



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 2, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.03

УДК 624.15

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА МКЭ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛОСКОСТЕЙ СИММЕТРИИ В ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

Р.В. Мельников, Е.П. Брагарь

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 января 2020
Принята: 18 марта 2020
Опубликована: 30 июня 2020

Ключевые слова:

численное моделирование, МКЭ, плоскости симметрии, MIDAS GTS NX, модель Мора – Кулона, граничные условия, Hardening Soil model.

АННОТАЦИЯ

При расчетах различных геотехнических объектов (фундаментов уникальных зданий, свайных ростверков, плитных фундаментов, насыпей и пр.) часто приходится упрощать геометрическую модель. Одним из возможных способов такого упрощения, не снижающих детализацию модели, является применение принципов симметрии. Актуальным вопросом при использовании плоскостей симметрии является оценка точности результатов расчета. В статье проведено исследование такой оценки для двух традиционных геотехнических задач: плитного фундамента мелкого заложения и ограждения глубокого котлована. Выполнена серия расчетов с различными вариантами использования плоскостей симметрии: полномасштабная модель, использование одной плоскости симметрии, использование двух плоскостей симметрии; различия в способах представления строительных конструкций – пластинчатыми и объемными континуальными элементами.

При генерации сетки конечных элементов учитывалось, что степень измельчения сетки оказывает существенное влияние на точность результатов расчета, вследствие чего сетка конечных элементов была разделена на две области: область «интереса» представлена малыми по размеру элементами, «периферийная» область создана элементами более крупного размера. В расчете учитывалась последовательность выполнения технологических процессов: начальный этап расчета – создание начального напряженного состояния, следующий этап – создание конструкции (фундаментная плита, ограждение котлована), завершающий этап – приложение силового воздействия.

Результаты расчета оценивались по критериям, относящимся ко второй группе предельных состояний. Контролируемыми параметрами для плитного фундамента мелкого заложения являлись: максимальная и средняя осадки, относительная разность осадок; для глубокого котлована с консольным ограждением – максимальное перемещение ограждающей конструкции. Было выявлено, что при представлении конструкции в виде плитных элементов необходимо введение дополнительных граничных условий, запрещающих поворот, в узлах, находящихся на плоскости симметрии. В статье сделаны выводы и приведены рекомендации для создания расчетных моделей при использовании плоскостей симметрии.

© ПНИПУ

© Мельников Роман Викторович – кандидат технических наук, доцент, OrcidID: 0000-0002-8369-3206, e-mail: melnikovrv@tyuiu.ru.

Брагарь Елена Петровна – магистрант, OrcidID: 0000-0003-1212-6324, e-mail: bragarep@tyuiu.ru.

Roman V. Melnikov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, OrcidID: 0000-0002-8369-3206, e-mail: melnikovrv@tyuiu.ru.

Elena P. Bragar – Master Student, OrcidID: 0000-0003-1212-6324, e-mail: bragarep@tyuiu.ru.

ASSESSMENT OF FEM CALCULATION RESULTS ACCURACY WITH THE USE OF SYMMETRY PLANES IN GEOTECHNICAL PROBLEMS

R.V. Melnikov, E.P. Bragar

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 January 2020
Accepted: 18 March 2020
Published: 30 June 2020

Keywords:

numerical modeling, FEA, symmetry planes, MIDAS GTS NX, Mohr-Coulomb model, boundary conditions, Hardening Soil model.

ABSTRACT

To calculate different geotechnical objects (foundations of unique buildings, pile foundation grillages, slab foundations, embankments, etc.) we often need to simplify geometric model. Use of symmetry principles allows to simplify the model without reducing its detail. A relevant issue with the use of symmetry planes is the assessment of calculation results accuracy. The article considers the research of such an assessment for two traditional geotechnical problems: a shallow foundation slab and a shoring of deep excavation. Calculations have been performed with various options of symmetry planes usage: a full-scale model, using one symmetry plane, using two symmetry planes; differences in the ways of representing building structures: 2D and 3D continuum elements.

Generating the finite element mesh, we took into account the fact, that the degree of mesh grinding significantly influence the accuracy of the calculation results. That's why the finite element mesh was divided into two areas: the area of «interest» represented by small sized elements, and the «peripheral» area created by larger elements. We also considered the sequence of technological processes: the initial stage of the calculation is the creation of the initial stress state, the next stage is the creation of the structure (foundation slab, shoring of excavation), the final stage is the force application.

The calculation results were evaluated according to the criteria related to the second group of limit states. The controlled parameters for the shallow foundation slab were: maximum and average settlement, relative difference of settlements; for the shoring of deep excavation – the maximum displacement of the enclosure structure. It was found out that to present the construction in the form of 2D-elements it is necessary to introduce additional boundary conditions. They prevent rotation in nodes located on the plane of symmetry.

