

Введение При проектировании современных транспортных и строительных сооружений часто практикуется возведение строительных сооружений в грунтах, находящихся в сложнейших физико-геологических условиях. Поэтому создание методик расчета трехмерных подконструкций, расположенных в грунтовых массивах, в настоящее время является особенно актуальным [1-14]. Развитие механики в области современного фундаментостроения и подземного строительства в значительной мере определяется достигнутыми к настоящему времени результатами в области математического и механического моделирования различных процессов или физических явлений, в частности, процессов деформирования и разрушения современных конструкций и сооружений. Давно существует определенный разрыв между потребностями практики и существующими строительными нормами и правилами (СНиПами), регламентирующими и направляющими деятельность проектировщиков и строительную практику, и возможностями уточненных расчетов элементов конструкций и сооружений исходя из современных возможностей более точной постановки практических задач и их реализация на ЭВМ на основе использования численных методов. Основным направлением ряда задач, стоящих перед механикой грунтов, является теоретический прогноз поведения грунтовых толщ под влиянием внутренних и внешних воздействий: разнообразных нагрузок от сооружений, изменения под действием природных факторов и деятельности человека, условий равновесия конструкций, например, при размывах, колебаниях уровня грунтовых вод, разгрузке глубоких слоев грунта при копке строительных котлованов и др. Задача исследования напряженно-деформированного состояния грунтов под действием внешних сил и собственного веса является основной в механике грунтов, и ее решение для различных случаев нагружения имеет непосредственное приложение в практике строительства. В строительстве весьма важно знать, как распределяются напряжения в грунте при загрузке части его поверхности, при каких условиях наступает предельное напряженное состояние, после чего возникают недопустимые деформации и нарушения сплошности грунтового массива и т.п. Важную роль играет математическое моделирование, позволяющее прогнозировать и оптимизировать технологические воздействия, обрабатывать и интерпретировать опытные данные. Традиционно в механике деформируемого твердого тела для решения геометрически нелинейных задач получило распространение лагранжево описание среды, при котором хорошо формулируется краевая задача в дифференциальной или вариационной формах, для решения которой возможно использование различных численных алгоритмов. В рамках современных численных методик получили развитие пошаговые методы нагружения, в соответствии с которыми процесс деформирования представляется как последовательность равновесных состояний, и переход из текущего состояния в последующее определяется

приращением нагрузки, изменением граничных условий или расчетной области и т.д. При моделировании взаимодействия элементов конструкций с грунтами в большинстве случаев для адекватной оценки характера деформирования используются различные методики контактного взаимодействия элементов конструкций между собой и с грунтом. Не учет контакта может привести к принципиально иному результату, в какой-то степени даже противоречащему здравому смыслу.

1. Деформирование водонасыщенных грунтов

При расчете водонасыщенных грунтовых сред принимается модель квазидвухфазного грунта, для которой считается, что газ либо полностью растворен в жидкости, либо находится частично в пузырьках, движущихся со скоростью фильтрующейся жидкости. Согласно принципу напряжений Терцаги соотношение между напряжениями в грунте можно записать в виде $\sigma = \sigma' + u$, где σ – тотальные напряжения в грунте, σ' – истинные напряжения в минеральных частицах грунта, u – поровое давление в жидкости. Здесь принято правило знаков, для которого сжимающие тотальное и истинное напряжения считаются отрицательными, а сжимающее давление в жидкости – положительным. С другой стороны тотальные напряжения можно представить в виде $\sigma = \sigma'' + \sigma'''$, где σ'' – эффективные напряжения, действующие на контактах между минеральными частицами «скелета» грунта, которые определяются в виде $\sigma'' = \sigma' - \alpha u$. С учетом закона фильтрации в форме Дарси-Герсеванова, который определяется соотношением вида $u = \frac{\mu}{k} \frac{dh}{dt}$, где μ – абсолютная проницаемость «скелета» грунта, η – вязкость жидкости, ρ – плотность жидкости, g – вектор ускорения свободного падения, так называемое уравнение пьезопроводности (для установившейся фильтрации) примет вид $\sigma' = \sigma'' - \alpha u$. Пренебрегая в суммарном уравнении баланса количества движений инерционными слагаемыми, для всего грунта в целом можно записать уравнение равновесия в виде $\sigma' = \sigma'' - \alpha u$, где ρ – плотность двухфазного грунта. Считая, что на части внешней поверхности расчетной области заданы кинематические граничные условия в виде $u = u_0$, а на части внешней границы Γ , дополняющей до полной внешней поверхности Σ , заданы статические граничные условия на Γ , вариационное уравнение равновесия запишем в виде $\delta U = 0$, (1) где U – объемная деформация «скелета» грунта. Считая, что на части внешней поверхности заданы главные граничные условия для порового давления на Γ , а на части внешней границы Γ , дополняющей до полной внешней поверхности Σ , заданы естественные граничные условия на обобщенный градиент напора жидкой фазы ∇u , вариационное уравнение фильтрации запишем в виде $\delta V = 0$. (2) Таким образом, получили основную систему вариационных уравнений (1) и (2), описывающих деформирование водонасыщенного грунта, в которых неизвестными являются проекции перемещений материальных частиц «скелета» и поровое давление.

