

УДК 624.131

М.А. Безгодов, С.В. КалошинаПермский национальный исследовательский
политехнический университет**ВЫБОР МОДЕЛИ ГРУНТА ПРИ ЧИСЛЕННОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ ГЛУБОКИХ
КОТЛОВАНОВ НА СУЩЕСТВУЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ**

Рассмотрена проблема выбора модели грунтового основания при расчете дополнительных осадок существующих зданий численными методами. Описаны технологии устройства глубоких котлованов в условиях плотной городской застройки.

Ключевые слова: существующее здание, новое строительство, глубокий котлован, модель Мора–Кулона, модель упрочняющегося грунта, дополнительная осадка.

Современное интенсивное развитие городов требует создания новых автостоянок, транспортных развязок, офисных помещений, торгово-развлекательных центров. Из-за достаточно плотной застройки крупных городов, в частности г. Перми, здания строят преимущественно высотные без развитой подземной части, что разрушает сложившийся веками архитектурный облик города. В связи с этим при строительстве зданий в городских условиях необходимо максимально эффективно использовать подземное пространство.

При строительстве в плотных городских условиях на разных этапах возведения нового здания существующие здания могут получить деформации, которые называются дополнительными деформациями. К ним относятся строительные-технологические деформации, деформации от загрузки грунтового массива новым зданием и эксплуатационные деформации [1, 2]. Цель данной работы – оценка строительной-технологической деформации, вызванной разработкой грунта при устройстве котлована вблизи здания.

Возведение подземных частей зданий и сооружений с развитой подземной частью в плотных городских условиях осуществляют в основном по следующим технологиям открытым, полужакрытым и комбинированным способом [1, 5].

Открытый способ возведения здания заключается в устройстве котлована на полную глубину с последующим возведением конструкций подземной и надземной части здания «классическими» методами снизу–вверх. Технология устройства включает в себя следующие этапы:

1. Устройство ограждения.
2. Поярусная разработка грунта в котловане с устройством при необходимости креплений ограждения котлована.
3. Возведение непосредственно здания или сооружения.

Полузакрытый способ заключается в строительстве подземной части здания сверху–вниз, так называемый метод top-down. Суть метода заключается в том, что грунт в котловане разрабатывается под защитой перекрытий. Основные этапы возведения здания по методу top-down следующие:

1. Устройство ограждения котлована и постоянных или временных (демонтируемых после строительства) опор, поддерживающих перекрытия.
2. Ведение разработки грунта с поверхности земли и до необходимой отметки экскавации.
3. Устройство фундамента здания, демонтаж временных опор и возведение надземной части.

Комбинированный метод сочетает в себе полузакрытый способ и открытый способ. Суть метода заключается в том, что по периметру котлована строительство ведется по top-down, а в центральной части – открытым методом. Чаще всего данный метод применяется для широких котлованов.

При разработке котлована открытым способом ограждение котлована закрепляют: распорными конструкциями, подкосными креплениями и анкерными креплениями. При полузакрытом способе в качестве распорок задействованы перекрытия. В обеих технологиях возможно применение технологии jet-grouting, с помощью которой создают плиту по дну котлована, которая играет роль распорной конструкции и противофильтрационной завесы. Устройство плиты jet-grouting осуществляется до начала разработки грунта в котловане путем нагнетания на необходимую глубину цементного раствора под высоким давлением, в результате чего образовывается горизонтальная плита из сескующихся грунтоцементных колонн.

Выбор технологии осуществляется в процессе проектирования здания из условия безопасного возведения самого здания

и сохранности окружающей застройки в первоначальном виде. Сложность решения задач такого проектирования заключается в том, что необходимо учесть многочисленные исходные данные: различную этажность окружающей застройки, различные расстояния от нового здания до существующих зданий, неравномерное залегание грунтов, сложную конфигурацию и конструктивную схему подземной части, поэтапное строительство подземной части и т.д. Ручной аналитический расчет в данной ситуации будет трудоемок и потребует значительного количества времени, поэтому широко применяются численные методы моделирования в специализированных геотехнических программных комплексах.

