

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЩЕСТВЕННО-ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА С ПОДЗЕМНОЙ АВТОСТОЯНКОЙ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ И КОММУНИКАЦИИ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ВЛАСОВ А.Н.^{1,2}, д. т. н., ВОЛКОВ-БОГОРОДСКИЙ Д.Б.¹, к. ф.-м. н.,

МНУШКИН М.Г.², к., т. н., РЫЖОВ С.А.³, к. ф.-м. н.,

¹Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия,

²Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия

³ООО "ТЕСИС", Москва, Россия

В работе рассмотрены приёмы геотехнического моделирования сложной инженерно-геологической задачи, возникающей при строительстве нового объекта в условиях плотной городской застройки. В качестве примера был взят геотехнический расчет влияния на окружающую застройку и коммуникации этапов строительства общественно-жилого комплекса с подземной трёхуровневой автостоянкой. Основным программным комплексом, используемым для конечно-элементного моделирования, являлся программный комплекс общего назначения SIMULIA Abaqus [1]. Для оценки эффективных свойств грунтов, свайных полей и т.д., рассматриваемых в качестве структурно-неоднородных материалов, применялся двухмасштабный метод асимптотического усреднения [2, 3], реализованный на основе специального аналитико-численного метода под Abaqus'ом в виде пользовательского материала по технологии UMAT. Этот метод может применяться также для оценки эффективных свойств композитных материалов с усложненной внутренней микроструктурой.

Расчет осложнялся близостью административных зданий III категории состояния конструкций, наличием высокого уровня грунтовых вод, значительного перепада высот на строительной площадке и глубоким котлованом. По результатам численных расчётов была проведена корректировка проекта ограждения котлована по укреплению «стены в грунте» со стороны высокой части рельефа. В связи с необходимостью корректного учета перечисленных факторов был выработан ряд специфических приемов конечно-элементного моделирования геотехнических задач в программном комплексе SIMULIA Abaqus [4].

1. Особенности геотехнического моделирования

Геотехнические расчеты имеют большое значение для верификации проектных решений, поскольку помогают выявить и устранить некоторые неочевидные неточности в проекте, если таковые имеются. Однако, для выполнения этой задачи, требуются провести полноценное трехмерное моделирование всего процесса строительства объекта с учетом особенностей каждого этапа строительства. При этом необходимо учитывать нелинейность физических процессов при деформировании грунтового основания, соединение в одной модели разных, сильно отличающихся масштабом элементов, соблюдение последовательности строительства, обуславливающей траекторию нагружения грунтового основания, сложную инженерно-геологическую обстановку (слои переменной мощности, линзы, выклинивание, окружающая застройка), смена (трансформация) материалов, удаление и добавление множества элементов по ходу решения задачи.

В этом плане конечно-элементный комплекс SIMULIA Abaqus предоставляет весьма развитый аппарат для реалистичного конечно-элементного моделирования, включающий удобный генератор гексаэдральной сетки, широкий спектр моделей упругопластического деформирования материала, возможность работать с отдельными геометрическими частями области, взаимодействующими между собой через механизм контактных поверхностей. Отметим также, что в работе развиваются и свои собственные аналитические методы для оценки физико-механических свойств структурно-неоднородных материалов, которые используются при моделировании совместно с Abaqus'ом [3, 5].

Особенностью геотехнического моделирования является необходимость построения сетки (желательно гексаэдральной), учитывающей все элементы модели и все этапы строительства объекта. При этом в связи с необходимостью вычисления начального НДС в геологической модели, предполагается удаление части элементов конструкций на начальном шаге; то же относится и к промежуточным шагам. Однако на дальнейших шагах эти элементы реанимируются, и они должны быть заранее предусмотрены в конечно-элементном разбиении расчетной области.

Зона строительства имеет сложную структуру, здесь выделяются такие структурные элементы, как фундаментная плита, шпунтовое ограждение, стена в грунте, анкерные элементы, распорная система (см. рис. 1) и т.д. Все эти элементы подключаются к расчету на определенном этапе, соответствующем траектории нагружения. Здесь используется технология Abaqus *MODEL CHANGE по активации/деактивации элементов. С помощью этой технологии также выполняется трансформация материала на определенном шаге: в определенный момент убирается группа элементов, соответствующая одному материалу и реанимируется дублирующая группа элементов, построенная на тех же узлах сетки, соответствующая другому материалу; затем производится релаксация картины НДС.

Таким образом, массив грунта, разбитый на геологические слои, фундаментная плита, стена в грунте моделируются гексаэдральными элементами, а шпунтовое ограждение – поверхностными элементами с приведенными

характеристиками, где эффективная ширина b и эффективная плотность $\rho_{эф} = k \rho$ определяются по следующим формулам:

$$b = \frac{12\pi [D_0^4 - (D_0 - 2\Delta r)^4]}{64l} + \frac{E_0}{E} b_0^3, \quad k = \frac{\pi [D_0^2 - (D_0 - 2b)^2]}{4Bl},$$

где D_0 – диаметр трубы, используемой для шпунтового ограждения, Δr – толщина стенки трубы, b_0 – толщина забирочного материала, E_0/E – отношение модулей упругости забирочного материала и трубы, l – расстояние между трубами по стене.