The authors make conclusions and recommendations for creating design models with the use of symmetry planes.

© PNRPU

Введение

При проведении численных расчетов в строительстве наиболее распространенным является метод конечных элементов (МКЭ). При этом специалистов, использующих его для решения геотехнических задач, существенно меньше, чем применяющих для расчета различных строительных конструкций. Причиной этому является то, что использование МКЭ в геотехнике требует намного больше времени и затрат, чем «традиционные» геотехнические методы расчета или упрощенное их решение в неспециализированных геотехнических программах.

При этом использование МКЭ в геотехнике не гарантирует точности расчета, из-за отсутствия большой вероятности ошибки, связанной со сложностью программного обеспечения, точностью определения входных параметров, выбором модели грунта и других особенностей расчета. Перед использованием МКЭ необходимо проанализировать большой объем исходных данных, содержащих информацию: об объекте строительства (схематизированные различным образом и степень проработки проектные решения); о грунтах (отчет об инженерно-геологических или геотехнических изысканиях); об истории исследуемой территории (для формирования современного напряженного состояния грунтового основания); о существующих зданиях и сооружениях (для оценки влияния на них и от них).

Для создания расчетной модели должен быть определен вид решаемой задачи: пространственная или двумерная (плоская деформация или осесимметричная), так как они

существенно различаются. Использование пространственной модели увеличивает время ее создания из-за необходимости подробного учета данных о геометрии (высота, длина, пролет) и силовых воздействиях (сосредоточенные и распределенные нагрузки). Для минимизации времени проведения расчета необходимо стремиться к максимальному упрощению геометрии без ущерба точности, путем поиска компромисса между детализацией и скоростью расчета.

Одним из возможных способов, не снижающих детализацию расчетной модели, но и не увеличивающих время расчета, является использование осей или плоскостей симметрии. Трехмерная геометрия расчетной модели, обладающая осевой симметрией, упрощается до двумерной плоскости, а обладающая плоскостной симметрией – упрощается до половины или даже четверти исходной геометрии (с двумя плоскостями симметрии). Двумерная модель плоской деформации с осевой симметрией упрощается вполнину.

При проведении геотехнических расчетов МКЭ следует учитывать, что кроме геометрической симметрии, относительно оси или плоскости, должна соблюдаться силовая (для характера и значений всех силовых воздействий), жесткостная (для свойств всех материалов) и технологическая симметрия (для этапов строительства, технологии и сроков производства работ). Только при совместном соблюдении всех четырех симметрий (геометрическая, силовая, жесткостная, технологическая) можно воспользоваться плоскостью или осью симметрии.

Принципы симметрии очень популярны и используются для расчетов различных геотехнических объектов: фундаментов уникальных зданий – башня «Эволюция» ММДЦ «Москва-Сити» [1] и башня Messeturm во Франкфурте-на-Майне (Германия) [2, 3]; свайных ростверков; плитных фундаментов; насыпей, а также при проведении научных исследований, описанных в работах [4–16].

1. Постановка задачи

Использование в МКЭ принципов симметрии при проведении геотехнических расчетов не является исключением или редким случаем, что подтверждается различными публикациями, в том числе расчетами реальных объектов. Однако в публикациях не содержатся сведения о проведении предварительных расчетов, связанных с оценкой точности их результатов в сравнении с полноразмерными расчетными моделями. Таким образом, использование принципов симметрии в основном имеет доверительную достоверность точности расчетов. Следует помнить, что при проектировании требуется учитывать совместную работу системы «основание – фундамент – сооружение», регламентированную обязательными нормативными документами: Федеральным законом № 384, СП 22.13330 и СП 248.1325800, что в обязательном порядке требует понимания точности проводимого расчета.

Для оценки точности результатов расчета при использовании плоскостей симметрии были проведены численные исследования с двумя основными типами геотехнических задач: плитным фундаментом мелкого заложения и глубоким котлованом с консольным ограждением. Обе задачи были решены в пространственной постановке (3D) и обладали двумя плоскостями симметрий, с условием, что каждая плоскость обладала полным набором свойств симметрий, описанных ранее. Схема проведения исследования представлена на рис. 1, изучались различные варианты использования плоскостей симметрии: полномасштабная модель, использование одной плоскости симметрии, использование двух

плоскостей симметрии; различия в способах представления строительных конструкций: пластинчатыми и объемными континуальными элементами. Преимуществом использования данной схемы исследования является дополнительная оценка точности расчета при различном моделировании конструкции.

