

Мирный Анатолий Юрьевич

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕОДНОРОДНЫХ ГРУНТОВ
КАК ОСНОВАНИЙ И МАТЕРИАЛА ЗЕМЛЯНЫХ
СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет»

Научный руководитель: **Тер-Мартirosян Завен Григорьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Болдырев Геннадий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»
профессор кафедры оснований и фундаментов

Арипов Надир Фатыхович
кандидат технических наук
МФ ЭНЕКС (ОАО), главный специалист
изыскательского управления

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук

Защита состоится «__» декабря 2013 года в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.138.08, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» по адресу: г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, Зал ученого совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет».

Автореферат разослан «__» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Знаменский В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Грунты с существенной неоднородностью гранулометрического состава широко применяются в качестве оснований, как естественных, так и искусственных, а также в качестве материала для грунтовых сооружений (плотин, дамб, насыпей). При проектировании оснований и конструкций из неоднородных грунтов в настоящее время используется математический аппарат механики грунтов как гомогенных сред, имеющих соответствующие характеристики деформируемости и прочности.

В действительности грунтовая среда является гетерогенной средой, состоящей из частиц неоднородного гранулометрического состава и строения. Очевидно, что распределение напряжений и деформаций в такой среде неоднородное. В связи с этим представительный объем эквивалентной гомогенной среды во многом зависит от минералогического и гранулометрического состава и строения грунтовой среды, от соотношений объемов, занимаемых твердой, жидкой и газообразной составляющими. В зависимости от их соотношений физико-механические свойства меняются в широких пределах.

Настоящая работа посвящена исследованиям механических свойств неоднородных грунтов и разработке аналитических, численных и экспериментальных методов определения эквивалентных параметров физико-механических свойств грунтов с существенной неоднородностью гранулометрического состава, а также количественной оценки НДС оснований и грунтовых сооружений из неоднородных грунтов.

Цель данной диссертационной работы

Целью настоящей работы является изучение и совершенствование существующих методов определения эквивалентных характеристик механических свойств грунтов с существенной неоднородностью гранулометрического состава, и на их основе количественная оценка НДС оснований фундаментов и грунтовых сооружений из неоднородных грунтов аналитическим и численным методами.

Основные задачи исследований

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Составить обзор и анализ имеющихся исследований механических свойств грунтов неоднородного гранулометрического состава, в том числе с позиции дискретной механики грунтов;
2. Рассмотреть основные и определяющие факторы, влияющие на эквивалентные характеристики неоднородного грунта в целом;
3. Описать особенности состава и строения различных разновидностей песчаных и пылевато-глинистых грунтов неоднородного строения, на основании чего предложить методику определения эквивалентных характеристик деформируемости и прочности;
4. Выполнить математическое моделирование испытаний многоплоскостного среза и компрессионных испытаний образцов грунта с существенной неоднородностью гранулометрического состава;
5. Провести многофакторный анализ лабораторных испытаний образцов грунта с известным неоднородным гранулометрическим составом для определения их механических свойств и сопоставления с результатами виртуального эксперимента и верификации принятого метода математического моделирования;
6. Разработать методику определения механических характеристик образцов неоднородной структуры по результатам стандартных испытаний и провести сравнение этих значений с результатами математического моделирования;
7. Разработать рекомендации по определению оптимального гранулометрического состава грунта для создания искусственных оснований и материалов грунтовых сооружений;
8. Разработать аналитические методы определения эквивалентных характеристик параметров грунта в целом в зависимости от свойств составных элементов неоднородного грунта и объемного соотношения вмещающего грунта и включений.

Достоверность результатов исследований основывается на использовании данных, полученных при лабораторных испытаниях образцов с известным гранулометрическим составом в приборах компрессионного и трехосного сжатия, а также на использовании математического аппарата прикладной механики грунтов.

Научная ценность работы заключается в:

1. Глубоком изучении и анализе взаимодействия отдельных составляющих грунтов неоднородного состава и строения и разработке на их основе методики определения эквивалентных механических характеристик грунтов;
2. Составлении конечно-элементной математической модели неоднородного грунта, включающей в себя все составляющие элементы с учетом особенностей их взаимодействия;
3. Решении задачи о взаимодействии составных частей неоднородных грунтов в упруго-пластической постановке в условиях компрессии и сдвига методом виртуального эксперимента. Из результатов этих испытаний получены прочностные и деформационные характеристики представительного объема грунта, используемые при дальнейшем моделировании НДС основания и грунтовых сооружений.

Научная новизна данной работы заключается в том, что:

1. Предложено и дано расчетно-теоретическое обоснование модели неоднородного грунта, состоящего из совокупности отдельных составляющих с учетом их взаимодействия, в том числе жесткости, механических характеристик и их количественного соотношения в единице объема. Это позволило представить грунт с существенной неоднородностью в виде сплошного однородного тела, обладающего эквивалентными деформационными и прочностными характеристиками.
2. Предложены принцип и экспериментальная методика определения величины эквивалентных механических характеристик грунтов с существенной неравномерностью гранулометрического состава.

3. На основании изучения и анализа взаимодействия отдельных составляющих неоднородного грунта определены факторы, влияющие на эквивалентные механические характеристики и получены зависимости между ними.

4. Дано аналитическое обоснование определения эквивалентных прочностных и деформационных характеристик грунтов с существенной неоднородностью сложения.

Практическое значение работы

Полученные в диссертационной работе результаты исследований позволяют:

Применять разработанную экспериментальную методику для определения эквивалентных механических характеристик неоднородных грунтов известного гранулометрического состава, слагающих основания или грунтовые сооружения;

Повысить достоверность определения эквивалентных механических свойств неоднородных грунтов и НДС искусственных оснований и земляных сооружений из неоднородных грунтов, что позволяет рационально использовать исходный грунтовый материал;

Дать рекомендации для определения оптимального гранулометрического состава при использовании неоднородных грунтов в качестве материала для сооружений.

Реализация работы

Предложенный метод определения механических характеристик неоднородных грунтов разработан на кафедре МГГ МГСУ и применен при математическом моделировании НДС оснований реальных объектов строительства г. Москвы, г. Чехова, г. Сочи, а также плотины Рогунской ГЭС в республике Таджикистан.

Результаты выполненной работы также использованы в практике научно-исследовательских работ на кафедре механики грунтов и геотехники (МГГ) МГСУ.

Апробация работы

Основные положения работы обсуждались на XIII, XIV и XV международных межвузовских конференциях «Строительство – формирование среды жизнедеятельности (Москва, апрель 2010, 2011 и 2012гг.), на XIX Российско-Польско-Словацком семинаре «Теоретические основы строительства» (Словакия, Жилина, 12-16 сентября 2010г.), на международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (Москва, 17-19 октября 2012г.), ежеквартальном геотехническом семинаре МГСУ (Москва, октябрь 2012г.).

