

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Геологический факультет

УТВЕРЖДАЮ
и.о. декана Геологического факультета
чл.-корр. РАН _____/Н.Н.Ерёмин/
«___» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Современные нелинейные модели деформирования и разрушения грунтов

Автор-составитель: Мирный А.Ю.

Уровень высшего образования:
Магистратура

Направление подготовки:
05.04.01 Геология

Направленность (профиль) ОПОП:
Гидрогеология, инженерная геология, геоэкология

Магистерская программа
Инженерная геология

Форма обучения:
Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом Геологического факультета
(протокол № _____, _____)

Москва

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки «Геология» (*программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки*).

Год (годы) приема на обучение: 2023

© Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения факультета.

Цель и задачи дисциплины

Целью курса «Современные нелинейные модели деформирования и разрушения грунтов» является подготовка будущего магистра к самостоятельной работе по определению в ходе инженерно-геологических изысканий параметров механических моделей грунтов, используемых при выполнении расчетов напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов, подготовке рекомендаций по выбору модели при проектировании.

Задачи - освоение основных принципов построения механических моделей материалов, в частности, грунтов, требований к выбору наиболее рациональной механической модели для расчета и ее верификации, знакомство с методами и средствами определения входных параметров модели.

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Освоение курса начинается с теоретических положений механики деформируемого твердого тела как основы механики грунтов. Обсуждаются положения теории упругости и теории пластичности, вводятся необходимые понятия, такие как компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС), константы упругости, понятия главных напряжений и главных деформаций, инварианты напряжений. Так же приводятся необходимые термины и определения. Отдельное внимание уделяется различным условиям прочности (пластичности) и их применимости к грунтовой среде, как к выражено пластическому телу. Дополнительно излагаются основы механики грунтов критического состояния, широко используемой в зарубежных странах, а так же особенности реологического поведения грунтов.

Дальнейший курс строится на поступательном изложении теоретических основ наиболее распространенных механических моделей по мере их усложнения. Для каждой модели приводится историческая справка; аналитическое обоснование; список и методика определения параметров, входящих в модель; рекомендации по ее применению к грунтовой среде. В курсе дисциплины рассматриваются следующие модели:

- упругая модель Гука;
- модели прочности (Треска - Сен-Венана, Мизеса - Губера);
- идеально-упругопластические модели (Кулона - Мора, Друкера - Прагера, Cam-Clay, Modified Cam-Clay, Хука - Брауна);
- упрочняющиеся модели (Hardening Soil, Hardening Soil Small-Strain, Soft Soil);
- вязко-упругие и упруго-вязкопластические модели (Soft Soil Creep, Sekiguchi - Ohta);
- модели, учитывающие анизотропию свойств (NGI-ADP, Jointed Rock).

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП – относится к вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия:

освоение дисциплин «Инженерная геология, часть 1. Грунтоведение», «Инженерная геология, часть 2. Инженерная геодинамика», «Высшая математика», «Механика грунтов», «Методы исследования грунтов в массиве», желательное освоение дисциплин «Решение инженерно-геологических задач численными методами», «Расчетные характеристики грунтов: методы определения и применение в проектировании».

Приобретенные знания, умения и навыки при освоении данной дисциплины могут быть востребованы в дальнейшем для выполнения научно-исследовательской работы и выпускных квалификационных работ.

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

| Компетенции выпускников (коды) | Индикаторы (показатели) достижения компетенций | Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), сопряженные с компетенциями |
|---------------------------------------|---|--|
|---------------------------------------|---|--|