2. Численное моделирование

Для оценки точности результатов расчета при использовании плоскостей симметрии использовалось специализированное программное обеспечение MIDAS GTS NX версии 2019.1.1.

2.1. Описание расчетных моделей

Ниже приведено описание расчетных моделей двух решаемых задач с указанием геометрических размеров, силовых воздействий и используемых моделей:

1. Плитный фундамент мелкого заложения толщиной 1,0 м прямоугольной формы в плане с размерами 10,0×10,0 м находится на поверхности однородного грунтового массива с размерами в плане 70,0×70,0 м и глубиной 30,0 м (рис. 1). Для описания поведения грунта, в соответствии с п. 8.8.10 СП 248.1325800, использовалась модель упруго-идеальнопластической среды с критерием прочности Мора – Кулона и ассоциированным законом пластического течения (Mohr-Coulomb model) [17], значения ее параметров приведены в табл. 1. Нагрузка на фундаментную плиту задавалась равномерно распределенной, равной 200 кН/м².

2. Глубокий котлован прямоугольной формы в плане с размерами 20,0×20,0 м и глубиной 7,0 м с консольным ограждением толщиной 1,0 м и глубиной 15,0 м. Котлован устраивался с поверхности однородного грунтового массива с размерами в плане 110,0×110,0 м и глубиной 40,0 м (рис. 1). Для описания поведения грунта, в соответствии с п. 8.8.10 СП 248.1325800, использовалась упругопластическая модель с изотропным упрочнением (Hardening Soil model) [17], значения ее параметров представлены в табл. 1.

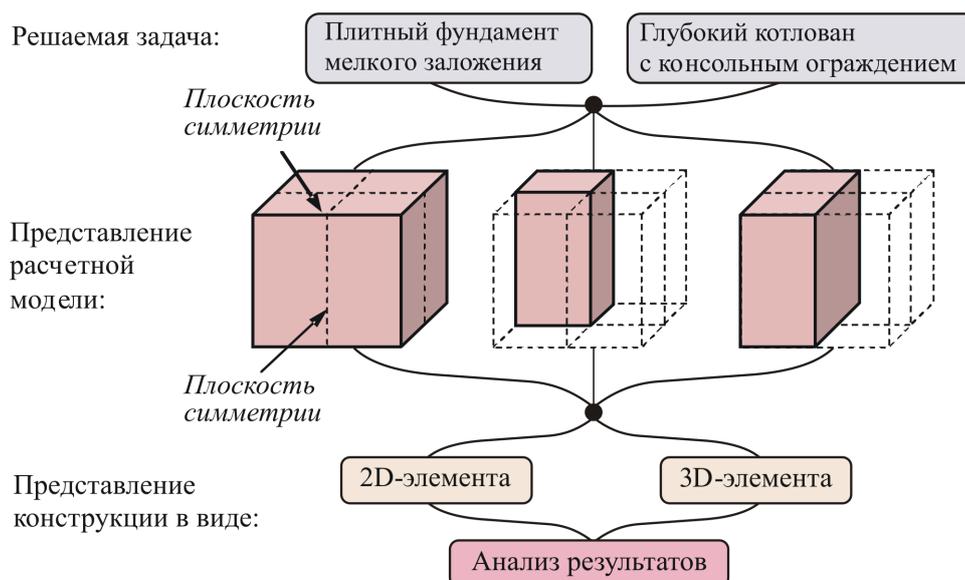


Рис. 1. Принципиальная схема проведения исследования

Fig. 1. Principle diagram of the research

Для обеих решаемых задач для описания работы конструкций (плита, ограждение котлована) использовалась упругая модель материала (Elastic model) [17], значения ее параметров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Используемые модели и их параметры

Table 1

Used models and their parameters

Символ	Название	Ед. изм.	Модель материала		
			Mohr-Coulomb	Hardening Soil	Elastic
E_{50}^{ref}	Модуль деформации E_{50} при референсном (опорном) давлении	кН/м ²	–	15 000	–
E_{ur}^{ref}	Модуль упругой деформации E_{ur} при референсном (опорном) давлении	кН/м ²	–	45 000	–
E_{oed}^{ref}	Одометрический модуль деформации при референсном (опорном) давлении	кН/м ²	–	15 000	–
p^{ref}	Референсное (опорное) давление	кН/м ²	–	100	–
ν (nu)	Коэффициент Пуассона	–	0,35	0,35	0,2
c	Удельное сцепление	кН/м ²	5	5	–
ϕ (phi)	Угол внутреннего трения	град	20	20	–
ψ (psi)	Угол дилатансии		0	0	–
γ (gamma)	Удельный вес	кН/м ³	19	19	24
E'	Модуль деформации (упругости)	кН/м ²	15 000	–	30 000 000

Созданная геометрическая модель заменялась эквивалентной сеткой конечных элементов с представлением грунта объемными континуальными элементами [18]. Учитывая, что степень измельчения сетки оказывает существенное влияние на точность результатов расчета, при генерации сетки конечных элементов была выделена область «интереса», включающая конструкции и прилегающий к ним грунтовый массив, созданная малыми по размеру элементами, и периферийная область, находящаяся за пределами области «интереса» и созданная элементами более крупного размера [19].