Личный вклад соискателя:

Все лабораторные испытания и виртуальные эксперименты в данной работе, а также моделирование НДС оснований, сложенных неоднородными грунтами, выполнялось соискателем. Разработана методика определения эквивалентных механических свойств неоднородных грунтов.

На защиту выносятся:

Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических исследований механических свойств неоднородных грунтов и методы определения эквивалентных механических характеристик неоднородных грунтов.

Рекомендации по подбору оптимального гранулометрического состава грунта для искусственных оснований и земляных сооружений.

Классификация неоднородных грунтов и их механических свойств в зависимости от гранулометрического состава с использованием треугольной системы координат Ферре.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в восьми печатных работах, в том числе в трех, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, основных выводов, и списка литературы, включающего 62 наименования. Объем диссертации составляет 167 страниц машинописного текста, включающих 73 иллюстрации и 13 таблиц.

Автор искренне благодарит своего научного руководителя, почетного академика РААСН, заслуженного деятеля науки РФ, академика АВН РФ и Нью-Йоркской АН, почетного профессора МГСУ, доктора технических наук Тер-Мартirosяна З.Г., а также выражает признательность всем сотрудникам кафедры МГГ и НОЦ «Геотехника» за постоянное внимание и помощь при выполнении настоящей диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, отмечена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводятся обзор и анализ состояния изученного вопроса.

Рассмотрены современные методы учета неоднородности строения грунтов и ее влияния на механические характеристики грунта, выполнен анализ существующих методов определения характеристик неоднородных грунтов.

Существенный вклад в исследование механических свойств неоднородных сред в целом и неоднородных грунтов в частности внесли: Е.А. Амелина, Г.Г. Болдырев, С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Н.Я. Денисов, Ю.К. Зарецкий, И.И. Кандауров, А.В. Конвиз, Г.А. Куприна, В.И. Осипов, В.В. Охотин, Л.Н. Рассказов, П.А. Ребиндер, В.Н. Соколов, З.Г. Тер-Мартirosян, С.Б. Ухов, П.И. Фадеев, Е.Д., Цытович Н.А., Е.Д. Щукин, R.M. Christensen, R.D. Russel, J.C. Santamarina, A.W. Scempton, R.E. Taylor, K. Terzaghi и многие другие.

Отмечается, что в настоящее время существует несколько различных систем оценки неоднородности грунта, однако в действующей нормативной документации не учитываются все факторы, определяющие механические свойства неоднородных грунтов.

Многие ученые занимались изучением микроструктуры грунта. Целью этих исследований было более глубокое изучение механизмов взаимодействия частиц, природы сил, возникающих на контакте, и на их основе определение свойств грунтов в целом.

В результате выделилось самостоятельное направление в изучении грунтов – механика зернистых сред [Кандауров И.И., 1966].

В работах различных авторов отмечено влияние соотношения жесткостей включений и вмещающего грунта, условий контакта, внутренних связей между элементами неоднородного грунта. Различные сочетания этих факторов приводят к формированию принципиально различного напряженно-деформированного состояния (НДС) [Тер-Мартirosян З.Г., 2005].

Экспериментальные данные, полученные с помощью метода фотоупругости (рис.1) подтверждают концентрацию напряжений вокруг включений и существенную неоднородность НДС в грунтах с крупными включениями [Santamarina J.C., 2001].

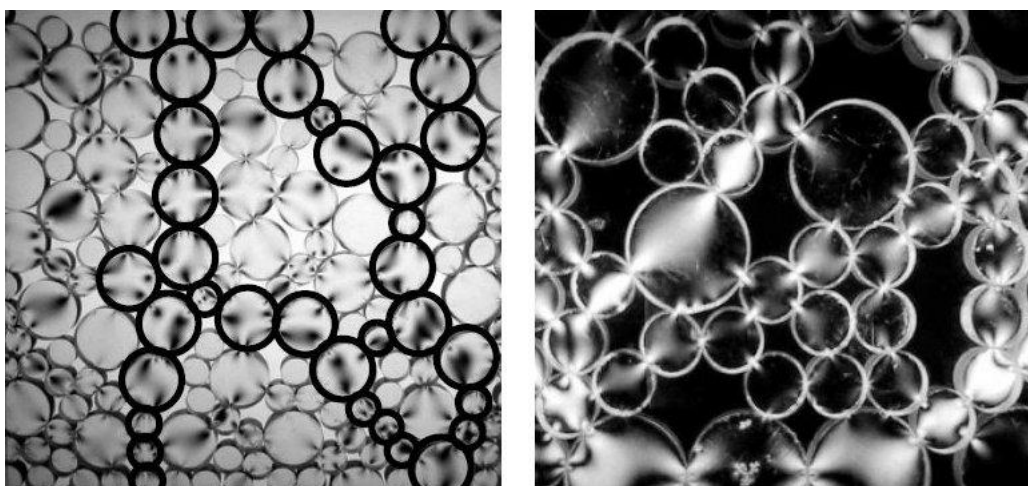


Рис.1. Распределение напряжений в неоднородном грунте, полученное методом фотоупругости

Аналитические исследования поведения неоднородных грунтов практически не проводились в связи с необходимостью учета трения на контакте включения с вмещающим грунтом. Решения подобных задач весьма сложны.

Действующая нормативная документация предполагает оценку свойств неоднородных грунтов по худшему компоненту – вмещающему грунту. При этом недоучет влияния включения на жесткость и прочность грунта в целом приводит к занижению механических характеристик неоднородных грунтов.

Большой опыт применения неоднородных грунтов и определения их механических характеристик накоплен в гидротехническом и дорожном

строительстве, где подобные грунты применяются в качестве материалов для дорожного полотна и дамб, а также земляных сооружений [Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н., 2001]. Определение свойств в таких случаях основано на применении нестандартного и дорогостоящего лабораторного оборудования, а также масштабных полевых экспериментах.

В связи с этим актуальной является проблема разработки методики определения эквивалентных характеристик неоднородных грунтов с целью прогнозирования НДС искусственных оснований и грунтовых сооружений. Общим результатом этих исследований может стать уточнение методов определения механических характеристик различных видов неоднородных грунтов, необходимых для проектирования оснований и сооружений из неоднородных грунтов.

Во второй главе диссертации отмечаются особенности решения задач прикладной механики грунтов с учетом неоднородности дискретной грунтовой среды на основе использования эквивалентных характеристик.

Для определения эквивалентных характеристик неоднородного грунта в работе предлагается рассмотрение двух основных структурных схем (рис. 2). В зависимости от структуры с помощью принципа равных деформаций могут быть получены различные решения для задач об эквивалентных механических характеристиках.