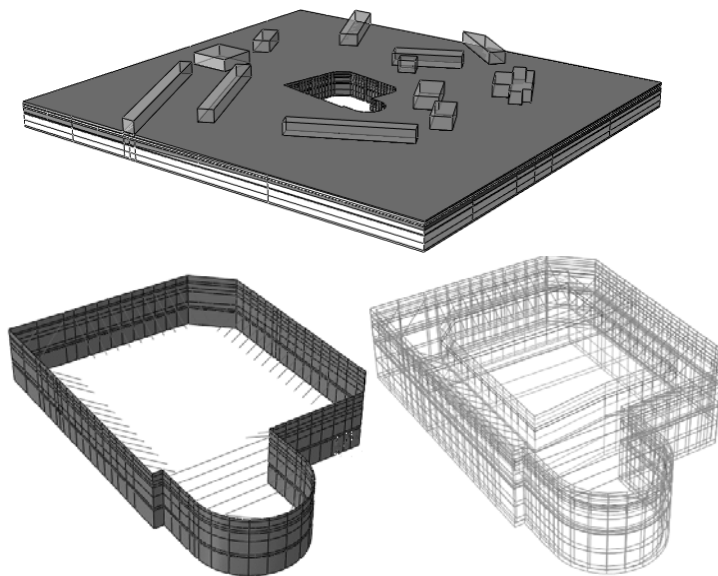


Рис. 1 – Разбиение расчетной области на отдельные части

2. Генерация гексаэдральной сетки

Обычно участок проектируемого строительства расположен в сложившейся городской застройке, стройплощадка имеет сложную форму и участок представляет собой спланированную, плотно застроенную область, большая часть которой заасфальтирована, с многочисленными подземными коммуникациями. Инженерно-геологическая обстановка района строительства сложная, и такое положение дел не является чем-то особенным, а скорее обычным в практике строительства. Примером может служить характер и условия залегания различных литолого-стратиграфических разностей на площадке строительства приведённых на инженерно-геологическом разрезе на рис. 2.

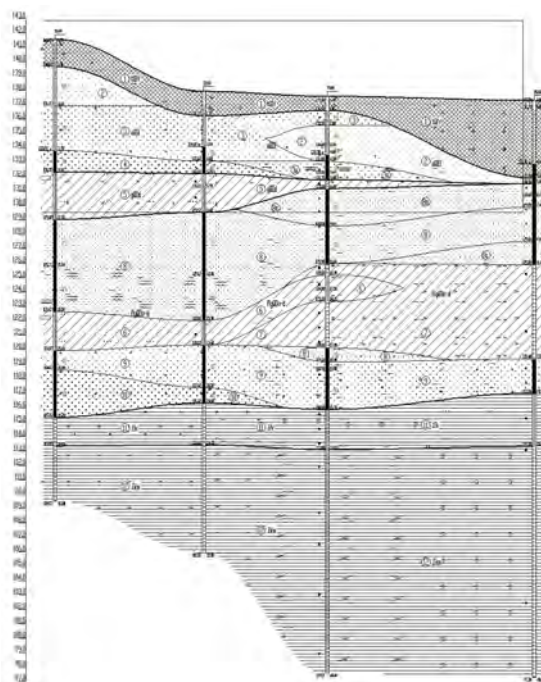


Рис. 2 – Инженерно-геологический разрез

Анализ и обобщение данных инженерно-геологических изысканий, характеризующих возраст, генезис, состав, состояние, деформационные и прочностные параметры грунтов, слагающих территорию строительства, один из инженерно-геологических разрезов которой представлен на рис. 2, позволили выделить 15 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Для всех этих элементов предоставляются нормативные и расчётные значения прочностных и деформационных характеристик, которые затем используются в модели грунтового основания. Часто пользуются упругопластической моделью Мора Кулона или Друккера-Прагера [6]. Это объясняется тем, что в результате инженерно-геологических изысканий данные по механическим характеристикам грунтов, предоставляются, как правило, в объёме достаточном только для этих моделей (общий модуль деформации E , сцепление C и угол внутреннего трения φ).

Размер расчетной области, имеющей прямоугольную форму, определяется на основе характерных размеров области строительства, глубина расчетной области (сжимаемая толща) определяется из оценки максимальных нагрузок на стадии окончания строительства и передачи эксплуатационных нагрузок [7].

После формирования расчетной области, в Abaqus/CAE строится детальный эскиз области строительства с учетом всех необходимых элементов модели: ограждения котлована, распорной системы, пригрузочных берм, окружающей застройки и коммуникаций, модели перепада высот (см. рис.3). И на основе этого эскиза и соответствующих ему вытянутых поверхностей производится расщепление исходной области с моделью геологических слоев на большое число подобластей, пригодных для автоматической генерации гексаэдральной сетки (см. рис. 4). При этом элементы модели должны быть согласованы с внесенными в эскиз строительными элементами.