Существует несколько специализированных геотехнических программных комплексов: Plaxis, FLAC (Itasca Company), FEMmodels, GeoSoft, midas GTS, Z-soil и др. Наиболее распространенным в России и за рубежом является программный комплекс Plaxis 2D. В основе данного комплекса лежит метод конечных элементов, суть которого заключается в разбиении сплошной среды (конструкции или грунта в целом) на области (конечные элементы), в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора выбранных функций, представляющих напряжения и перемещения в указанной области.

Моделирование грунта в Plaxis 2D осуществляется в основном с использованием моделей: Мора–Кулона (МК) и модели упрочняющегося грунта (УГ) (Hardening Soil). Чаще всего на практике инженерами-проектировщиками применяется простая упругопластическая модель Мора–Кулона, из-за доступности входных параметров, которые содержатся в любом стандартном отчете по инженерно-геологическим изысканиям: модуль общей деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент Пуассона. Модель Мора–Кулона представляет собой приближение «первого порядка» для поведения грунта. Эту модель рекомендуется применять для приближенных расчетов. В данной модели жесткостные параметры грунта (модуль деформации грунта и коэффициент Пуассона) принимаются постоянными величинами [3].

Модель упрочняющегося грунта – это усовершенствованная упругопластическая модель, в которой предельное напряженное состояние задается как и в модели Мора–Кулона (угол внутреннего трения, удельное сцепление и угол дилатансии), а жесткость грунта задается более точно с использованием трех вход-

ных параметров: секущего модуля деформации при стандартном испытании грунта на трехосное сжатие при возможности дренирования (E_{50}); касательного модуля деформации при первичном нагружении в одометре (E_{oed}); модуля деформации при разгрузке – повторном нагружении (E_{ur}). По сравнению с моделью Мора–Кулона, в данной модели учитывается зависимость параметров E_{50} , E_{oed} , E_{ur} от уровня напряжения в грунтовом массиве. Параметры грунтовой модели определяются преимущественно по результатам трехосных испытаний [3].

Рассмотрим тестовую задачу численного моделирования влияния разработки глубокого котлована на существующую застройку с использованием различных моделей грунта. Грунтовое основание было принято осредненное типичное для г. Перми [4] и представлено суглинками тугопластичными, подстилаемыми малосжимаемыми аргиллитами. Мощность суглинков, принятая в расчетах, составляет 20 м. Расчет выполнялся в программе Plaxis 2D с использованием моделей Мора–Кулона и упрочняющегося грунта. При расчете с помощью модели Мора–Кулона входные параметры принимались по данным инженерно-геологических изысканий [4]:

Объемный вес грунта γ_{unsat} , кН/м ³	19
Удельное сцепление c_{ref} , кПа	18
Угол внутреннего трения ϕ , град	19
Коэффициент Пуассона ν	0,35
Коэффициент снижения прочности в интерфейсах	0,5
Общий модуль деформации E_0 , МПа	10

Ввиду того, что в стандартных отчетах по инженерно-геологическим изысканиям не приводятся данные трехосного испытания грунта, в расчетах с использованием модели упрочняющегося грунта значения секущего модуля деформации E_{50} были приняты условно. Его варьирование осуществлялось в пределах от 5 до 15 МПа. Остальные характеристики грунта были приняты аналогично характеристикам, вводимым при расчете с использованием модели Мора–Кулона и рекомендациям [3].

Входные параметры для модели упрочняющегося грунта следующие:

Объемный вес грунта γ_{unsat} , кН/м ³	19
Удельное сцепление c_{ref} , кПа	18
Угол внутреннего трения ϕ , град	19

Коэффициент Пуассона при разгрузке ν_{ur}	0,2
Базовое давление p^{ref} , кПа.....	100
Коэффициент горизонтальных напряжений при нормальной консолидации, $K_0^{nc} = (1 - \sin \varphi)$	0,67
Показатель степенной зависимости жесткости от уровня напряжений m	0,8
Коэффициент снижения прочности в интерфейсах	0,5
Секущий модуль деформации при стандартном испытании грунта на трехосное сжатие при возможности дренирования E_{50}^{ref} , МПа	5/10/15
Касательный модуль деформации при первичном нагружении в одометре $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$, МПа	5/10/15
Модуль деформации при разгрузке – повторном нагружении $E_{ur}^{ref} = E_{50}^{ref}$, МПа	15/30/45

Таким образом, основная цель численного моделирования с использованием различных моделей грунта заключалась в получении качественной картины деформации грунтового массива при разработке глубокого котлована рядом с существующим зданием. Поскольку секущий модуль деформации E_{50} был принят условно, количественное сравнение зафиксированных осадок при расчете с использованием модели Мора–Кулона и модели упрочняющегося грунта не корректно.