| | | |
|---|---|---|
| <p>ОПК-3.М. Способен самостоятельно формулировать цели исследований, устанавливать последовательность решения профессиональных задач.</p> | <p>М.ОПК-3. И-1. Определяет цель, задачи, обосновывает актуальность и разрабатывает логическую схему проекта в профессиональной области. М.ОПК-3. И-2. Формулирует методiku решения исследовательских задач на основе классических подходов и инновационных идей геологических и смежных наук.</p> | <p>Знать: основные принципы построения механических моделей грунтов. Уметь: определять комплекс механических свойств грунтов и выбирать наиболее рациональную механическую модель, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: математическим аппаратом механики сплошной среды и механики грунтов.</p> |
| <p>ОПК-7.М. Способность профессионально выбирать и использовать современное научное и техническое оборудование для решения научных и практических задач по профилю подготовки.</p> | <p>ОПК-7. И-1. Знает технические характеристики и возможности основных современных видов научного и технического оборудования, используемого в работах по профилю подготовки. М.ОПК-7. И-2. Анализирует варианты решения поставленной задачи, и выбирает оптимальный вариант с позиций доступности оборудования и экономических затрат. М.ОПК-7. И-3. Имеет базовые практические навыки работы с современным оборудованием, применяемым в работах по профилю подготовки.</p> | <p>Знать: методы и средства определения входных параметров модели. Уметь: определять комплекс механических свойств грунтов и выбирать наиболее рациональную механическую модель, ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: математическим аппаратом механики сплошной среды и механики грунтов.</p> |
| <p>СПК-1.М. (2) Способность формировать программы инженерно-геологических исследований и инженерно-геологических изысканий в соответствии с поставленными научными и</p> | <p>М.СПК-1. И-1. Составляет программы инженерно-геологических исследований и инженерно-геологических изысканий в соответствии с поставленными научными и практическими задачами</p> | <p>Знать: требования к выбору модели для расчета и ее верификации. Уметь: ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях.</p> |

| | | |
|---|--|--|
| <p>практическими задачами, составлять программу инженерно-геологического мониторинга (формируется частично).</p> | | |
| <p>СПК-3.М. (2) Способность анализировать, обобщать и систематизировать результаты инженерно-геологических исследований и изысканий в соответствии с поставленными задачами и действующими нормативными документами.</p> | <p>М.СПК-3. И-1. Владеет навыками анализа, обобщения, систематизации и интерпретации данных в области инженерной геологии</p> | <p>Знать: методы и средства определения входных параметров модели. Уметь: ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. Владеть: математическим аппаратом механики сплошной среды и механики грунтов.</p> |

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 1 з.е., в том числе 28 академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем (28 а.ч. лекций), 8 академических часа на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – зачет.

5. Формат обучения не предполагает электронного обучения и использования дистанционных образовательных технологий (за исключением форс-мажорных обстоятельств – пандемии и т.п.)

6. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических или астрономических часов и виды учебных занятий

| Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю) | Всего (часы) | В том числе | | | | |
|--|--------------|--|----------|---|----------------------------------|----------|
| | | Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, часы</i> | | Самостоятельная работа обучающегося <i>Виды самостоятельной работы, часы</i> | | |
| | | Занятия лекционного типа | Всего | Работа с литературой (включая подготовку доклада) | Подготовка к контрольному опросу | Всего |
| Раздел 1. Краткие основы механики деформируемого твердого тела | 5 | 4 | 4 | 1 | - | 1 |
| Раздел 2. Основы теории пластичности | 5 | 4 | 4 | 1 | - | 1 |
| Раздел 3. Механика грунтов критического состояния | 5 | 4 | 4 | 1 | - | 1 |
| Раздел 4. Реологические свойства грунтов | 5 | 4 | 4 | 1 | - | 1 |
| Раздел 5. Комплексные многопараметрические модели | 7 | 6 | 6 | 1 | - | 1 |
| Раздел 6. Обзор прочих распространенных моделей | 5 | 4 | 4 | 1 | - | 1 |
| Промежуточная аттестация <u>устный зачет</u> | 4 | 2 | | 2 | | |
| Итого | 36 | 28 | | 8 | | |

Содержание лекций

Раздел 1. Краткие основы механики деформируемого твердого тела

Краткие основы механики деформируемого твердого тела. Напряжения, деформации, понятие напряженно-деформированного состояния в точке пространства. Понятия упругости, пластичности, прочности, вязкости, ползучести. Базовые элементы (простейшие реологические тела) построения механических моделей и их комбинации. Модели Прандтля, Максвелла, Кельвина-Фойгта. Линейно-упругая модель Гука, ее модификации применительно к механике грунтов. Закон Гука в общем виде, модуль общей деформации, модуль повторного нагружения.

Раздел 2. Основы теории пластичности

Пространство главных напряжений, вид поверхности текучести. Основные теории и условия прочности - Треска, Сен-Венана, Кулона-Мора, Мизеса. Соппротивление сдвигу, оценка пластических деформаций по ассоциированному и неассоциированному законам пластического течения. Модель Кулона-Мора, ее основные закономерности и модификации. Понятие дилатансии, теория Роу. Понятие потенциала пластичности, упрочнение и разупрочнение. Инвариантные условия прочности и их преимущества - условия Друкера-Прагера, Мацуока-Накаи, Ладе-Дункана. Модель Друкера-Прагера, ее основные закономерности.