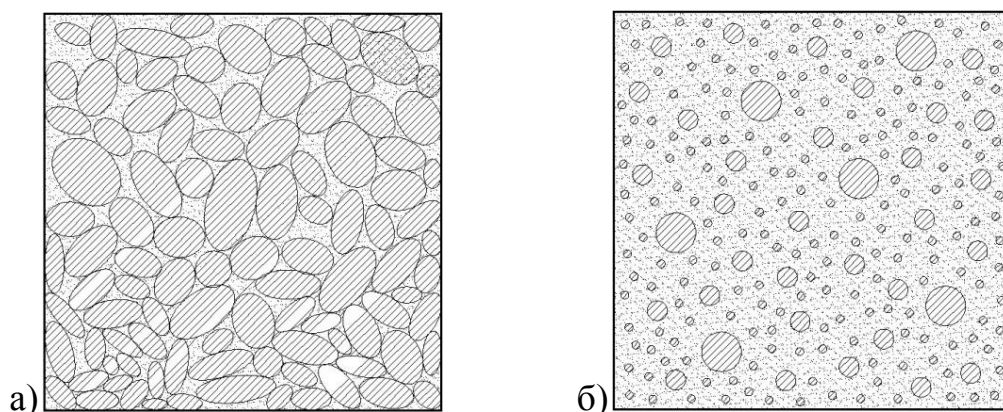


Рис.2. Схематическое представление структуры неоднородных грунтов, а) - крупнообломочный грунт с мелкозернистым заполнителем; б) - мелкозернистый грунт с отдельными включениями крупных фракций (более 2мм)

При этом содержание включений или вмещающего грунта оценивается с помощью параметров пористости n и m . Эквивалентные механические характеристики приводятся без индексов, индекс "1" обозначает характеристики для включений, индекс "2" обозначает характеристики для вмещающего грунта. Для структуры типа «А» эквивалентные модули объемной и сдвиговой деформации K и G определяются по формулам:

$$K = K_1 + K_2/n_1 \quad (2.1)$$

$$G = G_1 + n_1 G_2 \quad (2.2)$$

Для структуры типа «Б» по формулам:

$$K = \frac{K_1 \cdot K_2}{\alpha K_2 \cdot m_1 + K_1 \cdot n_1} \quad (2.3)$$

$$E = E_2 \frac{1-2\nu}{(1-m_1)(1-2\nu_2)} \quad (2.4)$$

где $\alpha = \sigma_1/\sigma \geq 1$ - коэффициент, учитывающий действующие напряжения.

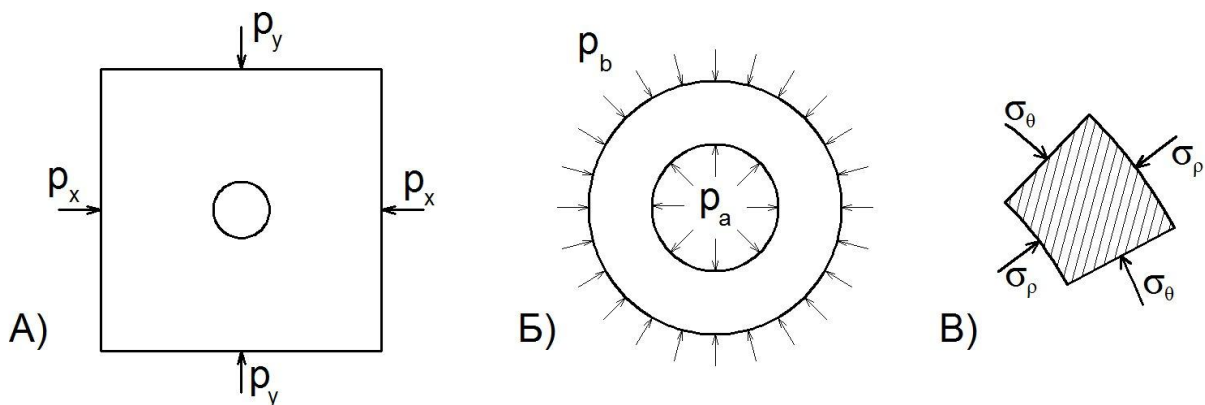


Рис.3. Расчетные схемы для задач Кирша (а) и Ляме (б), обозначение напряжений в полярных координатах (в)

В диссертации приводится анализ НДС грунта вокруг включений конечной жесткости, в том числе пустот. На основании анализа задач Кирша и Ляме (рис. 3) в рамках плоской задачи получены выражения для определения напряжений на контакте с включениями конечной жесткости. С помощью полученных формул может быть определено возникновение предельного состояния на контакте включения и вмещающего грунта, путем совместного рассмотрения выражений для компонентов напряжений с условием прочности вида:

$$\sin\varphi = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\sigma_\theta + \sigma_r + 2c \cdot \operatorname{ctg}\varphi} \quad (2.5)$$

где φ – угол внутреннего трения, c – сцепление, σ_θ – тангенциальное напряжение, σ_r – радиальное напряжение.

Тогда получаем для включения нулевой жесткости (поры):

$$p = c \frac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (2.6)$$

В случае шарообразного включения для объемной задачи значение критической нагрузки принимает вид:

$$p_{\text{ш}}^* = \frac{4c}{3} \frac{\cos\varphi}{(1 - \sin\varphi)} \quad (2.7)$$

В задачу может быть введено трение между включением и вмещающим грунтом, тогда может быть получено условие возникновения проскальзывания в точке при одноосном сжатии:

$$p = \frac{2c \cdot \cos\varphi}{\cos 2\theta - \sin\varphi} \quad (2.8)$$

На основании принципа равных перемещений получено аналитическое решение для включения конечной жесткости. Если принять E_1 , ν_1 – деформационные характеристики включения, а E_2 , ν_2 – деформационные характеристики вмещающего грунта, P_a – давление на внешней границе включения, а P_b – давление на внешней границе вмещающей среды, то в случае плоской задачи:

$$P_a = \frac{-2P_b b^2}{\frac{E_2}{E_1}(1 - \nu_1 - 2\nu_1^2)(b^2 - a^2) - a^2(1 - \nu_2) + b^2(1 + \nu_2)} \quad (2.9)$$

А для объемной задачи:

$$P_a = \frac{-P_b b^3(2r^3 + a^3 - 3a^3\nu_2)}{\frac{E_2}{E_1}2r^3(1 - 2\nu_1)(b^3 - a^3) + a^3(2r^3 + b^3)(1 - 3\nu_2)} \quad (2.10)$$

Аналитическое решение подобных задач сопряжено с большими трудностями, что позволяет рекомендовать применение численных методов. В результате решения задач об одиночном включении различной жесткости в плоской постановке численными методами при различных условиях контакта были получены следующие величины концентрации напряжений:

Таблица 1. Результаты численного моделирования задач о включении

Вид задачи	Интенсивность напряжений, σ'		
	Одноосное сжатие, $p_y=1, p_x=0$	Всестороннее сжатие, $p_y=p_x=1$	Чистый сдвиг, $p_y=1, p_x=-1$
Круглое отверстие	3	2,04	3,98
Круглое включение, коэффициент трения $\mu = 0,5$	2,02	1,43	4,55
Круглое включение, коэффициент трения $\mu = 0,7$	1,94	1,42	4,76
Круглое включение, коэффициент трения $\mu = 1$	1,88	1,42	4,45
Круглое включение, полное слипание	2,51	2,66	2,85

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию свойств неоднородных грунтов и их зависимости от гранулометрического состава и степени неоднородности. В рамках диссертационной работы была выполнена серия лабораторных испытаний в приборах компрессионного (65 испытаний) и трехосного сжатия (39 испытаний) искусственно изготовленных смесей с различным процентным содержанием и соотношением диаметров включений и частиц вмещающего грунта. Характерные зависимости по результатам компрессионных испытаний приведены на рисунке 4.

