

А.Ю. Мирный, А.С. Мосина

The background features a complex abstract composition of geometric elements. A large brown circle is on the left, with a smaller teal circle inside it. A vertical yellow bar is on the right, with a red circle at its top. A red rectangle is positioned in the center, overlapping the yellow bar and the brown circle. A dark blue line runs diagonally from the bottom left towards the top right, intersecting several other elements. Several other lines in black, teal, and yellow are scattered across the composition, creating a dynamic and layered visual effect.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
МОДЕЛИ ГРУНТОВ**

ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ

**МОСКВА
2024**

УДК 624.131.439

ББК 38.623

М63

Рецензенты:

Профессор, доктор технических наук Г.Г. Болдырев

Профессор, доктор геолого-минералогических наук А.Г. Шашкин

Кандидат технических наук В.А. Васенин

Кандидат технических наук К.Г. Шашкин

М63 Математические модели грунтов для инженеров: монография /
А.Ю. Мирный, А.С. Мосина. – Москва, 2024. – 414 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-6051759-2-6

Изложены сведения о наиболее распространенных математических моделях физико-механического поведения дисперсных и скальных грунтов, применяемых при численном моделировании с использованием метода конечных элементов. Рассмотрены основные теоретические положения теории упругости и пластичности, приведено описание основных параметров различных моделей.

Для работников изыскательских и проектных организаций, преподавателей геологического и строительного направлений, студентов специальностей ВО 05.03.01, 05.04.01, 08.03.01, 08.04.01, 08.05.01.

УДК 624.131.439

ББК 38.623

ISBN 978-5-6051759-2-6

Мирный А.Ю., Мосина А.С., 2024

Издательство «ГеоИнфо» (ИП Ананко В.Н.), 2024

Оглавление

Предисловие	7
Введение	9
Условные обозначения	12
Термины и определения	15
Часть 1. Базовые сведения о математическом моделировании	20
1.1 Основные понятия механики деформируемого твердого тела	20
1.1.1 Механические свойства физических тел	21
1.1.2 Напряженно-деформированное состояние в точке	28
1.1.3 Инварианты напряжений и деформаций	33
1.1.4 Инварианты для осесимметричного напряженного состояния	35
1.1.5 Вид напряженно-деформированного состояния	36
1.1.6 Работа и энергия	38
1.2 Модели деформирования	39
1.2.1 Основные допущения механики грунтов	41
1.2.2 Модель грунта и модель основания	41
1.2.3 Элементы построения механических моделей	43
1.2.4 Построение комплексных механических моделей	46
1.2.5 Линейный закон деформирования	53
1.2.6 Логарифмический закон деформирования	57
1.2.7 Степенной закон деформирования	59
1.2.8 Гиперболический закон деформирования	63
1.3 Основы теории прочности и пластичности	65
1.3.1 Теории прочности	65
1.3.2 Пространство главных напряжений	68
1.3.3 Поверхности текучести, прочности и нагружения	70
1.3.4 Требования к условиям прочности и текучести	73
1.3.5 Некоторые распространенные условия прочности	75
1.3.6 Шатровые поверхности текучести	90
1.3.7 Упрочнение и разупрочнение	95
1.3.8 Основные теории пластичности	97
1.3.9 Законы пластического течения	99
1.3.10 Пластический потенциал	101
1.3.11 Правило Койтера	102
1.3.12 Теория критического состояния	103
1.3.13 Гиперупругость, гипоупругость и гипопластичность	106
1.3.14 Упругий гистерезис	107