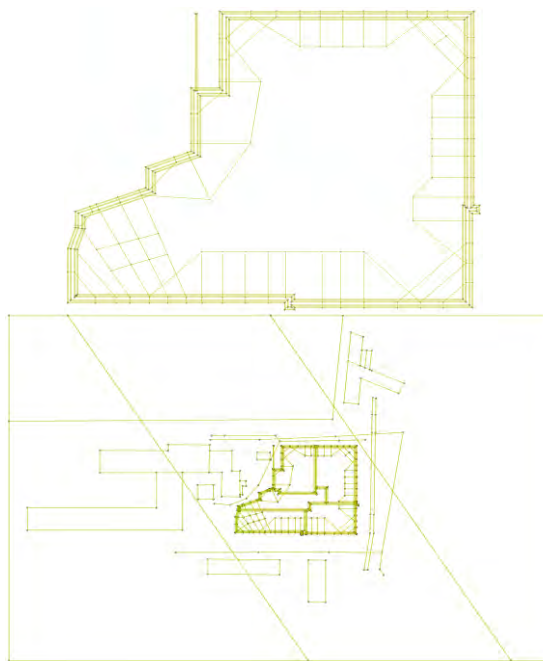


Рис. 3 – Детальный эскиз пространственной модели

Отметим, что генератор сетки в Abaqus/CAE имеет средства управлять характерным размером элементов в разных частях модели. За счет этого производится оптимизация сетки: вблизи зоны строительства сетка измельчается, вдали – укрупняется. Таким же образом строится несколько сеток разной мощности на одной и той же сформированной модели; для предварительной отработки модели применяется грубая сетка, а для окончательного расчета – максимально мелкая. Обычно отработка модели реализуется в виде нескольких десятков предварительных расчетов, поэтому очень важно сократить время этого этапа за счет работы на максимально грубой сетке.

Отметим также еще один важный момент в геотехническом моделировании, который решается за счет усложнения сетки. Это – проблема развязки строительных конструкций и грунтового основания при взаимодействии элементов модели (рис. 5). Это достигается за счет введения контактного элемента или промежуточной анизотропной зоны, имеющей модуль сдвига, соответствующий сдвиговой жёсткости грунта по материалу [7].

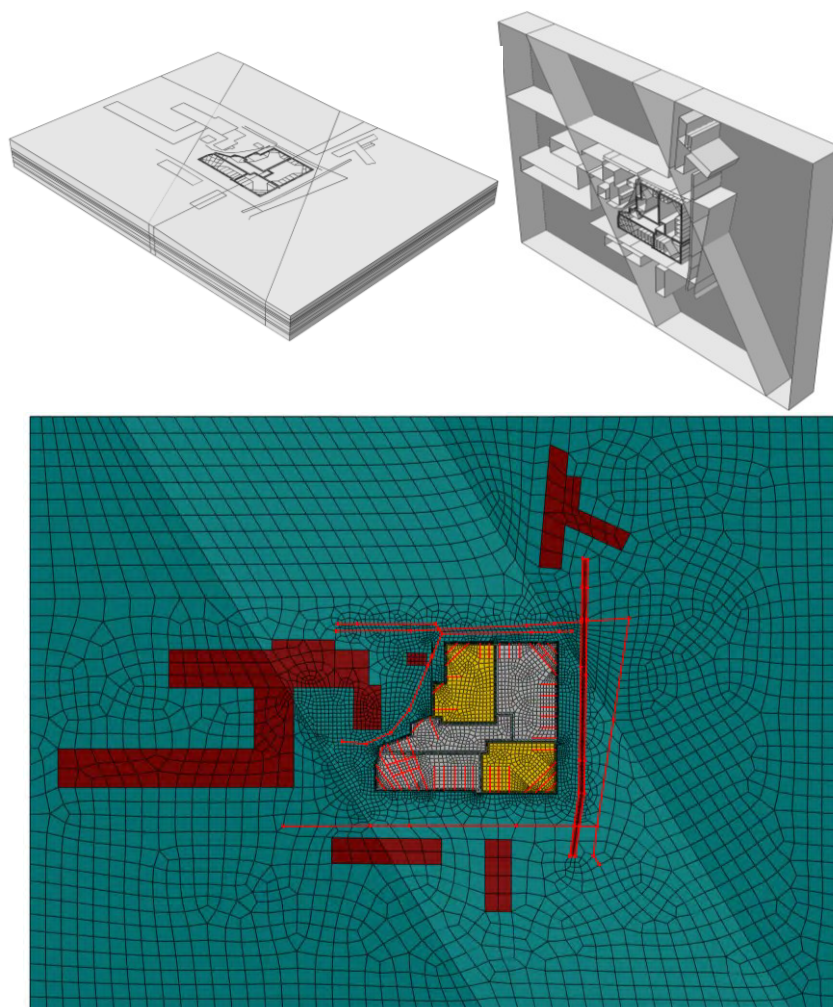


Рис. 4 – Генерация гексаэдральной сетки

В результате получаем разбитую на гексаэдры конечно-элементную модель, согласованную со всеми окружающими элементами и этапами строительства объекта и учитывающую особенности взаимодействия конструкций и грунтового основания (рис. 6).