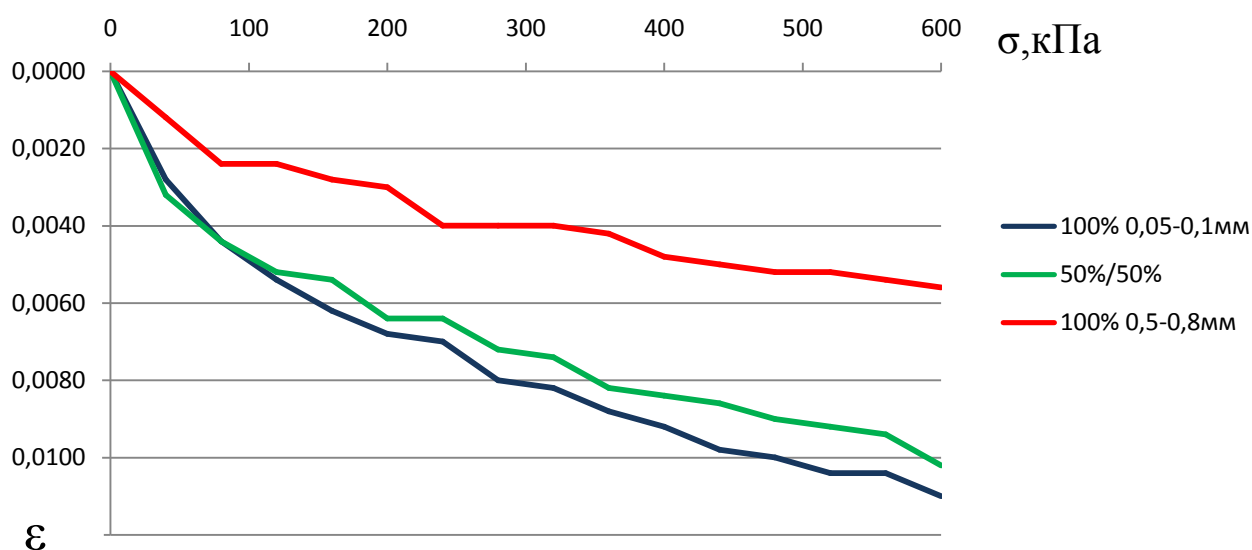


Рис.4. Результаты компрессионных испытаний искусственных смесей с различным процентным содержанием фракций

Из полученных зависимостей видно, что неоднородность и наличие включений существенно влияет на механические свойства грунта. В частности, в случае компрессионных испытаний деформируемость изменяется в среднем на 30%. В случае трехосных испытаний (рис. 5) наличие включений приводит к появлению пиковой прочности, что может быть объяснено армирующим действием включений и препятствием развитию поверхностей скольжения.

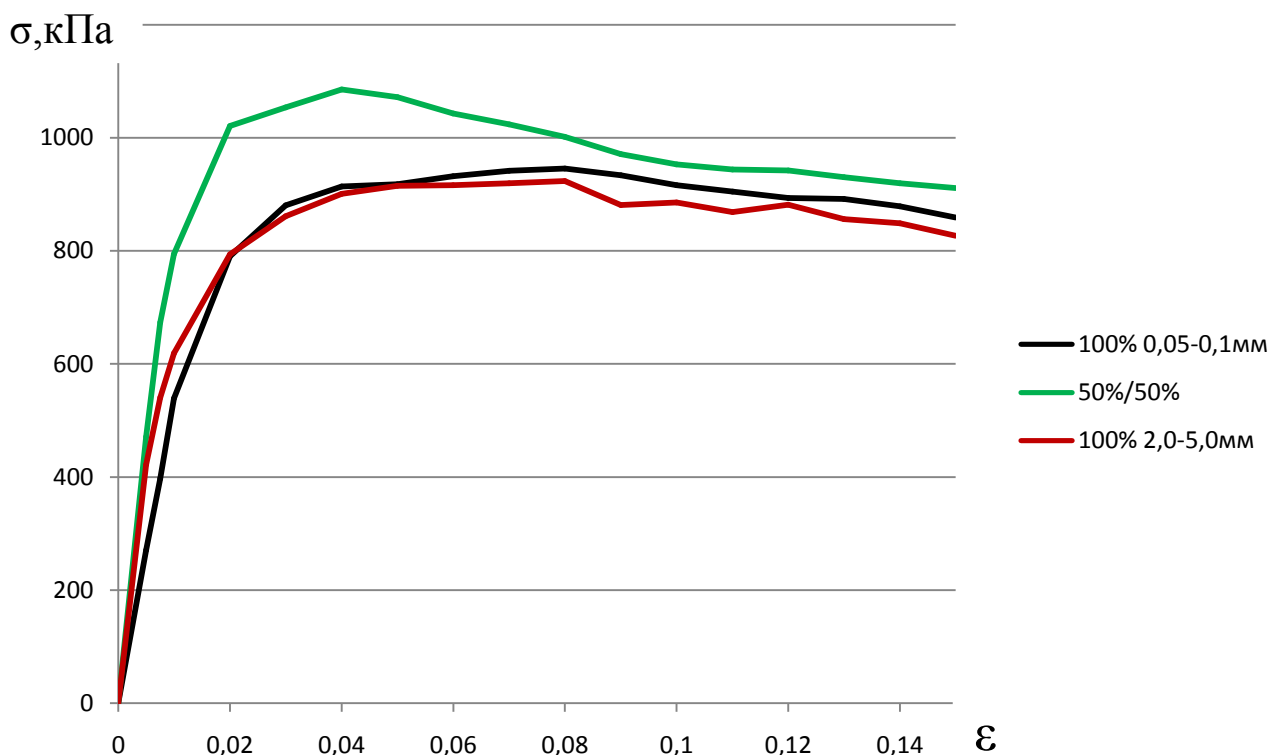


Рис.5. Результаты трехосных испытаний смесей с различным процентным содержанием фракций

Факторный анализ результатов эксперимента на основании теории, разработанной К. Пирсоном, позволил выявить зависимость механических свойств от основных параметров неоднородности грунта – процентного содержания включений и соотношения диаметров частиц. На рисунке 6 представлены наиболее характерные зависимости модуля деформации в диапазоне от 200 до 400кПа для смеси песков фракций 2-5мм и 0,05-0,1мм.