2. Моделирование механического контакта

Для моделирования механического контакта используется специальный контактный элемент, позволяющий учесть различные случаи взаимодействия между собой контактирующих поверхностей,

в частности, отрыва, проскальзывания с трением и т.д. Общее разрешающее уравнение деформирования подконструкций с учетом механического контакта в вариационной форме имеет вид (3) где сумма по m - сумма по объемам блоков, по k обозначается сумма по накладкам, V_m - соответственно объемы блоков и накладок; σ_m - напряжения, деформации и перемещения элементарных объемов блоков; σ_k - напряжения и деформации в накладках, $\mathbf{g}$ - вектор ускорения свободного падения ($\mathbf{g}$ - сила тяжести), $\mathbf{p}$ - граничная нагрузка, действующая на части границы. Будем считать, что первоначальное обжатие контактного конечного элемента всегда существует. Для решения нелинейной задачи на базе уравнения (3) используется итерационный метод, являющийся комбинацией метода начальных напряжений и метода дополнительной деформации. Базовым для определения k -ой итерации является следующее вариационное уравнение (4) где величины σ_m^0 и σ_k^0 в (4) являются "начальными напряжениями". Для реализации описанной ранее математической модели взаимодействия накладок в рамках МКЭ удобно определить так называемый контактный элемент. Вводятся аппроксимации лицевых поверхностей (5) где $\mathbf{f}_m$ - известные функции формы для двумерной аппроксимации. Для аппроксимации вектора перемещений будем использовать представление, аналогичное (5), т.е. введем $\mathbf{u}_m$ в процессе деформирования первоначально параллельные лицевые поверхности и перестают быть таковыми и степень их относительных поворотов в процессе деформирования может достигать большой величины. Поэтому все геометрические, кинематические и силовые характеристики будем определять на обеих лицевых поверхностях самостоятельно. Другими словами, напряженно-деформированное состояние будем определять самостоятельно в каждой накладке (примыкающих, соответственно, к поверхностям m и k), что позволит более верно моделировать их состояния при проскальзывании друг относительно друга. 3.

Упругопластическое деформирование грунта Грунты, в которых размещаются исследуемые опоры, представляют собой "слоеный пирог" из песков, глин, суглинков, известняка, песчаника и т.д. Для песков и глин предельное состояние хорошо описывается условием прочности Мизеса-Боткина [5], которое записывается в виде где ϕ - угол внутреннего трения на октаэдрических площадках, σ_c - предельное сопротивление чистому сдвигу. Используемая итерационная процедура типа "метода начальных напряжений" представляет собой следующую последовательность действий. Первое приближение определяется из решения вариационного уравнения принципа виртуальных перемещений в предположении справедливости закона Гука: где σ_m - векторы напряжений и деформаций на m -ом трехмерном фрагменте грунта; $\mathbf{g}$ - векторы массовой и поверхностной нагрузок. В данном уравнении предполагается, что кинематические связи между фрагментами (условия непрерывности перемещений) и кинематические граничные условия выполняются априори. Уравнения равновесия для каждого фрагмента, статические условия сопряжения

и статические граничные условия выполняются автоматически в интегральном смысле. В этом случае разрешающее уравнение линейно и записывается в виде: Все последующие шаги итераций основаны на линейных уравнениях для приращений из решения которых находятся (6) Истинное деформированное состояние определяется как "Пробные" напряжения для анализа возможного предельного состояния и определения истинных и дополнительных напряжений находятся как (7) где - истинные напряжения, соответствующие принятой теории прочности. Для их вычисления по напряжениям (7) строится "упругопластическая матрица" и определяются (8) В правой части уравнения (6) фигурируют так называемые "начальные" или "дополнительные" напряжения, которые вводятся как разности "пробных" напряжений (7) и истинных (8) Переход от вариационной задачи к алгебраической производится посредством дискретизации методом конечных элементов.