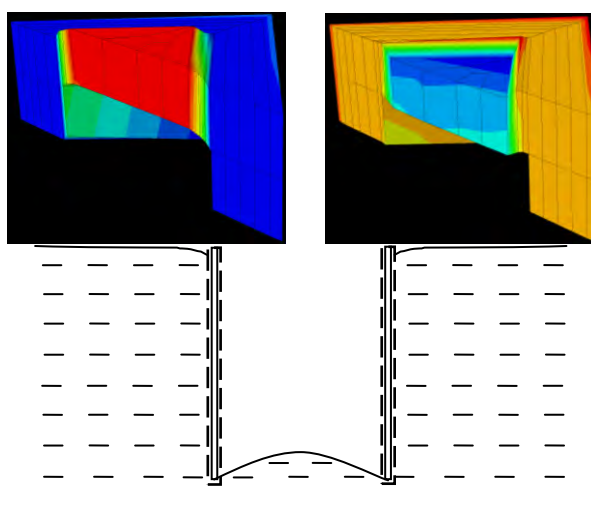


Рис. 5 – Организация взаимодействия элементов конструкций и грунтового основания

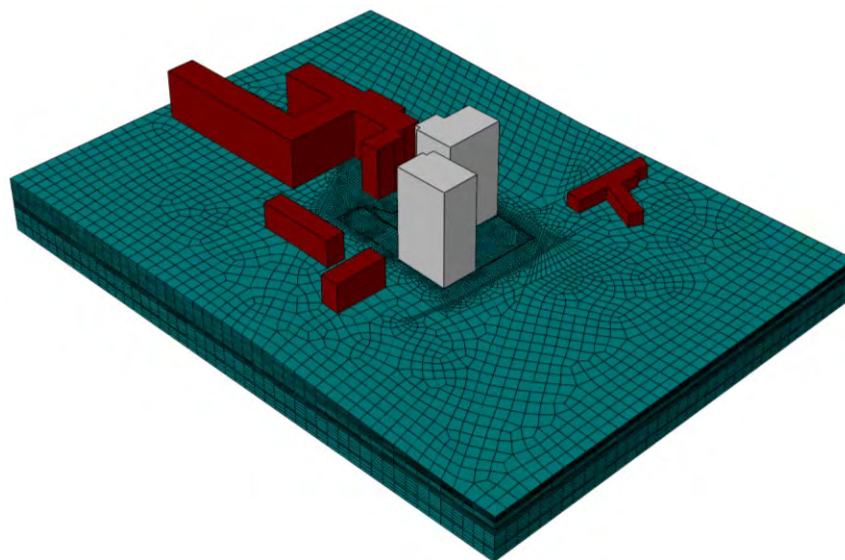


Рис. 6 – Конечно-элементная модель строительства объекта

3. Пример расчёта, результаты и анализ полученных данных

В качестве примера рассмотрим участок проектируемого строительства, который представляет собой общественно-жилой комплекс с нежилыми помещениями высотой 2-21 этажей и 3-х уровневой подземной автостоянкой, заглубленной на 13,3 м от поверхности. Разрез здания представлен на рис. 7.

Основные несущие конструкции – монолитные несущие стены, колонны, перекрытия; ограждающие конструкции – двухслойная стена, в качестве облицовочного слоя применяется навесной вентилируемый фасад из искусственного камня; тип фундамента – монолитная железобетонная плита, с нагрузками 50 тс/м^2 .

При устройстве подземной части отрывался котлован с отметкой заложения дна на трёх уровнях, которые обусловлены передачей нагрузки от верхних конструкций. Устройство котлована при такой схеме посадки возможно под защитой ограждающей конструкции. В проекте роль ограждающей конструкции выполняет «стена в грунте».

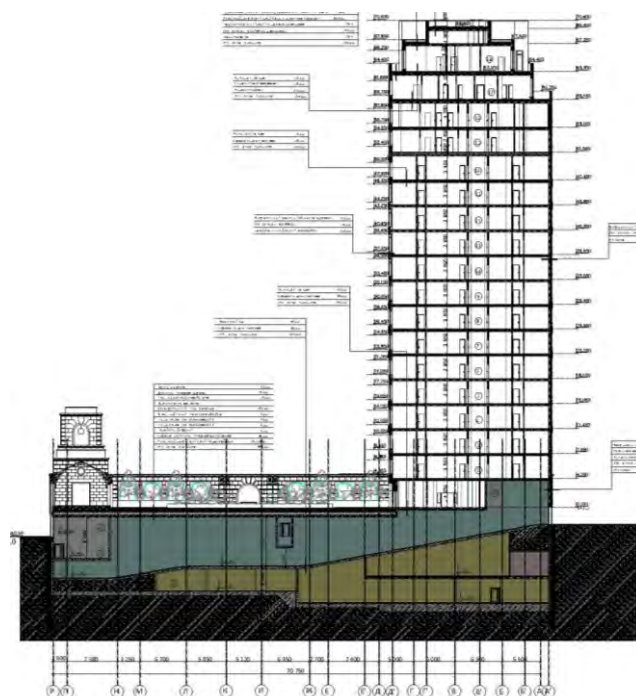


Рис. 7 – Разрез. Общественно-жилой комплекс с подземной автостоянкой

Разработка рабочего котлована проводилась поэтапно в 3-4 этапа. На слабом участке были устроены три яруса металлических горизонтальных распорок из труб $\varnothing 530 \times 12$, $\varnothing 530 \times 16$, $\varnothing 630 \times 16$ мм. По окончании разработки котлована производилось устройство фундаментной плиты.

Задача расчётов заключалась в определении влияния строительства жилого комплекса с нежилыми помещениями и подземной автостоянкой на окружающую застройку и коммуникации, находящиеся в непосредственной близости от площадки строительства. Прогноз выполнен на период строительства и после его завершения при передаче на основании эксплуатационных нагрузок. В качестве начального принято состояние на момент времени до начала строительства.

Анализируемая область включала в себя массив грунтов основания с плановыми размерами 290×390 м и максимальной глубиной от поверхности от 29 м до 36 м. Общий вид расчётной области и расположения существующих зданий в плане показан на рис. 4, 6.

При выполнении численных расчётов назначались следующие граничные условия по закреплениям:

- на поверхности расчётной области – свободное перемещение узлов по всем направлениям;
- на боковых границах расчётной области – свободное перемещение в вертикальном направлении и запрет на горизонтальные перемещения;
- на подошве расчётной области – запрет на перемещения по всем направлениям.

Траектория нагружения следовала принятому в проекте производству работ и вводу объекта в эксплуатацию.