1.4 Поведение грунтов при ограниченном дренировании	109
1.4.1 Принцип эффективных напряжений	110
1.4.2 Учет жесткости порового пространства – параметры Скемптона и Био	111
1.4.3 Фильтрационная консолидация	113
1.4.4 Эффективное сопротивление сдвигу	115
1.4.5 Сопротивление недренированному сдвигу	117
1.4.6 Режимы недренированного расчета	118
1.4.7 Фактор времени	120
1.5 Основы теории ползучести	121
1.5.1 Затухающая и незатухающая ползучесть	121
1.5.2 Объемная ползучесть	123
1.5.3 Сдвиговая ползучесть	124
1.5.4 Теория старения	126
1.5.5 Теория наследственной ползучести	127
1.5.6 Теория установившегося течения	129
1.5.7 Аналогия между ползучестью и пластическим течением	129
1.6 Параметры начального напряженного состояния	130
1.6.1 Бытовое вертикальное напряжение	131
1.6.2 Бытовое горизонтальное напряжение	133
1.6.3 Поровое давление в массиве	134
1.6.4 Коэффициент бокового давления в массиве	136
1.6.5 Параметры переуплотнения	141
1.7 Основы численных методов расчета	143
1.7.1 Метод граничных элементов	144
1.7.2 Метод конечных разностей	145
1.7.3 Метод дискретных элементов	146
1.7.4 Метод конечных элементов	147
Часть 2. Наиболее распространенные модели и методы определения их параметров	151
2.1 Классификация математических моделей физико-механического поведения грунтов	152
2.2 Линейно-деформируемые модели	157
2.2.1 Модель линейно-деформируемой среды (линейно-упругая)	157
2.2.2 Mohr – Coulomb	162
2.2.3 Drucker – Prager	167
2.2.4 NGI-ADP	170
2.3 Модели на основе механики грунтов критического состояния	175

2.3.1 Original Cam Clay	176
2.3.2 Modified Cam Clay	179
2.3.3 Soft Soil	182
2.3.4 NorSAND	194
2.4 Комплексные нелинейные модели	202
2.4.1 Модель А.И. Боткина	202
2.4.2 Модель Ю.К. Зарецкого	205
2.4.3 Duncan – Chang	210
2.4.4 Hyperbolic Duncan – Chang	217
2.4.5 Hardening Soil	221
2.4.6 Modified Mohr – Coulomb	240
2.5 Модели нелинейной упругости	246
2.5.1 Ramberg – Osgood	248
2.5.2 Jardine	250
2.5.3 Hardening Soil Small-strain	251
2.5.4 Generalized Hardening Soil	257
2.5.5 Hardening Soil Brick	257
2.6 Модели разупрочнения и динамического разжижения	261
2.6.1 Strain Softening	262
2.6.2 UBCSAND	264
2.6.3 Modified UBCSAND	268
2.6.4 UBC3D-PLM	274
2.6.5 PM4Sand и PM4Silt	277
2.6.6 OC-Clay (HASP)	282
2.7 Вязкопластические модели	286
2.7.1 Soft Soil Creep	287
2.7.2 Sekiguchi – Ohta	292
2.7.3 Модель А.Г. и К.Г. Шашкиных	296
2.7.4 Extended Drucker – Prager	297
2.8 Модели скальных массивов	298
2.8.1 Hoek – Brown	299
2.8.2 Jointed Rock	314
2.8.3 D-min	317
2.9 Гидродинамические модели	321
2.9.1 Burgers	322
2.9.2 FLO-2D	326
2.10 Методические рекомендации по применению нелинейных моделей	329

2.10.1 Калибровка и оптимизация	330
2.10.2 Верификация	333
2.10.3 Валидация	334
2.10.4 Обеспечение надежности и учет статистической изменчивости свойств	347
2.11 Область применимости нелинейных моделей	349
Часть 3. Численные программные комплексы и их возможности	358
3.1 Abaqus	358
3.2 Alterra	361
3.3 Ansys	362
3.3.1 Ansys Mechanical	362
3.3.2 Ansys LS-Dyna	363
3.4 CAE Fidesys	364
3.5 COMSOL Multiphysics	366
3.6 DIANA FEA BV	367
3.7 FEM Models	369
3.8 FLAC	370
3.9 GEO 5	372
3.10 Geotek Field	374
3.11 MicroFE-СДК	375
3.12 Midas GTS NX	376
3.13 Optum CE	378
3.14 PLAXIS	379
3.15 RocScience	382
3.16 SiO 2D	384
3.17 SCAD Office	385
3.18 Sofistik	387
3.19 ZSoil	388
3.20 ЛИРА	389
Заключение	391
Предметный указатель	392
Список литературы	395
Об авторах	408

А.Ю. Мирный, А.С. Мосина

Математические модели грунтов для инженеров

Ответственный редактор: В.Н. Ананко

Верстка и дизайн: М.А. Смирнов

Корректор: О.Н. Крендясова

Издательство «ГеоИнфо»

Тираж 1 500 шт.

Подписано в печать 04.09.2024 г.

Формат: 70х100/16

Печать: офсетная. Бумага: мелованная