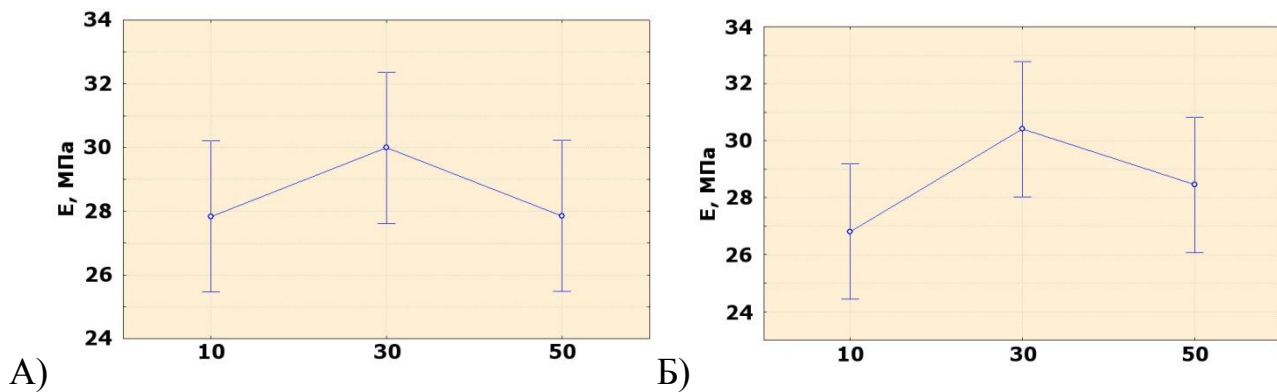


Рис.6. Зависимость модуля деформации от содержания включений (а) и соотношения диаметров (б).

В диссертационной работе приведены результаты виртуальных экспериментов, выполненных с помощью программного комплекса ANSYS, позволяющих широко варьировать параметрами жесткости компонентов неоднородного грунта и условий контакта между ними. В ходе виртуальных компрессионных испытаний и перекашивания были получены зависимости, позволяющие делать вывод о влиянии формы включений на жесткость и прочность неоднородного грунта.

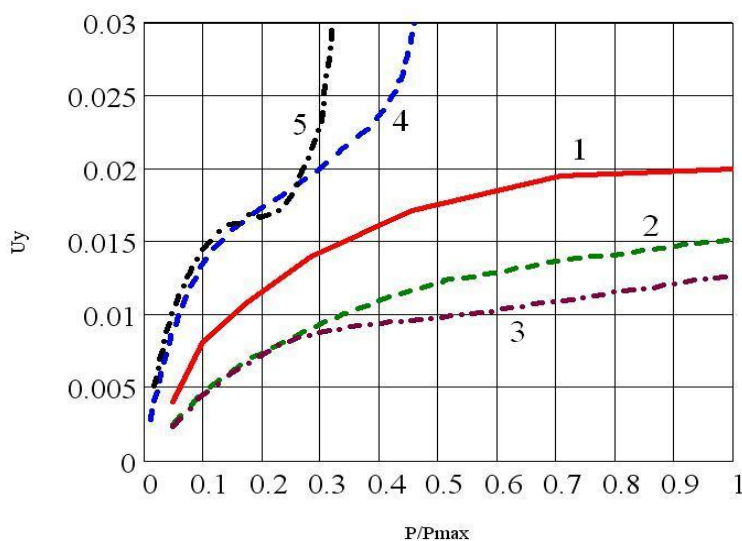


Рис.7. Результаты виртуальных компрессионных испытаний неоднородного грунта, 1 - для грунта без включений, 2 и 3 - с включениями различной формы, 4 и 5 - с порами различной формы.

На рисунке 7 представлены результаты виртуальных компрессионных испытаний. Представляет интерес результат, полученный для грунта с крупными круглыми порами. В ходе компрессионных испытаний после стабилизации деформаций произошло их интенсивное возрастание вследствие

схлопывания пор при переходе грунта в предельное состояние (кривые 4 и 5 рис. 7). Этот эффект наблюдался также при лабораторных испытаниях искусственно изготовленного образца грунта с крупными порами и объясняется арочным эффектом, удерживающим стенки поры от схлопывания при небольшом уровне напряжений. Количественная оценка данного явления имеет принципиальную важность для природных грунтов с крупными порами, в частности, лессов, как при естественной влажности, так и при увлажнении.

Зависимость напряжения-деформации сплошного образца грунта гладко-нелинейна на протяжении всего эксперимента, а образца грунта с включениями имеет кусочно-нелинейный характер. Последнее связано с тем, что происходит изменение НДС вокруг каждой крупной частицы и их проскальзывание относительно вмещающего грунта, при этом формируются переуплотненные зоны, передающие напряжения от частицы к частице. Это хорошо видно на представленных на рисунке 8а изополях напряжений, между включениями формируются зоны концентрации напряжений, и нагрузка воспринимается несущими столбиками из включений и вмещающего грунта между ними, при этом остальной вмещающий грунт недогружен.

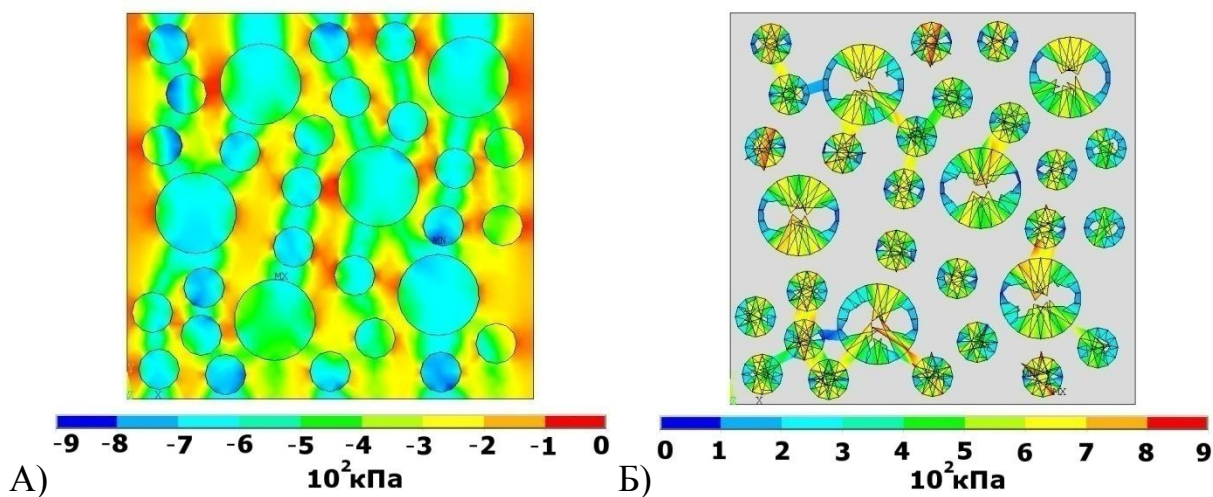


Рис.8. Изополя вертикальных напряжений (а) и эпюры контактных радиальных напряжений σ_r (б) в неоднородном грунте при компрессии

Применение численного моделирования позволяет также получать решение краевых задач о взаимодействии штампа с неоднородным грунтом. В результате проведения эксперимента было определено, что при действии штампа на неоднородный грунт формируется НДС, подобное НДС в

однородной среде, однако в нем наблюдается большое количество концентраторов напряжений (рис.9). При этом в зонах концентрации напряжения превышают средние в несколько раз, что может привести к переходу грунта в этих зонах в предельное состояние.