Создание полноразмерной конечно-элементной модели выполнялось последовательно, т.е. изначально была создана конечно-элементная модель, обладающая двумя плоскостями симметрии (четверть полноразмерной модели). Затем относительно одной из плоскостей симметрии была создана (отражена) ее зеркальная копия для получения половины полноразмерной модели, затем производилось последнее создание (отражение) для получения полноразмерной модели. Таким образом, полученные модели (четверть, половина и полноразмерная) наследовали плотность и структуру сеток конечных элементов.

При использовании конечных элементов тетраэдрической формы их максимальный размер в области «интереса» составлял 0,5 м, а в периферийной области – 2,0 м (рис. 2).

2.2. Этапы расчета

Прочность и жесткость грунта, обладающего внутренним трением, будет зависеть от внутренних напряжений. Поэтому поведение грунта под нагрузкой зависит от напряженного состояния. Дополнительно необходимо учитывать последовательность технологиче-

ских процессов, так как она существенно влияет на формирование напряжений и поведение грунта. Текущее напряженное состояние и этапность расчета не могут быть проигнорированы из-за нелинейного поведения грунтов.

Начальным этапом данного расчета, как и любого другого геотехнического расчета МКЭ, является создание начального напряженного состояния, что является одной из особенностей, отличающей геотехнические расчеты от других инженерных. На следующем этапе создавалась конструкция (фундаментная плита, ограждение котлована) и затем на завершающем этапе – приложение силового воздействия (равномерно распределенная нагрузка для плитного фундамента, откопка для глубокого котлована).

В настройках решателя указывалось значение максимальной ошибки равновесия, равной 0,5 %. Для решения использовался итерационный метод Ньютона – Рафсона [20].

2.3. Результаты и анализ расчета

При проведении расчетов по схемам (см. рис. 1, 2) было выявлено, что при представлении конструкции в виде плитных элементов потребовалось введение дополнительных граничных условий по ее узлам, находящимся на плоскости симметрии, запрещающих поворот. Введение в расчетную модель дополнительных граничных условий потребовалось для восприятия изгибающих моментов плитным элементом и запрета появления шарнира, что обосновано с точки зрения моделирования работы сплошной конструкции.