Раздел 3. Механика грунтов критического состояния

Теоретические основы механики грунтов критического состояния, границы применимости. Понятие критического сопротивления сдвигу, поверхность Хворслева, линия критического состояния. Нелинейное объемное деформирование по логарифмическому закону. Модель Cam Clay, ее основные закономерности и модификации. Ограничение упругих объемных деформаций дополнительной поверхностью текучести. Модель Soft Soil, теоретическое обоснование и методы определения параметров. Рекомендации по применению модели Soft Soil.

Раздел 4. Реологические свойства грунтов

Способы учета вязкости деформирования, ползучесть и релаксация напряжений. Закон (модель) Бингама-Шведова, уравнение Кельвина-Фойгта, уравнение Максвелла. Модель Sekiguchi – Ohta, принцип статистической оценки объемной ползучести. Модель Soft Soil Creep, теоретическое обоснование и методы определения параметров. Модель Extended Drucker-Prager, понятие поверхности ползучести. Метод определения параметров ползучести при различных уровнях средних напряжений. Рекомендации по применению моделей с учетом реологических свойств.

Раздел 5. Комплексные многопараметрические модели

Гиперболический закон сдвигового деформирования. Модель Duncan-Chang, модель Ю.К. Зарецкого. Упрочнение и разупрочнение. Изотропное и кинематическое упрочнение. Модели с независимой жесткостью при сдвиге и объемном сжатии: модель Hardening Soil, модель Hardening Soil Small-strain. Методика определения параметров с учетом обеспечения совместности параметров. Особенности статистической обработки и оптимизации значений с учетом требований нормативных технических документов.

Раздел 6. Обзор прочих распространенных моделей

Анизотропия свойств и методы ее учета. Модель NGI-ADP, методы определения параметров и область применения. Специализированные модели для скальных грунтов. Условие прочности Хука-Брауна, модель Хука-Брауна, методы определения параметров прочности и жесткости скального массива. Модель Jointed rock, методы описания анизотропии строения скальных массивов. Модель UBC3D-PLM и ее возможности при моделировании динамического разжижения дисперсных грунтов. Заключительные положения курса.

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущий контроль усвоения дисциплины осуществляется при контрольном тестировании и контрольных опросах.

Примерный перечень вопросов (тестов) для проведения текущего контроля:

1. Компоненты пространственного напряженно-деформированного состояния в точке.
2. Базовые элементы механических моделей и их принципы работы.
3. Функциональные возможности линейно-упругой модели Гука.
4. Основные теории прочности, используемые в механике грунтов.
5. Функциональные возможности идеально-упругопластической модели Кулона-Мора.
6. Природа дилатансии и ее влияние на прочность грунтов.
7. Преимущества инвариантных условий прочности.
8. Функциональные возможности идеально-упругопластической модели Друкера-Прагера.
9. Основные положения механики грунтов критического состояния.
10. Различия между моделями семейства Cam-Clay.
11. Пластическое объемное сжатие в модели Soft Soil.
12. Принципы учета ползучести в моделях Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, Extended Drucker-Prager.
13. Гиперболический закон деформирования применительно к дисперсным грунтам.
14. Функциональные возможности модели упрочняющегося грунта Hardening Soil.
15. Необходимость учета нелинейности в упругой постановке.
16. Особенности моделей, применяемых для скальных и крупнообломочных грунтов.
17. Функциональные возможности модели Хука-Брауна.
18. Принципы выбора механической модели в зависимости от разновидности грунта и типа сооружения.
19. Дополнительные пункты программы изысканий при определении параметров нелинейных моделей.

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации (зачет е):

1. Пространственное напряженно-деформированное состояние в точке: теоретические предпосылки, компоненты НДС.
2. Принципы построения механических моделей, основные механические свойства материалов, в частности грунтов.
3. Линейно-упругая модель Гука: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
4. Основные теории прочности, используемые в механике грунтов.
5. Идеально-упругопластическая модель Кулона-Мора: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
6. Инвариантные условия прочности: принципы построения, преимущества и недостатки, область применения.
7. Неассоциированный закон пластического течения, понятие потенциала пластичности. Явление дилатансии.
8. Идеально-упругопластическая модель Друкера-Прагера: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
9. Основные положения механики грунтов критического состояния.
10. Функциональные возможности и область применения моделей семейства Cam-Clay.
11. Методы определения параметров ползучести и применение моделей Soft Soil Creep, Sekiguchi-Ohta, Extended Drucker-Prager.