Образование максимумов напряжений на контакте с жестким штампом приводит к локальному смятию грунта и дополнительной осадке штампа за счет смятия.

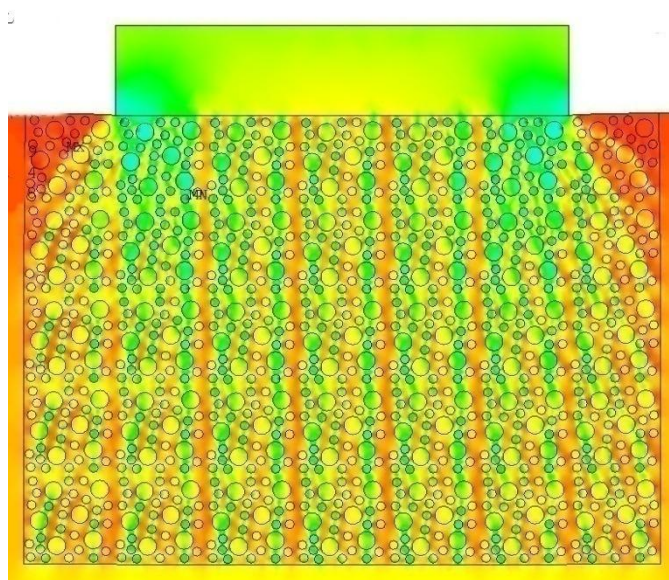


Рис.9. Изополя вертикальных напряжений σ_{yy} под штампом на неоднородном грунте

В четвертой главе описывается разработанная классификация грунтов по степени неоднородности, основанная на результатах аналитических и лабораторных исследований. В соответствии с этой классификацией предлагается разделять грунт в зависимости от гранулометрического состава на несколько категорий с различными принципами формирования НДС и микромеханикой.

Для наглядного отображения предлагаемой классификации грунтов была разработана графическая интерпретация, основанная на треугольнике Ферре (рис. 10).

На основании рекомендованных СП 22.13330.2011 значений механических характеристик различных грунтов и предложенной классификации были разработаны номограммы для определения механических

характеристик в зависимости от гранулометрического состава. На рисунке 11 представлена номограмма для модуля деформации. Аналогичные номограммы получены для угла внутреннего трения и сцепления.

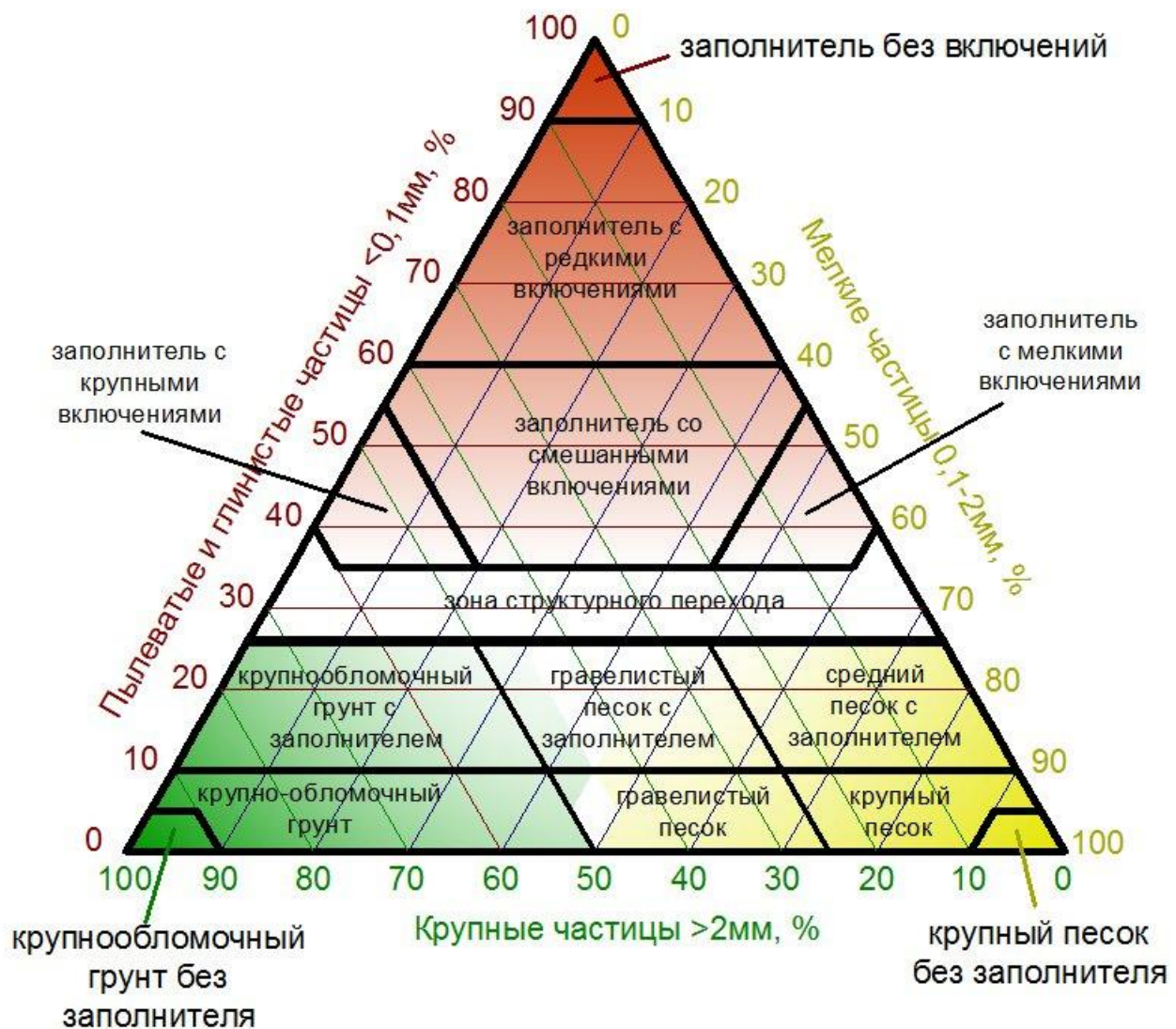


Рис.10. Классификация грунтов в зависимости от гранулометрического состава

На основании предложенной классификации представлены рекомендации по построению конечно-элементных моделей неоднородных грунтов для определения их эквивалентных механических характеристик посредством виртуальных испытаний в режиме компрессионного сжатия или многоплоскостного среза. При этом в зависимости от содержания частиц различного размера определяется их количество в модели, относительное расположение и, как следствие, неоднородный грунт относится к одному из типов структуры (рис 2, а или б).