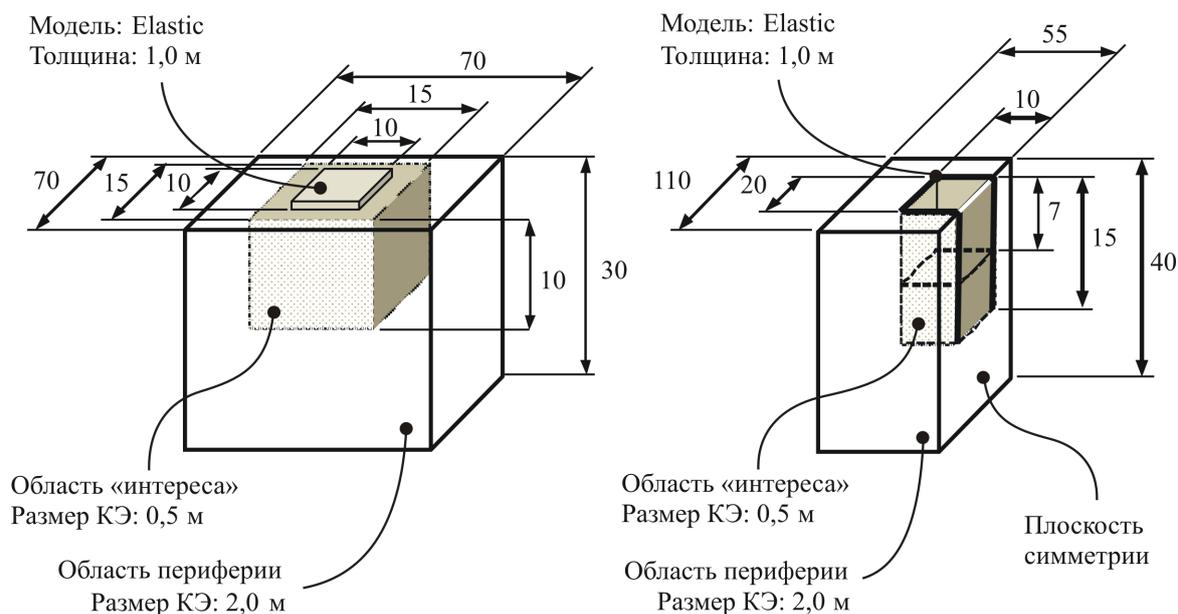


Рис. 2. Схемы расчетных моделей
Fig. 2. Schemes of design models

Результаты расчета оценивались по критериям, относящимся ко второй группе предельных состояний. Контролируемыми параметрами для плитного фундамента мелкого заложения, в соответствии с СП 22.13330, являлись: максимальная (s^{\max}) и средняя (\bar{s}) осадки, относительная разность осадок ($\Delta s/L$); для глубокого котлована с консольным ограждением – максимальное перемещение ограждающей конструкции (U_{\max}). Значения контрольных параметров по результатам расчета приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Значение контрольных параметров при моделировании фундаментной плиты

Table 2

The value of the control parameters when modeling the foundation slab

Размер модели	Представление конструкции в виде								
	2D-элементов						3D-элементов		
	без дополнительных связей на оси симметрии			с дополнительными связями на оси симметрии					
	S_{\max} , мм	\bar{S} , мм	$\frac{\Delta s}{L}$	S_{\max} , мм	\bar{S} , мм	$\frac{\Delta s}{L}$	S_{\max} , мм	\bar{S} , мм	$\frac{\Delta s}{L}$
1/4	184,04	144,43	0,0112	139,64	139,42	0,0001	140,09	139,47	0,0002
1/2	162,56	142,30	0,0036	139,85	139,43	0,0002	140,09	139,45	0,0002
1	140,05	139,41	0,0002	140,05	139,41	0,0002	140,09	139,44	0,0002

Таблица 3

Значение контрольных параметров при моделировании ограждения глубокого котлована

Table 3

The value of the control parameters when modeling the shoring of deep excavation

Размер модели	Представление конструкции в виде		
	2D-элементов		3D-элементов
	без дополнительных связей на оси симметрии	с дополнительными связями на оси симметрии	
	U_{\max} , мм	U_{\max} , мм	U_{\max} , мм
1/4	31,6107	30,637	10,7177
1/2	31,8334	30,4404	9,19289
1	30,068	30,068	9,17215

Оценка точности результатов расчета при использовании плоскостей симметрии проводилась относительно истинной геометрии, не упрощенной использованием плоскостей симметрии и пластинчатых элементов для представления конструкций, путем определения относительной погрешности для каждого контролируемого параметра. Сводные графики относительных погрешностей представлены на рис. 3, 4.

При анализе графиков относительных погрешностей (рис. 3, а, б) установлено, что использование плоскостей симметрии способно существенно повлиять на точность определения относительной разности осадок (см. табл. 2) при описании конструкции фундамента плитными элементами. Так, отсутствие дополнительных граничных условий на узлах конструкции, находящихся на плоскости симметрии, запрещающих поворот, приводит к появлению шарнира и снижению жесткости конструкции. В результате точность определения относительной разности осадок практически отсутствует, относительная погрешность составляет более 1000 %. Данная картина характерна только при использовании плоскостей симметрии и отсутствии дополнительных граничных условий, при этом их совместное использование существенно повышает точность определения относительной разности осадок, она не превышает 50 %. Для остальных контролируемых параметров относительная погрешность не превышает 3 %.