В качестве существующего здания было принято 5-этажное здание с продольными несущими стенами на ленточном фундаменте. Средняя нагрузка на обрез фундамента от наружных стен составляла 250 кН/м, от несущих внутренних – 300 кН/м. Сечение фундаментов представлено на рис. 1. Глубина котлована была принята равной 9 м, с учетом возможности устройства 3 подземных этажей. В качестве ограждения котлована принята «стена в грунте». Ширина котлована составляла 12 м, расстояние от ограждения котлована до наружной стены здания – 3 м. Расчетная схема приведена на рис. 2.

Характеристики материала раскрепления ограждения котлована:

сечение трубы, мм	426×10
площадь сечения, м ²	0,013069
модуль упругости E , кПа.....	$2,1 \cdot 10^8$
нормальная жесткость EA , кН.....	$2,74 \cdot 10^6$
момент инерции I , м ⁴	$2,83 \cdot 10^{-4}$
шаг L , м	3

вес w , кН/м³78,5
 коэффициент Пуассона ν 0,28
 Другие характеристики материалов представлены в табл. 1, 2.

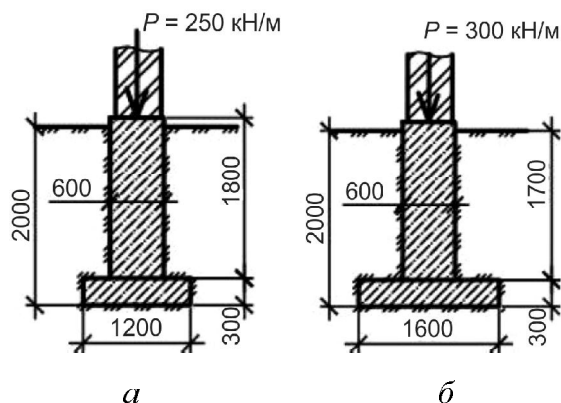


Рис. 1. Сечения фундаментов: *а* – под наружные стены, *б* – под внутреннюю стену