12. Гиперболические модели деформирования, основные закономерности и методика определения параметров.
13. Функциональные возможности модели упрочняющегося грунта Hardening Soil.
14. Методика определения параметров модели упрочняющегося грунта Hardening Soil.
15. Идеально-упругопластическая модель Хука-Брауна: основные закономерности, параметры, применение к задачам механики грунтов.
16. Модель анизотропного грунта NGI-ADP: возможности, методы определения параметров, область применения.
17. Модель с возможностью воспроизведения динамического разжижения UBC3D-PLM: возможности, методы определения параметров, область применения.
18. Принципы выбора механической модели в зависимости от разновидности грунта и типа сооружения.
19. Дополнительные пункты программы изысканий при определении параметров нелинейных моделей.
20. Требования к лабораторному оборудованию, применяемому для определения параметров нелинейных механических моделей.

Шкала и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине (зачет).

| Оценка результатов обучения, соответствующие виды оценочных средств | Незачет | Зачет |
|---|--|--|
| Знания (устный опрос): основные принципы построения механических моделей грунтов, требования к выбору модели для расчета и ее верификации, методы и средства определения входных параметров модели. | Фрагментарные знания или отсутствие знаний | Сформированные систематические знания или общие, но не структурированные знания теории упругости и пластичности, принципов выбора оптимальной модели. |
| Умения (устный опрос): определять комплекс механических свойств грунтов и выбирать наиболее рациональную механическую модель, ориентироваться в литературных источниках и нормативных документах по расчетным моделям грунтов, ориентироваться в наиболее распространенных моделях. | В целом успешное, но не систематическое умение или отсутствие умений | Успешное и систематическое или в целом успешное, но содержащее отдельные пробелы (допускает неточности не принципиального характера) умение выбирать наиболее рациональную модель и обеспечивать ее параметрами. |
| Навыки (владения, опыт деятельности) (устный опрос): применение математического аппарата механики сплошной среды и механики грунтов для решения прикладных задач | Навыки владения математическим аппаратом механики сплошной среды отсутствуют | Сформированные навыки владения методами нелинейной механики грунтов в рамках изложенного курса или в целом сформированные навыки владения методами, но используемые не в активной форме. |

8. Ресурсное обеспечение:

А) Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов// М.: Изд-во Рост. ун-та, 1989. 607 с. (доступно в библиотеке МГУ и в электронном виде в кафедральном фонде)
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. // М.: Высшая школа, 1978. 447 с. (доступно в библиотеке МГУ и в электронном виде в кафедральном фонде)

- дополнительная литература:

1. Burland J.B. On the compressibility and shear strength of natural clays// Geotechnique, 1990, No. 3(4). P. 329-378.
2. Drucker D.C., Prager. W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Journal of applied mathematics, 1952, No. 10. P. 157-165.
3. Duncan J.M., Chang C.-Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils // Journal of the Soil mechanics and foundations division ASCE, 1970, 96. P. 1629-1652.
4. Janbu N. Soil compressibility as determined by odometer and triaxial tests // Proc. ECSMFE, 1963. P. 19-25.
5. Rowe P.W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact // Proceedings of the Royal Society of London, 1962. Vol. 269, No. 1339. P. 500-527.
6. Schanz T., Vermeer P.A. Bonnier P.G. The hardening soil model: Formulation and verification. // Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 years of PLAXIS, 1999. 16 p.
7. Vermeer P.A., de Borst R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. // Heron, 1984, No. 3 (29). 65 p.
8. Wood D.M. Soil behavior and critical state // Cambridge University Press, 1990. 462 p.

Б) Перечень программного обеспечения:

- лицензионное

лицензионное программное обеспечение не требуется

- нелицензионное и свободного доступа

пакет программ Open Office.

В) Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

- реферативная база данных издательства Elsevier: www.sciencedirect.com

Г) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

- поисковая система научной информации www.scopus.com

- электронная база научных публикаций www.webofscience.com

- электронная база научных публикаций <https://www.issmge.org/publications/online-library>

Д) Материально-техническое обеспечение:

Учебная аудитория с мультимедийным проектором

9. Язык преподавания – русский.

10. Преподаватель (преподаватели): Ответственный за курс — Мирный Анатолий Юрьевич (доцент кафедры инженерной и экологической геологии).

11. Разработчик программы: Мирный Анатолий Юрьевич (доцент кафедры инженерной и экологической геологии).