Первоначально в проекте ограждающая конструкция, выполняемая способом «стена в грунте» была толщиной 600 мм подкрепленного типа с двухъярусным креплением металлическими укосами и трехъярусной системой горизонтальных распорок. Численные расчёты показали несостоятельность такого проектного решения (рис. 8). В результате в проект были внесены изменения, а именно: толщина ограждающей конструкции в «слабом» месте изменилась и стала 800 мм с трёхъярусным креплением металлическими укосами и трехъярусной системой горизонтальных распорок.

Полученные значения дополнительных осадок зданий и сооружений, расположенных вблизи нового строительства на момент отрывки котлованов не превысили 0.68 (1.27) см, а на момент окончания строительства и передачи эксплуатационных нагрузок – 0.98 (1.92) см. Максимальная относительная разность осадок окружающих зданий и сооружений на момент окончания строительства и передачи эксплуатационных нагрузок не превысила $6.02 \cdot 10^{-4}$ ($7.39 \cdot 10^{-4}$). Максимальные значения дополнительных осадок и перемещений коммуникаций на окончание строительства составили 0.95 (1.95) см и 1.79 (3.91) см, соответственно. Здесь в скобках приведены значения, полученные расчётом для первоначального проектного решения ограждающих конструкций и разработки котлована.

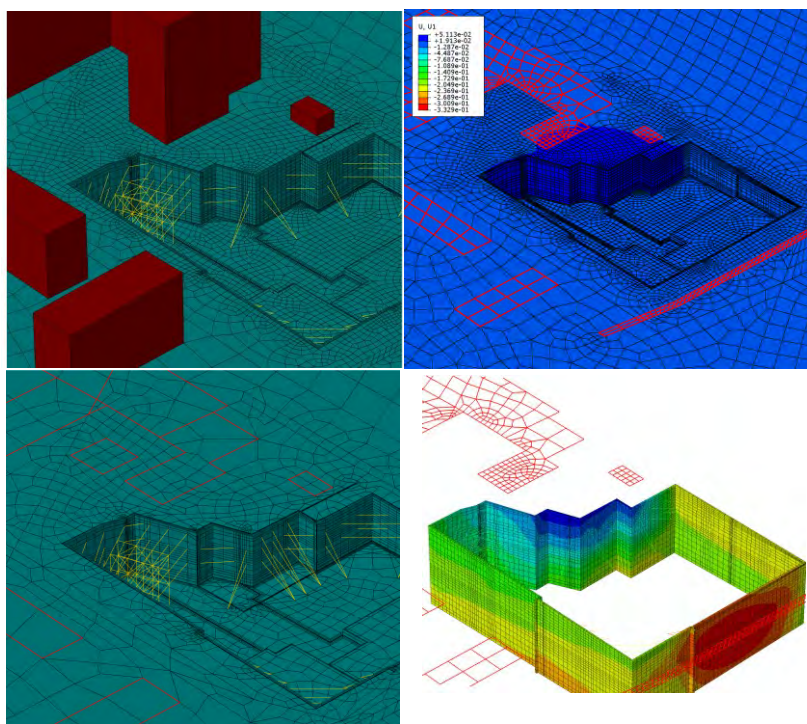


Рис. 8 – Усиление ограждающих конструкций по результатам расчета

Определённая расчётом зона влияния от строительства нового здания с учётом ограждения котлована, распространяется от его контура на расстояние до ~50 м.

4. Оценка усредненных характеристик грунтового основания на свайном поле

При решении геотехнических задач возникает необходимость в оценке эффективных (усредненных) характеристик грунтового основания, укрепленного различными строительными элементами, или скального основания, ослабленного системой трещин и состоящего из отдельных блоков [7]. Для этого используются специальные аналитико-численные методы в дополнение к возможностям программного комплекса Abaqus, и проводится работа по их реализации. Альтернативный аналитико-численный метод используется также для оценки эффективных характеристик и для получения картины внутренних микронапряжений для композиционных материалов. На рис. 9 изображена модель конструкции, опирающаяся на свайное поле, спроектированное частично, под левой половиной здания. Для правой

половины объекта проект был изменен, и для выполнения геотехнического расчета необходимо было провести оценку жесткостных характеристик грунтового основания при различных возможных вариантах организации свайного поля.

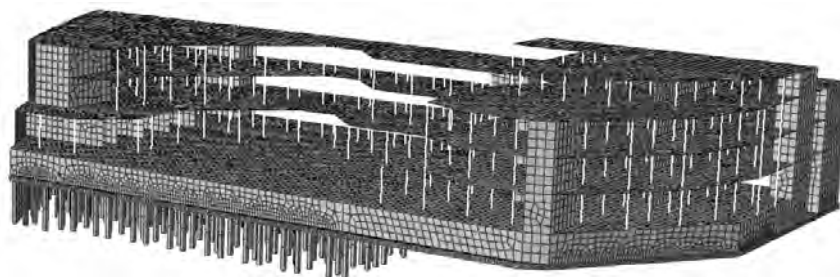


Рис. 9 – Модель конструкции на свайном поле

5. Оценка эффективных характеристик структурно-неоднородных материалов

Используемый метод оценки эффективных свойств грунтов, свайных полей и т.д. рассматривается в данной работе как общий метод асимптотического усреднения для вычисления эффективных характеристик и внутренних напряжений в структурно-неоднородных материалах, в том числе и в композитных материалах.