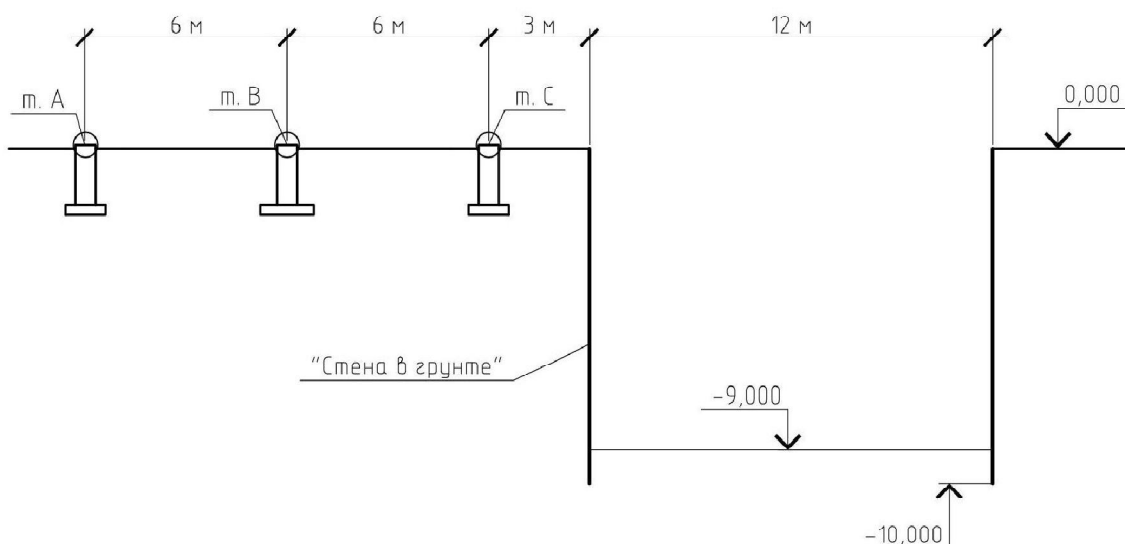


Рис. 2. Расчетная схема, принятая для численного моделирования

Таблица 1

Характеристики материалов фундамента и плиты jet-grouting

Параметр	Стены фундамента	Подшва фундамента	Плита jet-grouting
Модель материала	Линейная	Линейная	Линейная
Вес γ , кН/м ³	22	24	24
Модуль общей деформации E_0 , МПа	$1,5 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	100
Коэффициент Пуассона ν	0,17	0,17	0,17

Таблица 2

**Характеристики материала «стены в грунте»,
перекрытия и промежуточной опоры**

Параметр	«Стена в грунте»	Перекрытия	Промежуточная опора
Модуль упругости, кПа	$2 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^5$
Нормальная жесткость EA , кН	$1,2 \cdot 10^7$	$0,48 \cdot 10^7$	$3,93 \cdot 10^5$
Изгибная жесткость EI , кН·м ²	$3,6 \cdot 10^5$	$0,36 \cdot 10^5$	91
Эквивалентная толщина d , м	0,6	0,3	0,130
Вес w , кН/м/м (кН/м ³)	15 (25)	7,5 (25)	3,27 (25)
Коэффициент Пуассона ν	0,17	0,17	0,17

Было рассмотрено две технологии возведения подземной части:

1) открытым методом:

1-й способ: с тремя уровнями распорок, глубина заделки ограждения котлована ниже отметки дна на 1 м (рис. 3);

2-й способ: с тремя уровнями распорок и плитой jet-grouting по дну котлована толщиной 1 м (рис. 4);

2) полузакрытым методом:

1-й способ: с заделкой ограждения котлована ниже отметки дна на 1 м (см. рис. 5);

2-й способ: с устройством плиты jet-grouting по дну котлована толщиной 1 м (рис. 6).

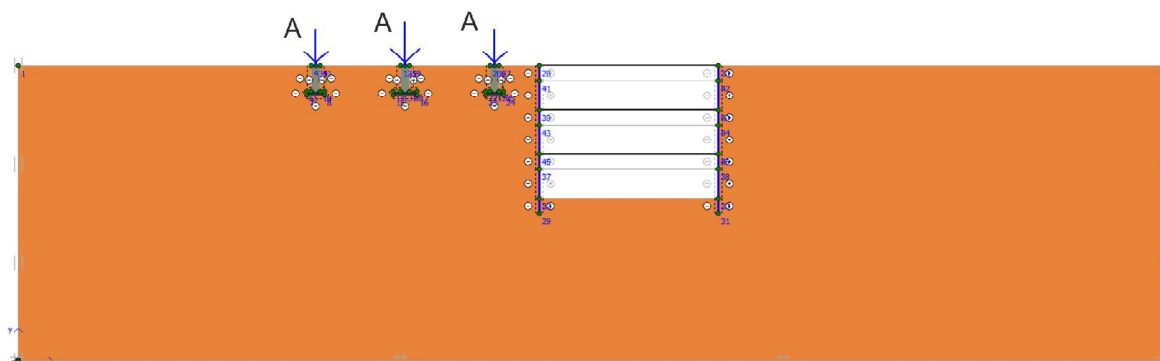


Рис. 3. Расчетная модель устройства котлована открытым методом 1-м способом (с заделкой ограждения котлована ниже дна)