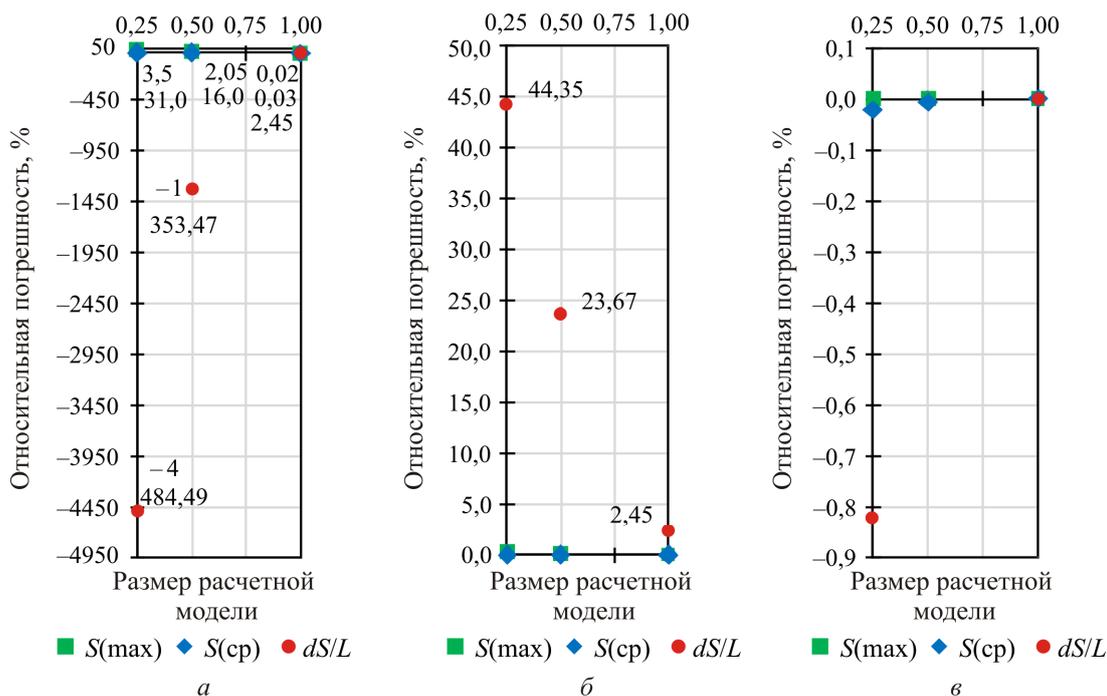


Рис. 3. Графики зависимости относительной погрешности контрольных параметров от размера расчетной модели для представления конструкции: а – плитным 2D-элементом без дополнительных связей на оси симметрии; б – плитным 2D-элементом с дополнительными связями на оси симметрии; в – объемным 3D-элементом

Fig. 3. Dependency diagrams of the relative accuracy of the control parameters on the size of the design model to represent the structure as: a – a 2D-element without additional boundary conditions on the axis of symmetry; b – a 2D-element with additional boundary conditions on the axis of symmetry; c – a 3D-element

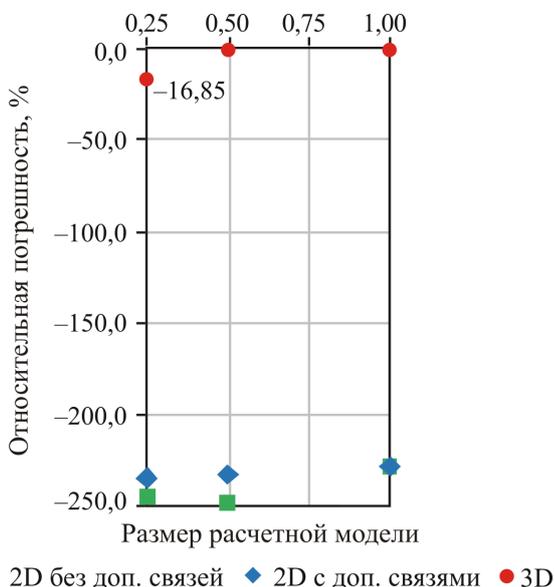


Рис. 4. График зависимости относительной погрешности максимального перемещения ограждения от размера расчетной модели для представления конструкции: а – плитным 2D-элементом без дополнительных связей на оси симметрии; б – плитным 2D-элементом с дополнительными связями на оси симметрии; в – объемным 3D-элементом

Fig. 4. Dependency diagrams of the relative accuracy of the shoring maximum displacement on the size of the design model to represent the structure as: a – a 2D-element without additional boundary conditions on the axis of symmetry; b – a 2D-element with additional boundary conditions on the axis of symmetry; c – a 3D-element

При описании конструкции плитного фундамента объемными континуальными элементами (рис. 3. в) относительная погрешность определения контрольных параметров не превышает 1 %, вне зависимости от использования плоскостей симметрии.

Представление конструкции плитными 2D-элементами рационально при полноразмерной расчетной модели (относительная погрешность не более 3 %), использование же плоскостей симметрии увеличивает только относительную погрешность для относительной разности осадок: более чем на 20 % при использовании одной плоскости симметрии и более чем на 40 % – двух.

При моделировании глубокого котлована с консольным ограждением точность результата существенно зависит от способа создания ограждения котлована (рис. 4). Так, при использовании плитных элементов относительная погрешность находится в диапазоне 225–235 %, вне зависимости от использования плоскостей симметрии. При описании ограждения котлована континуальными элементами только использование двух плоскостей симметрии повышает относительную погрешность (более 15 %).

Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В геотехнических задачах использование принципов симметрии в МКЭ способно снизить точность результатов расчета. Дополнительное снижение точности будет происходить при моделировании конструкции плитными элементами.
2. Использование принципов симметрии рационально с точки зрения точности расчета только при моделировании конструкции объемными континуальными элементами.
3. Моделирование конструкции плитными элементами рационально с точки зрения точности расчета только для задач, связанных с расчетом вертикально расположенных конструкций (фундаментов) и без использования принципов симметрии.