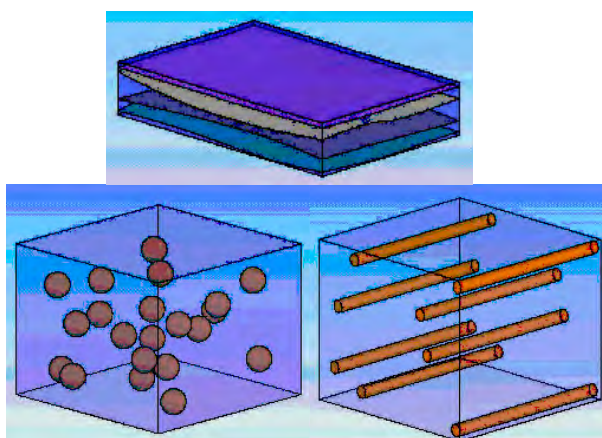


Рис. 10 – Примеры структур с включениями разной формы

В работе развиваются аналитические методы, основанные на специальных аппроксимациях решений вспомогательных задач специальными функциями, являющимися фундаментальными решениями уравнения Лапласа, и точно удовлетворяющими контактными условиям на поверхности включений, которые могут иметь сферическую, цилиндрическую или слоистую форму (рис. 10). Развиваемый аналитико-численный метод допускает также наличие у включений дополнительного межфазного слоя, т.е. мы рассматриваем композиционные материалы с усложненной внутренней микроструктурой (рис. 11).

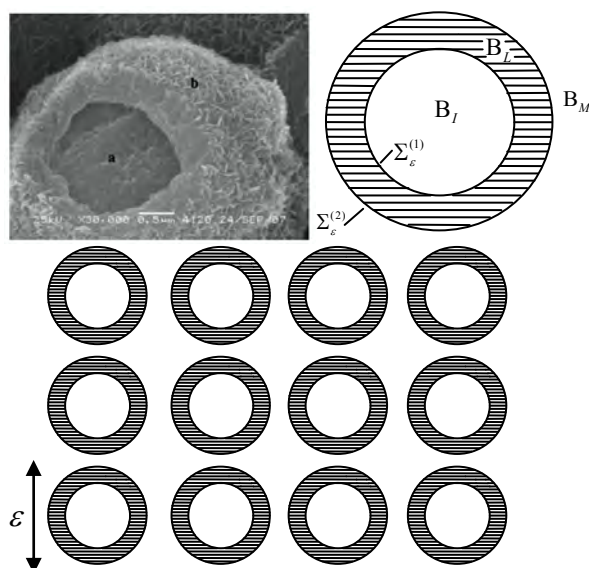


Рис. 11 – Модель композитного материала с усложненной внутренней микроструктурой

Двухмасштабный метод асимптотического усреднения [2, 3], разделяет процессы, происходящие на микро - и макроуровне при помощи введения “быстрых” и “медленных” переменных, и представляет решение в виде асимптотического ряда:

$$U(x) = \hat{U}(x, \xi) = \sum_{l=0}^{\infty} \varepsilon^l U^{(l)}(x, \xi), \quad \xi = x/\varepsilon, \quad (1)$$

где ε – характерный размер включений (см. рис. 11). Анализ асимптотического ряда (1) приводит к заключению о структуре функций:

$$U^{(l)}(x, \xi) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_l} N_{i_1, i_2, \dots, i_l}(\xi) D^{i_1, i_2, \dots, i_l} U_0(x), \quad l \geq 1, \quad U^{(0)}(x, \xi) = U_0(x). \quad (2)$$

Основным принципиальным моментом теории является возможность точного (аналитического) решения задачи на ячейке для функций “быстрых” переменных:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(A_{ij}(\xi) \frac{\partial (N_{i_1}(\xi) + \xi_{i_1} E)}{\partial \xi_j} \right) = 0, \quad \left[A_{ij}(\xi) \frac{\partial (N_{i_1}(\xi) + \xi_{i_1} E)}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0, \quad \xi \in \Sigma. \quad (3)$$

Аналитическое решение задачи (3) возможно при условии построения явной аналитической конструкции для решений, так называемой, обобщенной задачи Эшелби – задачи для отдельного включения в бесконечной матрице (см. рис. 12) с точными контактными условиями и с асимптотикой на бесконечности для перемещений, соответствующей однородным деформациям.

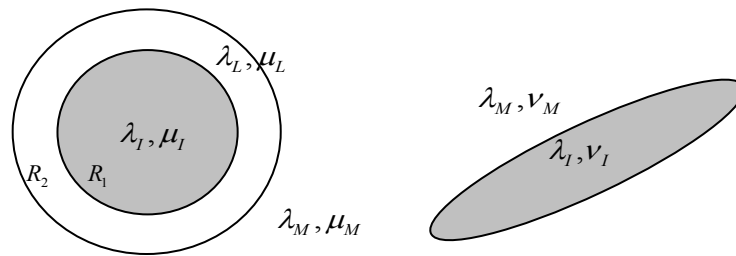


Рис 12 – Обобщенная задача Эшелби

Явная конструкция для решения (с учетом межфазных слоев и разных контактных условий: идеальный контакт, контакт с проскальзыванием и т.д.) строится на основе представления перемещений через вспомогательные гармонические потенциалы для включений сферической, сфероидальной, цилиндрической и слоистой формы:

$$U(P) = \frac{f(P)}{\mu} + \frac{\nabla(\phi - r f)}{4\mu(1-\nu)}, \quad \nabla^2 f(P) = 0, \quad \nabla^2 \phi(P) = 0. \quad (4)$$

Этот аналитико-численный метод вычисления эффективных характеристик был реализован в программном комплексе Abaqus в виде пользовательского материала по технологии UMAT. Это стандартная техника, предполагающая реализацию всех алгоритмов на языке FORTRAN-90.