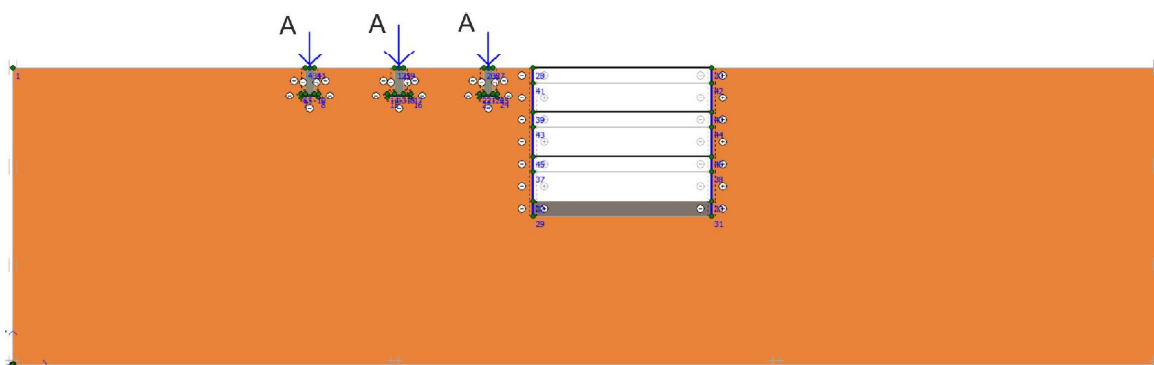


Рис. 4. Расчетная модель устройства котлована открытым методом 2-м способом (с устройством плиты jet-grouting по дну котлована)

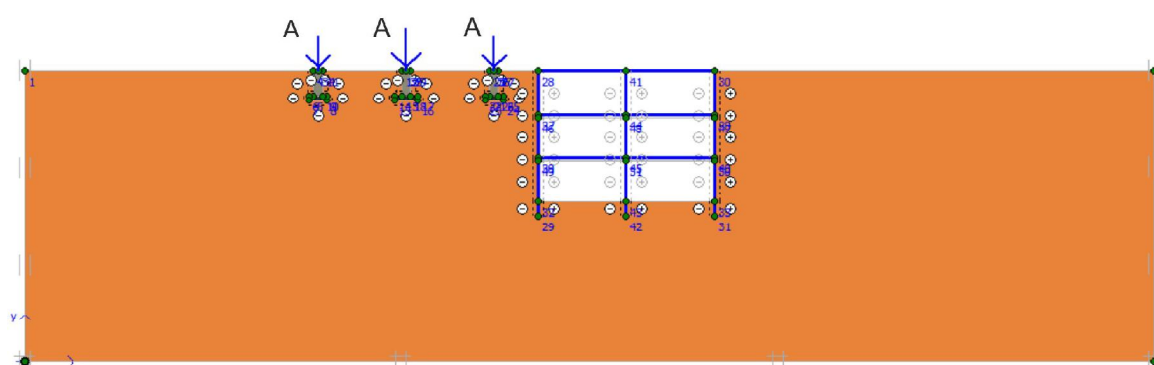


Рис. 5. Расчетная модель устройства котлована по top-down 1-м способом (с заделкой ограждения котлована ниже дна)

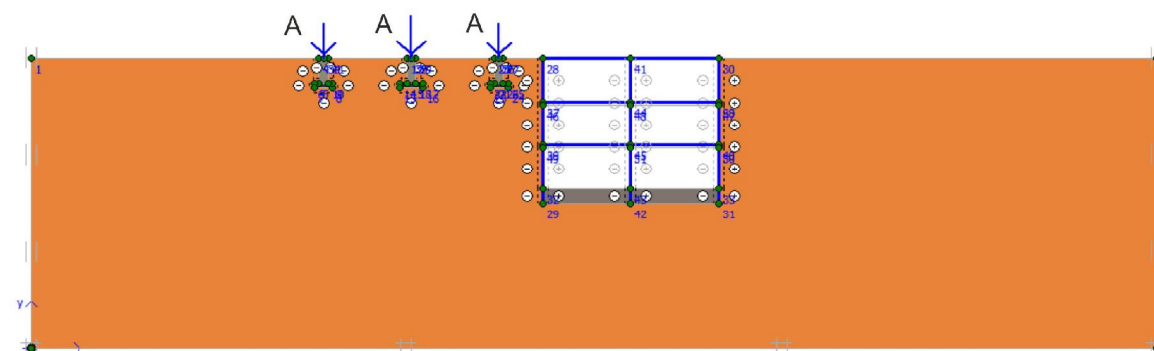


Рис. 6. Расчетная модель устройства котлована по top-down 2-м способом (с устройством плиты jet-grouting по дну котлована)

Дополнительная осадка фундаментов существующего здания была определена на обрезах фундаментов в расчетных точках А, В, С. Точки указаны на рис. 2. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Значение дополнительной осадки по модели Мора–Кулона