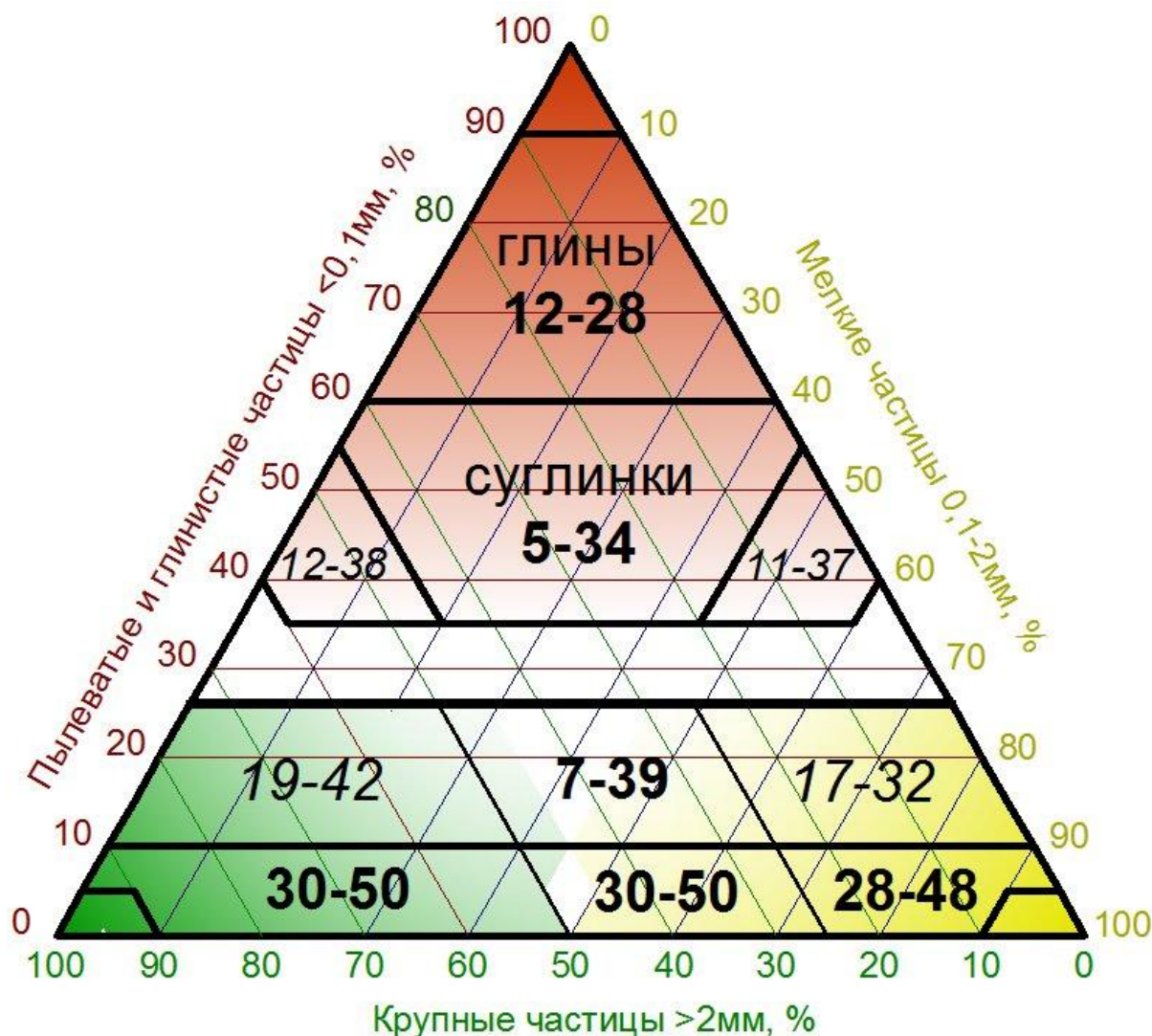


Рис.11. Значения модулей деформации неоднородных грунтов в зависимости от гранулометрического состава

В пятой главе описывается опыт применения способа определения эквивалентных характеристик неоднородных грунтов на примере объектов строительства в г. Чехов и Рогунской ГЭС в республике Таджикистан.

Для проверки устойчивости основания жилого комплекса «Чайка» в г. Чехов необходимо было выполнить оценку механических характеристик неоднородного грунта, представленного суглинком с дресвяно-щебенистыми включениями. В соответствии с действующей нормативной документацией свойства этого грунта определялись по свойствам заполнителя, что создавало опасность скольжения по наклонно залегающему ИГЭ.

Применение разработанной методики и учет эквивалентных механических характеристик неоднородного грунта позволил отказаться от

применения свайного фундамента в пользу плитного. В настоящее время возведение объекта завершено, здание введено в эксплуатацию.

В лаборатории НОЦ «Геотехника» при участии соискателя проводились работы по определению механических характеристик материала ядра плотины Рогунской ГЭС в республике Таджикистан, представленного суглинком с щебенистым заполнителем с природной плотностью скелета $\rho_d = 2,2 \text{ г/см}^3$. Испытания проводились на приборах трехосного сжатия с образцами диаметром 100мм, по результатам испытаний был получен паспорт прочности грунта (рис.12), где σ_i - интенсивность касательных напряжений, кПа, e_i - интенсивность деформаций сдвига, ε_v - объемные деформации, σ' - среднее напряжение, кПа.

С целью верификации предложенного метода определения эквивалентных характеристик было выполнено дополнительное определение прочностных и деформационных характеристик грунта-заполнителя для образцов диаметром 50мм. После этого на основании гранулометрического состава была составлена математическая модель.