Подключение эффективных характеристик осуществляется на уровне модификации входного файла (*.inp) конечно-элементной модели. Описание исходных параметров для вычисления эффективных характеристик (свойства материала включения, промежуточного слоя, матрицы и объемная доля включений) осуществляется при помощи стандартного ключа *USER MATERIAL:

MATERIAL, name=U100_material

***USER MATERIAL, constants=8**

1500, 0.3, 987, 0.3, 135, 0.3, 0.02, 1.

Подключение материала осуществляется стандартным образом:

***Solid Section, elset=Matrix_strength, material=U100_material**

Таким образом, модификация входного файла затрагивает только два места, т.е. требует минимум изменений.

В качестве примера использования пользовательского материала, описывающего структурно-неоднородную среду, рассмотрим две простейшие задачи: изгиб балки с композитным усилением (рис. 13), и нагружении полки уголка с зоной композитного усиления (рис. 14).

Внутри балки находится стальной сердечник квадратного сечения, окруженный мягкой полимерной матрицей. Длина балки 1700 мм, длина зоны усиления 500 мм. Зона усиления содержит частицы шунгита без промежуточного слоя ($c_1 = 1$). К центральной точке балки прилагается сосредоточенная сила ($F_y = 100 \text{ H}$) и в зоне усиления и варьируется коэффициент объемного наполнения c_0 от малых до предельных значений.

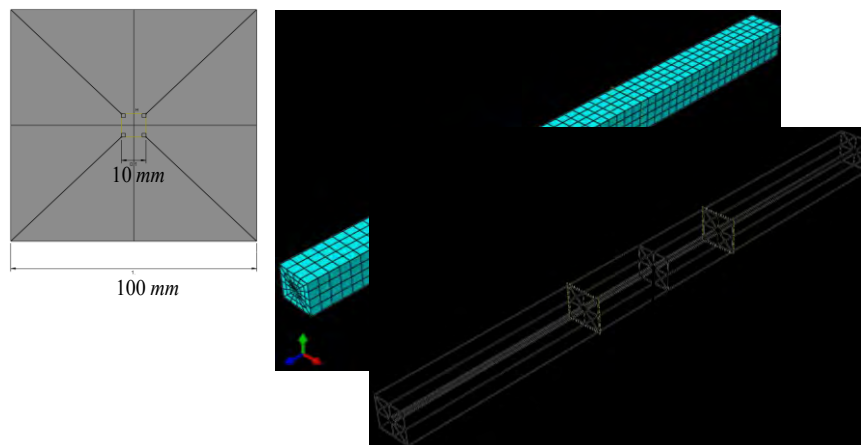


Рис. 13 – Изгиб балки с композитным усилением

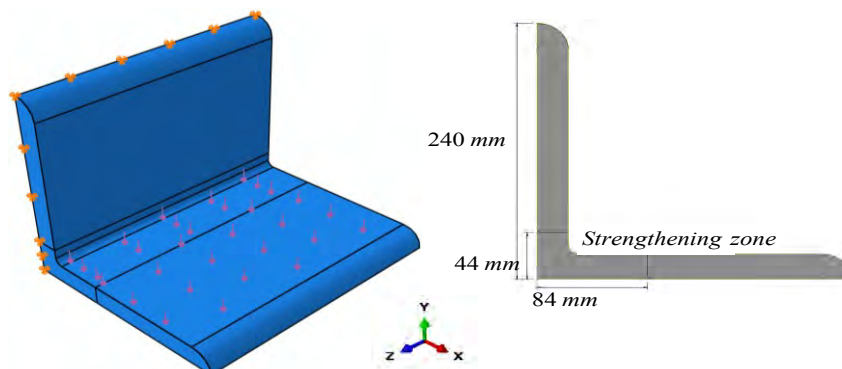


Рис. 14 – Уголок с зоной композитного усиления

Во второй задаче полка уголка нагружается равномерно распределенной поверхностной силой $P = 10 \text{ кПа}$ и в зоне усиления варьируется размер частиц в микро- и нано области в окружении почти несжимаемой матрицы. Ширина полки в уголке – 300 мм.

В расчётах механические характеристики матрицы, промежуточного слоя и включений (сферической формы в наших примерах) принимались соответственно равными: $E_I = 1.5 \text{ ГПа}$, $\nu_I = 0.3$, $E_L = 987 \text{ МПа}$, $\nu_L = 0.3$, $E_M = 135 \text{ МПа}$, $\nu_M = 0.3$ в задаче о балке и $\nu_M = 0.4999$ в задаче об уголке.

На рис. 15 представлена зависимость эффективных характеристик зоны усиления от объемной доли частиц шунгита. На рис. 16 представлен профиль и максимальный прогиб балки при различных параметрах зоны усиления.

