. URL: rocscience.com/software/rs2.
4. Ou C.-Y., Shiau B.-Y., Wang I.-W. Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37 (2): 438–448. DOI:10.1139/t00-018.
5. Metod «top-daun» v stroitel'stve [The "top-down" method in construction]. Top-reitings web site. 01.11.2022. URL: topreytings.ru/metod-top-daun-stroitel-stvo/ (in Rus.).
6. Lim A., Ou C.-Y., Hsieh P.-G. Evaluation of soil constitutive models for analysis of deep excavation under undrained condition. Journal of GeoEngineering, 2010, 5 (1): 9–20. DOI:10.6310/jog.2010.5(1).2.