Технология возведения	Дополнительная осадка, мм, в расчетных точках		
	А	В	С
Открытый метод 1-й способ 2-й способ	-10	-14	-37
	-4	+2	+3
Top-down 1-й способ 2-й способ	-8	-12	-33
	-2	+3	+7

Таблица 4

Значение дополнительной осадки по модели упрочняющегося грунта (мм)

Секущий модуль деформации E_{50} , МПа	Открытый метод						Top-down					
	1-й способ			2-й способ			1-й способ			2-й способ		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
5	-21	-51	-94	-7	-15	-27	-23	-52	-94	-4	-7	-15
10	-9,4	-27	-59	-8	-14	-20	-13	-31	-59	-2	-4	-9
15	-9	-22	-45	-4	-10	-15	-10	-23	-45	-2	-3	-7

На основе выполненного численного моделирования с использованием модели Мора–Кулона (см. табл. 3) можно сделать следующие выводы:

1. При устройстве котлована с заделкой ограждения ниже дна котлована была зафиксирована дополнительная осадка фундамента существующего здания (рис. 7, а).

2. При устройстве котлована с плитой jet-grouting вместо ожидаемой осадки наблюдалось поднятие фундаментов существующего здания (рис. 7, б).

Поднятие фундамента существующего здания вызвано тем, что модель Мора–Кулона не учитывает увеличение модуля деформации с глубиной, а также изменение модуля деформации при разгрузке грунта. В результате, в процессе разработки грунта в котловане происходит разгрузка грунта, что приводит к значительному поднятию дна котлована и, как следствие, поднятию конструкций ограждения и окружающего грунтового массива. Данное явление особо заметно при устройстве плиты jet-grouting по дну котлована. При разработке котлована без плиты jet-grouting влияние поднятия дна котлована на дополнительную осадку существующей застройки менее заметно. Од-

нако полученные значения осадок могут быть занижены. При расчете с использованием модели упрочняющегося грунта данного явления не наблюдалось (рис. 8).

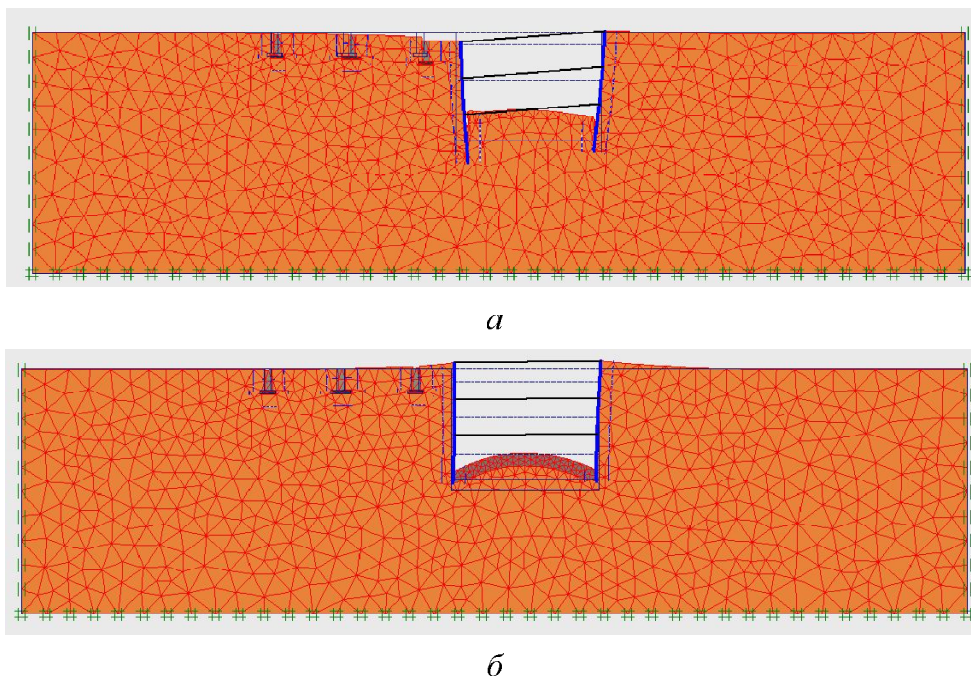


Рис. 7. Деформированная схема грунтового основания при расчете по модели Мора–Кулона открытым методом: *а* – 1-м способом; *б* – 2-м способом