4. Исследование деформирования кольца обделки тоннеля метрополитена в грунтовом массиве

В этом разделе изложены результаты исследования напряженно-деформированного состояния кольца обделки тоннеля метрополитена на основе различных расчетных схем в рамках двумерной задачи механики сплошной среды. Разработана и реализована методика определения напряженно-деформированного состояния в обделке тоннеля метрополитена на основе уточненных моделей, позволяющих учитывать такие факторы, как: реальное распределение свойств грунтового массива в расчетных сечениях; заглубление туннеля от поверхности; достижения грунтом предельного состояния; давление грунтовых вод; учет контактного взаимодействия между обделкой тоннеля и грунтом; раскрытие и смыкание зазора между блоками обделки тоннеля в окружном направлении; расположение замкового блока в обделке тоннеля. В качестве базового принимается заглубление туннеля на от поверхности, которое имеет место для той его части, которая исследовалась экспериментально. Это позволяет сопоставить результаты расчетов с опытными данными и судить о том, какая из расчетных схем наиболее близко соответствует реальности. По глубине распределение грунтов принимается различным. Вариант предполагает распределение грунтов в соответствии с данными геологических изысканий на отметке 100-105 м от станции «Суконная слобода» перегона «Площадь Тукая - Суконная слобода» левый путь. Свойства грунтового массива предполагаются кусочно-постоянными в глубину. Вариант В предполагает однородный грунт (супесь пластическая) со следующими характеристиками: модуль упругости , коэффициент Пуассона , удельный вес , коэффициент сцепления , угол внутреннего трения , пористость , коэффициент фильтрации . Вариант также предполагает однородный грунт (песок мелкий водонасыщенный) со следующими характеристиками: модуль упругости , коэффициент Пуассона , удельный вес , коэффициент сцепления , угол внутреннего трения , пористость , коэффициент фильтрации . Для бетона принимаются следующие параметры:

модуль упругости, коэффициент Пуассона, удельный вес. Используются 8-ми узловые конечные элементы Сирендипового типа. Размеры расчетной области выбирались такими, чтобы влияние кольца обделки на напряженно-деформированное состояние грунта полностью затухало. В частности: в стороны и в глубину размеры области определялись расстоянием (6 радиусов кольца обделки). На нижнем срезе ставились условия отсутствия вертикальных смещений, а на боковых - отсутствие горизонтальных. Первоначально задача деформирования неразрезного кольца обделки тоннеля метрополитена решалась в рамках линейной теории упругости в рамках плоской деформации, в которой учитывается взаимодействие кольца обделки с грунтовым массивом. Учет переменности свойств грунтов по высоте производился локально для каждой квадратурной точки каждого конечного элемента. Из полученных результатов можно сделать вывод, что значения напряжений для реального распределения грунтов (вариант) расположены между аналогичных значений напряжений для однородных грунтов (вариантов и). Другой расчетной схемой является задача о взаимодействии кольца обделки с грунтовым массивом, достигнувшем предельного состояния. Численные расчеты свидетельствуют о достижении грунтом предельного состояния в части расчетной области. Иллюстрацией этому является рисунок 1, где изображены области развитых пластических деформаций для варианта . Однако на напряженное состояние кольца обделки это обстоятельство сказывается мало. В таблице 1 приведены значения максимальных растягивающих и сжимающих окружных напряжений для приведенных в предыдущем разделе вариантов распределения грунтов. Отличие от результатов упругого расчета не превышает 1%. Рис. 1 Таблица 1

Распределение грунтов по высоте	MAX кг/см ²	MIN кг/см ²
Вариант А	126	-160
Вариант В	179	-205
Вариант С	112	-141