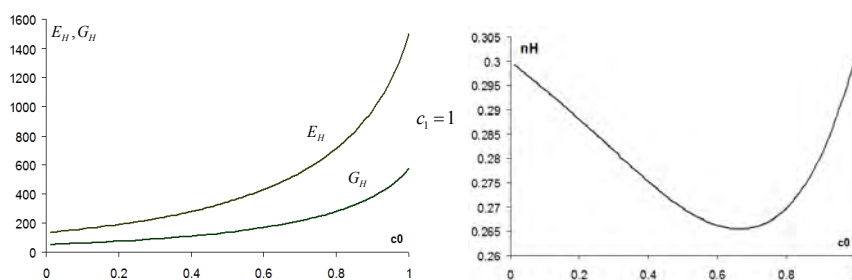


Рис. 15 – Зависимость эффективных характеристик от объемной доли включений

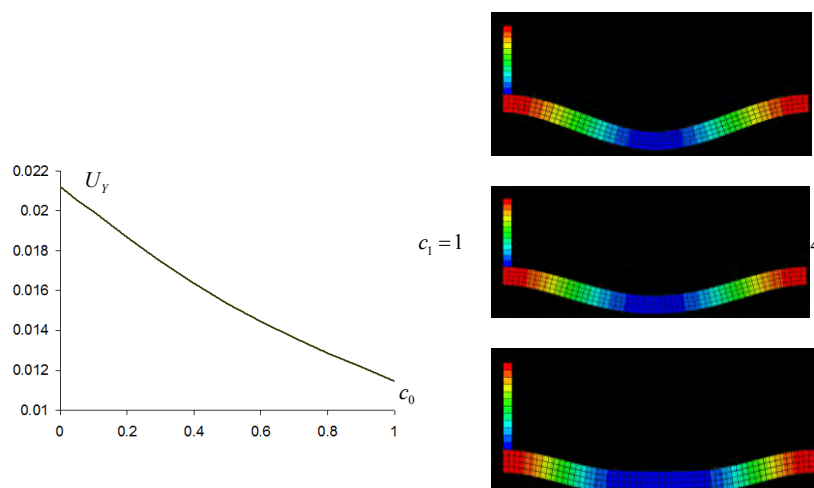


Рис. 16 – Прогиб балки в зависимости от параметров зоны усиления

Отметим, что наличие межфазного слоя, который учитывался в задаче об уголке, обуславливает проявление масштабного эффекта в nano размерной области – увеличения механических характеристик композитного материала в зависимости от размеров включений (частица + межфазный слой) [8]. Этот случай описывается постоянным параметром объемной доли включений $c_0 = 0.02$ и параметром c_1 , отвечающим за ширину межфазного слоя и изменяющимся от малых до больших значений.

На рис. 17 представлена зависимость эффективных характеристик зоны усиления в зависимости от размера промежуточного слоя, а также максимальные смещения нагружаемой полки уголка. Результаты находятся в хорошем согласии с экспериментом (см. [8]).

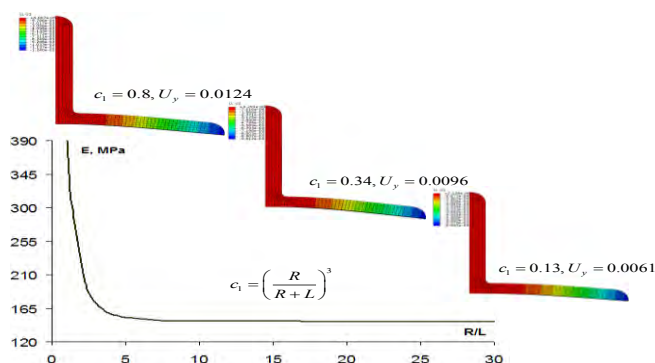


Рис. 17 – Эффект усиления материала при увеличении межфазной зоны

Явное аналитическое решение задачи для функций быстрых переменных (3) позволяет вычислить точно напряжения на микроуровне в окрестности включения в композите, что важно для оценки прочностных характеристик структурно-неоднородного материала.

6. Заключение

В работе продемонстрирована возможность эффективного использования конечно-элементного комплекса SIMULIA Abaqus для решения сложных геотехнических задач. Разработана система приемов геотехнического моделирования процесса строительства, позволяющая адекватно учитывать в модели особенности геотехнических задач. Для оценки эффективных свойств грунтов, свайных полей и т.д., рассматриваемых в качестве структурно-неоднородных материалов, разработан и реализован аналитико-численный метод, дополняющий возможности программного комплекса Abaqus.

Литература

1. Abaqus Users Manual, Abaqus User Subroutines Reference Manual, Version 6.10-1, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI
2. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука, 1984. 352 с.
3. Власов А.Н. Саваторова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно неоднородных средах. М.: Изд-во РУДН, 2009. 258 с.
4. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г., Тропкин С.Н. Некоторые особенности геотехнического моделирования с помощью SIMULIA ABAQUS. // Труды международной научно-практической конференции “Инженерные системы - 2010”, Москва, 6-9 апреля 2010. М.: Изд-во РУДН, 2010. С. 78-88.
5. Волков-Богородский Д.Б. Применение аналитических расчетов на основе метода блоков в связных задачах механики сплошных сред // Труды Всероссийской научно-практической конференции “Инженерные системы - 2008”, Москва, 7-11 апреля 2008. – М.: Изд-во РУДН, 2008. – С. 123-138.
6. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование//Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С.166-177.
7. Власов А.Н., Мерзляков В.П. Усреднение деформационных и прочностных свойств в механике скальных пород. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 208с.
8. Vlasov, A.N., Volkov-Bogorodsky, D.B., and Yanovskii, Yu.G. “Effect of Inclusion Size on the Mechanical Properties of Elastomeric Composites,” Doklady Physics, Mechanics, 2012, Vol. 57, No. 4, pp. 157-159.