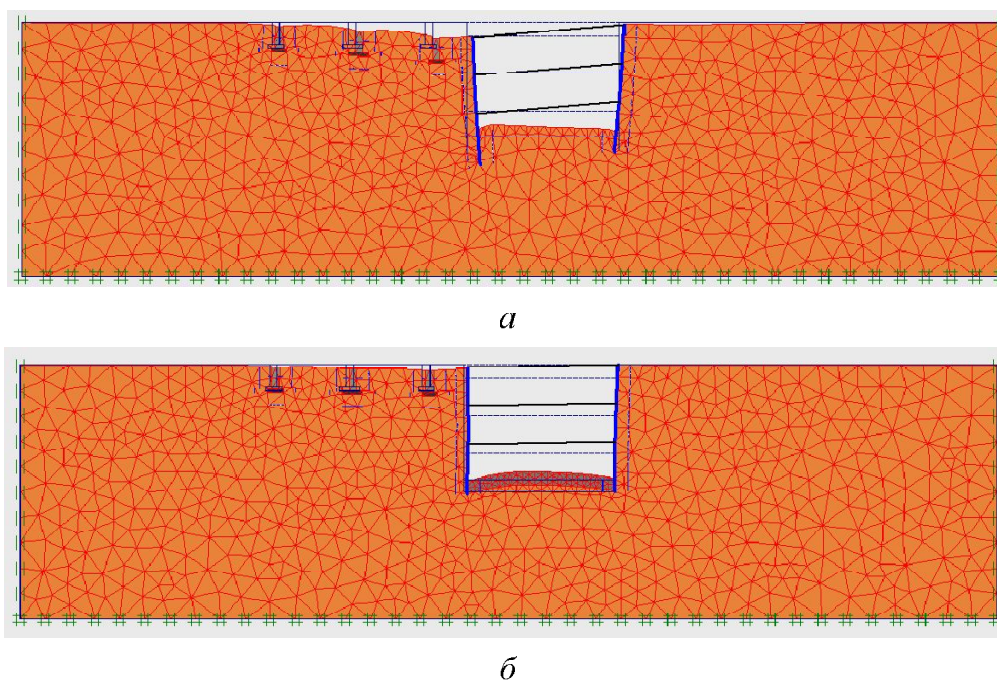


Рис. 8. Деформированная схема грунтового основания при расчете по модели упрочняющегося грунта открытым методом: *а* – 1-м способом; *б* – 2-м способом

В целом расчет по модели упрочняющегося грунта дал более адекватные результаты (см. табл. 4). Однако необходимо заметить, что при изменении текущего модуля деформации E_{50} наблюдалось значительное изменение дополнительной осадки. В связи с этим применять модель упрочняющегося грунта следует только при наличии достоверных характеристик грунтов, определенных в приборах трехосного сжатия.

Библиографический список

1. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений: учеб. пособие / под ред. Б.И. Далматова. – 2-е изд. – М.: Изд-во АСВ; СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2001. – 440 с.
2. Проектирование и возведение фундаментов вблизи существующих сооружений: (Опыт строительства в условиях Северо-Запада СССР) / под ред. С.Н. Сотникова. – М.: Стройиздат, 1986. – 96 с.
3. Brinkgreve R.B.J., Broere W., Waterman D. Plaxis 2D-version 9. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. User Manual. – Rotterdam: Balkema, 2008.
4. Калошина С.В., Пономарев А.Б. Об инженерно-геологических условиях строительства г. Перми // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию БашНИИСтроя: в 3 т. – Уфа, 2006. – Т. 2. – С. 119–124.
5. Петрухин В.П., Колыбин И.В., Разводовский Д.Е. Ограждающие конструкции котлованов, методы строительства подземных и заглубленных сооружений [Электронный ресурс] // Инж.-консульт. центр проблем фундаментостроения. – URL: <http://www.ecsrf.com/upload/publikazii/Ograzhdenija%20kotlovanov.pdf> (дата обращения: 17.02.2010).

Получено 2.03.12