Еще одна расчетная схема предполагает решение стационарной задачи консолидации грунтовой среды, которая учитывает взаимное влияние давления грунтовых вод и напряженно-деформированного состояния скелета грунта. В условии отсутствия течения грунтовых вод на боковых и нижней гранях расчетной области ставятся условия не протекания. Также эти условия ставятся на границе раздела грунта и кольца обделки. Исследуются четыре возможных уровня грунтовых вод: 1) совпадает со свободной поверхностью; 2) ниже свободной поверхности на 2м (этот вариант является базовым в стандартной ситуации); 3) совпадает с верхним срезом туннеля; 4) совпадает с нижним срезом туннеля. Для варианта грунтов вычислялись осредненные значения коэффициентов пористости и фильтрации в виде $\frac{m}{K_f}$, где m - толщины слоев. В результате были получены значения $m=0,396$, $K_f=0,00988$ см/сек. Анализируя полученные результаты, можно утверждать, что учет давления грунтовых вод уменьшает максимальное растягивающее напряжение в обделке на 20-25% для наивысшего уровня грунтовых вод. Проведены исследования течения грунтовых вод на напряженное состояние в

грунте и обделке. Для этого на боковых поверхностях расчетной области задавались некоторые условные значения потока. В этом случае давление грунтовых вод приобретало неравномерность распределения по горизонтали, и появлялась боковая составляющая нагрузки. На рисунке 2 представлено распределение давления в жидкой фазе при уровне грунтовых вод - 2м от свободной поверхности. В кольце обделки распределение напряжений качественно меняется и незначительно увеличивается. Отметим, что наблюдается несимметричность напряжений относительно вертикальной плоскости. Сравнивая значения максимальных растягивающих напряжений с результатами, полученными ранее (для соответствующего уровня грунтовых вод) имеем увеличение их на 12%. На рисунке 3 приведены боковые смещения грунтового массива (фрагмент около кольца обделки тоннеля) для варианта В.

Рис. 2 Рис. 3

5. Расчет составного железобетонного кольца обделки тоннеля метрополитена

Решается задача упругого деформирования бетонного кольца обделки метрополитена, расположенного в толще грунтового массива. Предполагается, что кольцо обделки, поперечное сечение, состоящее из восьми сегментных блоков, соединенных друг с другом посредством резиновых прокладок. Расчет проводится на основе двумерных квадратичных 8-узловых конечных элементов сплошной среды Серендипова семейства, узловыми неизвестными которого являются проекции вектора перемещений на координатные оси рабочей плоскости. Построение сетки осуществляется автоматически, причем в некоторых случаях для сохранения приемлемой для расчета формы конечных элементов вместо четырехугольных элементов используются треугольные, получающиеся из четырехугольных путем вырождения одной из сторон. Расчет проводился для кольца обделки метрополитена, залегающего на глубине 6м. На рисунке 4 приведено распределение окружных напряжений для случая блочного кольца обделки метрополитена, расположенном в многослойном грунте (вариант А).

Рис. 4

В таблице 2 приведены максимальные и минимальные окружные напряжения (кГ/см²) в кольце обделки метрополитена, полученные для трех вариантов залегания грунтового массива (и) для верхнего и нижнего вариантов расположения замкового блока.

Вариант	Максимальные значения	Минимальные значения
Неразрезное кольцо	117 163 101	-149 -189 -129
Блочное кольцо (замковой блок – сверху)	59 63 58	-111 -127 -102
Блочное кольцо (замковой блок – снизу)	44 49 42	-83 -95 -80

Можно отметить следующие особенности деформирования разрезного кольца: нижнее расположение замкового блока уменьшает величину максимальных и минимальных окружных напряжений; максимальное растягивающее напряжение всегда возникает в блоке, противоположном замковому. Заключение

Предложенный метод решения задач механики с конкретными приложениями относится к современной технологии научного сопровождения, проектирования и строительства сложных объектов. Его использование позволяет проследить за

изменением напряженно-деформированного состояния и поля перемещений структурно изменяющейся расчетной области от начала и до конца строительства. Это позволяет более точно и технически грамотно принимать проектные решения для различных этапов строительных работ, что зачастую нельзя сделать, опираясь только на существующие СНиПы.