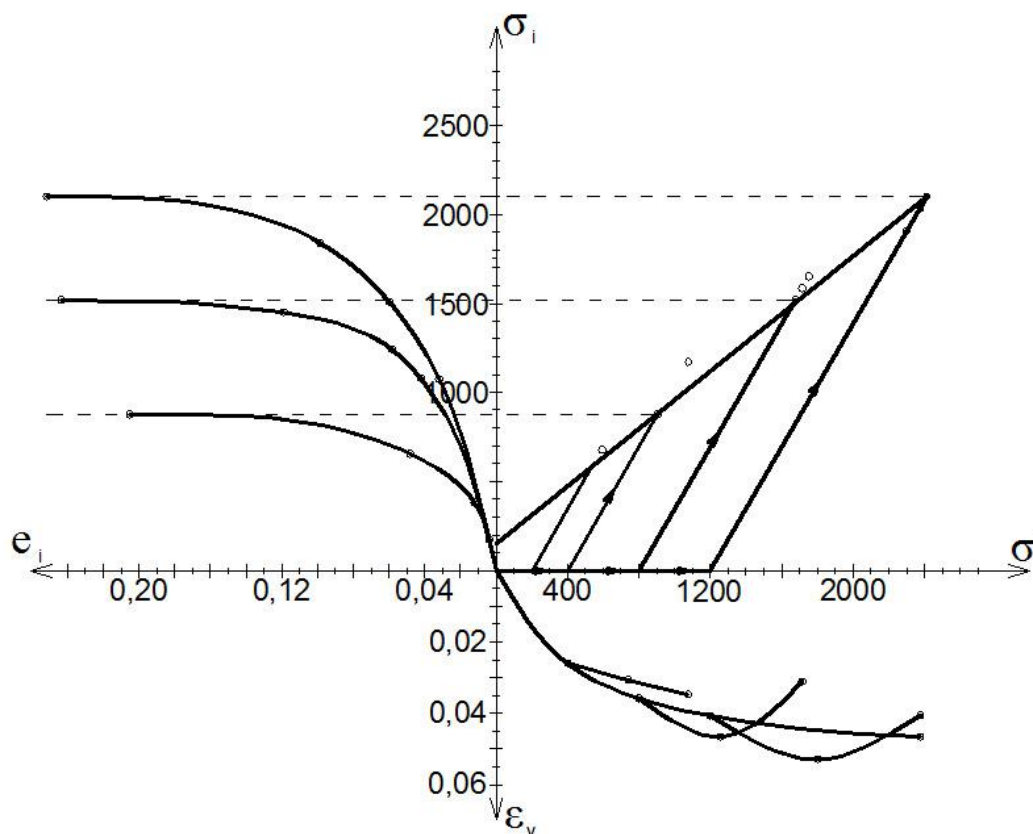


Рис.12. Паспорт прочности грунта ядра плотины Рогунской ГЭС

Проведение виртуальных компрессионных испытаний и испытаний многоплоскостного среза позволило получить эквивалентные характеристики неоднородного грунта, после чего было проведено сравнение полученных значений модуля общих деформаций E , сцепления c и угла внутреннего трения φ с результатами лабораторных испытаний. Расхождение с экспериментальными данными составило от 9 до 21%. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры прочности и деформируемости грунтов ядра плотины Рогунской ГЭС

	Сцепление c , кПа	Угол трения φ , °	Модуль деформации E , МПа
Лабораторные испытания смеси (трехосные испытания)	149	28	28-83
Лабораторные испытания вмещающего грунта (трехосные испытания)	107	22	11,8-29
Виртуальный эксперимент (ПК ANSYS, компрессия и сдвиг)	121	26	22-76

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основании выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы по диссертации:

1. Механические свойства оснований, сложенных грунтами с неоднородным гранулометрическим составом и строением существенно зависят в первую очередь от процентного содержания элементов неоднородного грунта (включений, пустот, прочих дефектов и заполнителя), соотношения их жесткостей и условий контакта между ними.

2. Анализ гранулометрического состава неоднородного грунта позволяет дать количественную оценку его механических свойств, в том числе определить эквивалентные параметры деформируемости и прочности, что подтверждено экспериментальными данными.

3. Взаимное расположение частиц разного размера в неоднородном грунте определяет напряженное состояние грунта, в том числе концентрацию и деконцентрацию напряжений.

4. Сопротивление сдвигу неоднородного грунта на разных уровнях приближения к предельному состоянию $\tau \rightarrow \tau^*$ обуславливается различной степенью реализации видов трения (скольжения и качения). С приближением к предельному состоянию все больше реализуется трение качения, что и объясняет проявление пиковой и остаточной прочности.

5. В ходе компрессионных испытаний определено, что подбор соотношения диаметров и процентного содержания включений позволяет увеличить модуль деформации смеси в целом на 15%, что может применяться при проектировании искусственных оснований.

6. В ходе трехосных испытаний определено, что содержание около 40% включений с соотношением диаметров 1/50 позволяет увеличить угол трения на 5%, что объясняется препятствием образованию поверхностей скольжения.

7. На основании экспериментальных данных предложена классификация грунтов по степени неоднородности, основанная на содержании пылеватых и глинистых частиц ($<0,1\text{мм}$) мелких частиц ($0,1\text{--}2\text{мм}$) и крупных частиц ($>2\text{мм}$).

8. Разработан метод определения эквивалентных характеристик неоднородных грунтов путем виртуального эксперимента на основании данных о гранулометрическом составе и механических характеристик грунта-заполнителя ($<2\text{мм}$).

9. Приведен пример определения эквивалентных характеристик в расчете НДС основания объекта в г. Чехов. Показано, что учет неоднородности

позволил уточнить параметры прочности грунта и отказаться от применения свайного фундамента.

10. Приведен пример определения эквивалентных характеристик неоднородного грунта - материала ядра плотины Рогунской ГЭС с применением виртуальных испытаний, проведено их сравнение с результатами лабораторных испытаний образцов диаметром 100мм и высотой 200мм.

11. Разработанный метод определения эквивалентных характеристик может быть рекомендован как первое приближение в случае невозможности их прямого определения по результатам экспериментальных исследований.

Список опубликованных работ по теме диссертации по списку ВАК:

1. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю., Соболев Е.С., О трении качения в грунтах, - М., Вестник МГСУ, 5/2011, с. 134-143.
2. Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В., Лабораторные испытания в МГСУ, - М., Инженерные изыскания 5/2013, с. 60-65.
3. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю., Зависимость механических свойств грунтов от степени неоднородности, - М., Инженерная геология 5/2013, с. 50-58.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю., Механические свойства неоднородных грунтов / Строительство-формирование среды жизнедеятельности: научные труды Тринадцатой международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. М.: АСВ, 2010. С. 790-794.
2. Тер-Мартirosян З.Г., Мирный А.Ю., Распределение напряжений и деформаций в неоднородном грунте с учетом формы, размеров и жесткости включений / Русско-Словацко-Польский геотехнический семинар. Жилина, 2010. С. 346-352.
3. Мирный А.Ю., Механическое движение частиц при сдвиге / Строительство-формирование среды жизнедеятельности: научные труды

конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. М.: АСВ, 2011. С.614-617.

4. Мирный А.Ю., Зависимость механического движения частиц грунта от шероховатости поверхности / Строительство-формирование среды жизнедеятельности: научные труды Тринадцатой международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов. М.: АСВ, 2011.С.610-614.

5. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В., НДС системы «основание - свайный фундамент – здание» с промежуточной подушкой при сейсмическом воздействии / «Численные методы расчетов в практической геотехнике»,С-Пб, изд-во СПбГАСУ, 2012. С. 183-190.