Заключение

Представление конструкций в расчетах плитными элементами встречается очень часто, из-за простоты их моделирования. Однако нужно помнить о положенных в их основе допущениях (теория Кирхгофа, Миндлина). Моделирование конструкций континуальными элементами оказывается более точным, особенно при использовании плоскостей симметрии. При этом встречается оно реже. Это связано с тем, что результатами расчета являются не внутренние усилия, а внутренние напряжения. Однако это не такая большая сложность, чтобы полностью жертвовать точностью самого расчета, особенно при использовании принципов симметрии.

Библиографический список

1. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 392 с.
2. Katzenbach R., Leppla S., Choudhury D. Foundation Systems for High-Rise Structures. – NW: CRC Press, 2017. – 314 p.

3. Katzenbach R., Leppla S., Seip M. Risk management and risk communication in geotechnical engineering by independent peer review and special technical solutions // Fifth International Symposium on Geotechnical Safety and Risk. – Rotterdam, the Netherlands, 2015. – P. 74–90.
4. Garcia J.R., Albuquerque P.J., Melo R.A. Analysis of piled foundations partially embedded in rock // Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018), 25–27 June. – Porto, Portugal, 2018. – P. 937–942.
5. Back-analysis of Crossrail deep excavations using 3D FE modelling of BRICK parameters for London Clay / Y. Chen, G. Biscontin, A.K. Pillai, D.P. Nicholson // Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018), 25–27 June. – Porto, Portugal, 2018. – P. 1145–1154.
6. Law K.H. A parametric study of efficiency of buttress walls in reducing the excavation-induced tunnel movement // Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018), 25–27 June. – Porto, Portugal, 2018. – P. 1173–1180.
7. Clausen J., Andersen L., Damki L. On the differences between the Drucker-Prager criterion and exact implementation of the Mohr-Coulomb criterion in FEM calculations // Proceedings of the 7th European conference on numerical methods in geotechnical engineering, 2–4 June. – Trondheim, Norway, 2010. – P. 101–106.
8. Henke S., Qiu G., Grabe J. A Coupled Eulerian-Lagrangian approach to solve geotechnical problems involving large deformations // Proceedings of the 7th European conference on numerical methods in geotechnical engineering, 2–4 June. – Trondheim, Norway, 2010. – P. 233–238.
9. Heinrich D., Quiroz T., Schenk A. Validation of Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method by means of large scale foundation testing // Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018), 25–27 June. – Porto, Portugal, 2018. – P. 629–636.
10. De Abreu S. Analysis of longitudinal cracks in road embankments // Proceedings of the 5th International young geotechnical engineers' conference. – Paris, France, 2013. – P. 307–310.
11. 2D Spatial Variability Analysis of Sugar Creek Embankment: Comparative Study / B. Cami, S. Javankhoshdel, T. Yacoub, R.J. Bathurst // Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures. – Egypt, 2018. – P. 118–125.
12. Sharma A. 2D Finite Element Analysis of Sub-surface Settlements and Pile-Tunnel Interaction // Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures. – Egypt, 2018. – P. 169–181.
13. Rahman A.R., Ahsan R. Evaluation of Design Parameters of Near Embankment Underground Tunnel Structure by Numerical Analysis of a 2D Plain Strain Model // Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures. – Egypt, 2018. – P. 182–198.
14. Aldonkar S.S., Savoikar P. Comparative Behavior of Mechanical Response of Earth Retaining Structures with Two Different Material Models // Advances in Computer Methods and Geomechanics. – 2019. – Vol. 1. – P. 67–76.
15. Nguyen H.C. Safety Factor and Failure Mechanism in Geotechnical Engineering: A Numerical Study // Advances in Computer Methods and Geomechanics. – 2019. – Vol. 1. – P. 121–130.
16. Mukherjee K., Mishra A.K. Experimental and Numerical Study on Compacted Sand Bentonite-Tire Fiber Composite for Landfill Application // Advances in Computer Methods and Geomechanics. – 2019. – Vol. 1. – P. 263–176.

17. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Области применения современных механических моделей грунтов // *Геотехника*. – 2017. – № 1. – С. 20–26.
18. Daniel S.H.L. *Finite Element Mesh Generation*. – New York: CRC Press, 2015. – 618 p.
19. Bhattacharya D., Prashant A. Mesh Size Sensitivity and Effect of Perturbation Intensity on Coupled Undrained Instability Analysis in Sands // *Selected Papers From Sessions Of The Eighth International Conference On Case Histories In Geotechnical Engineering*, 24–27 March. – Philadelphia, Pennsylvania, 2019. – P. 1–10.
20. Шапиро Д.М. *Метод конечных элементов в строительном проектировании*. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 180 с.

References

1. Shulyat'yev O.A. *Osnovaniya i fundamenty vysotnykh zdaniy [Substructures and foundations of high-rise buildings]*. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2016. – 392 p.
2. Katzenbach R., Leppla S., Choudhury D. *Foundation Systems for High-Rise Structures*. NW: CRC Press, 2017. – 314 p.
3. Katzenbach R., Leppla S., Seip M. Risk management and risk communication in geotechnical engineering by independent peer review and special technical solutions. *Fifth International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*, Rotterdam, the Netherlands, 2015, pp. 74-90.
4. Garcia J.R., Albuquerque P.J., Melo R.A. Analysis of piled foundations partially embedded in rock. *Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018)*, 25–27 June, Porto, Portugal, 2018, pp. 937-942.
5. Chen Y., Biscontin G., Pillai A.K., Nicholson D.P. Back-analysis of Crossrail deep excavations using 3D FE modelling of BRICK parameters for London Clay. *Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018)*, 25–27 June, Porto, Portugal, 2018, pp. 1145-1154.
6. Law K.H. A parametric study of efficiency of buttress walls in reducing the excavation-induced tunnel movement. *Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018)*, 25–27 June, Porto, Portugal, 2018, pp. 1173-1180.
7. Clausen J., Andersen L., Damki L. On the differences between the Drucker-Prager criterion and exact implementation of the Mohr-Coulomb criterion in FEM calculations. *Proceedings of the 7th European conference on numerical methods in geotechnical engineering*, 2–4 June, Trondheim, Norway, 2010, pp. 101-106.
8. Henke S., Qiu G., Grabe J. A Coupled Eulerian-Lagrangian approach to solve geotechnical problems involving large deformations. *Proceedings of the 7th European conference on numerical methods in geotechnical engineering*, 2–4 June, Trondheim, Norway, 2010, pp. 233-238.
9. Heinrich D., Quiroz T., Schenk A. Validation of Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method by means of large scale foundation testing. *Proceedings of the 9th European conference on numerical methods in geotechnical engineering (NUMGE 2018)*, 25–27 June, Porto, Portugal, 2018, pp. 629-636.
10. De Abreu S. Analysis of longitudinal cracks in road embankments. *Proceedings of the 5th International young geotechnical engineers' conference*, Paris, France, 2013, pp. 307-310.
11. Cami B., Javankhoshdel S., Yacoub T., Bathurst R.J. 2D Spatial Variability Analysis of Sugar Creek Embankment: Comparative Study. *Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*, Egypt, 2018, pp. 118-125.

12. Sharma A. 2D Finite Element Analysis of Sub-surface Settlements and Pile-Tunnel Interaction. *Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*, Egypt, 2018, pp. 169-181.

13. Rahman A.R., Ahsan R. Evaluation of Design Parameters of Near Embankment Underground Tunnel Structure by Numerical Analysis of a 2D Plain Strain Model. *Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures*, Egypt, 2018, pp. 182-198.

14. Aldonkar S.S., Savoikar P. Comparative Behavior of Mechanical Response of Earth Retaining Structures with Two Different Material Models. *Advances in Computer Methods and Geomechanics*, 2019, vol. 1, pp. 67-76.

15. Nguyen H.C. Safety Factor and Failure Mechanism in Geotechnical Engineering: A Numerical Study. *Advances in Computer Methods and Geomechanics*, 2019, vol. 1, pp. 121-130.

16. Mukherjee K., Mishra A.K. Experimental and Numerical Study on Compacted Sand Bentonite-Tire Fiber Composite for Landfill Application. *Advances in Computer Methods and Geomechanics*, 2019, vol. 1, pp. 263-176.

17. Mirnyy A. Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Oblasti primeneniya sovremennykh mekhanicheskikh modeley gruntov [Applications of modern mechanical soil models]. *Geotechnics*, 2017. vol. 1, pp. 20-26.

18. Daniel S.H.L. Finite Element Mesh Generation. New York: CRC Press, 2015. – 618 p.

19. Bhattacharya D., Prashant A. Mesh Size Sensitivity and Effect of Perturbation Intensity on Coupled Undrained Instability Analysis in Sands. *Selected Papers From Sessions Of The Eighth International Conference On Case Histories In Geotechnical Engineering*, 24-27 March, Philadelphia, Pennsylvania, 2019, pp. 1-10.

20. Shapiro D.M. Metod konechnykh elementov v stroitel'nom proyektirovanii [Finite element method in construction design]. Izdatel'stvo ASV, 2015. 180 p.