



21世纪技术与工程著作系列·土木工程

小主应力方向荷载变化 土体变形规律及其应用

梅国雄 宋林辉 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



小主应力方向荷载变化 土体变形规律及其应用

梅国雄 宋林辉 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地阐述了小主应力方向加卸荷土体变形规律及其应用。全书共分为三篇十二章,其中第一章为绪论;试验篇(第二章至第四章)主要介绍小主应力方向加卸荷真三轴试验研究、球形压加卸荷 GDS 三轴试验研究和小主应力方向加卸荷平面应变试验研究;理论篇(第五章至第七章)主要阐述土压力与变形关系的经验公式,提出与经验公式验证和真空预压地基承载力研究;应用篇(第八章至第十一章)主要论述位移土压力模型在沉桩问题、水平受荷桩问题、基坑开挖问题和在刚柔复合支护结构中的应用;第十二章为结论与展望。

本书可供土木工程和水利工程等领域科研人员及高等院校相关专业的教师 and 研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

小主应力方向荷载变化土体变形规律及其应用/梅国雄等著. —北京:科学出版社,2010

(21 世纪技术与工程著作系列·土木工程)

ISBN 978-7-03-027354-3

I. ①小… II. ①梅… III. ①主应力-荷载-土体流变学-研究 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 076367 号

责任编辑:童安齐/责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 5 月第一次印刷 印张:15

印数:1—1 500 字数:282 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8003

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

**Soil Deformation and Application Loading or Unloading
from the Minor Principal Stress Direction**

Mei Guoxiong Song Linhui et al.

ABSTRACT

At present the research about the basic mechanical properties of the soil focused on the problems loading or unloading from the major principal stress direction. In fact, because the soil is a granular material, its properties are controlled by loading or unloading from the minor principal stress direction. In engineering practice, there are also many problems of loading or unloading from the minor principal stress direction. In this study, two types of typical problems: earth pressure in excavation and vacuum preloading in soil improvement, are re-researched ranging from experiment, theory and application. The main tasks are as follows:

Experiment Part

- (1) True triaxial tests of loading or unloading from the minor principal stress direction considering the initial stress state.
- (2) GDS triaxial tests of loading or unloading the spherical pressure considering the initial stress state.
- (3) Plane-strain tests of loading or unloading from the minor principal stress direction considering the initial stress state.

Theory Part

- (1) Establishment of earth pressure and deformation of the relationship between empirical formula.
- (2) Verification of earth pressure and deformation of the relationship between empirical formula.
- (3) Bearing capacity of vacuum preloaded subsoil.

Application Part

- (1) Application of earth pressure model considering displacement to pile driving.
- (2) Application of earth pressure theory considering displacement to mechanical analysis of bracing pile.
- (3) Application of earth pressure theory considering displacement to excavation.
- (4) Application of earth pressure theory considering displacement to retaining structure combination of rigidity and flexibility.

前 言

由于试验条件所限，目前人们广为使用的 Duncan-Chang、Cambridge 模型，甚至包括部分已经提出的各向异性模型的建立及参数的确定大都是依据轴对称样大主应力方向加卸荷三轴仪试验所得到的应力-应变关系。对于荷载在大主应力方向施加且主要关心对象是沉降的工程，当前的土体本构关系恰好能模拟这一应力路径，因而能较好的预测这些工程的工作性状，为工程建设发挥了巨大的作用。而对于以小主应力方向加卸荷为主的问题，则勉为其难。

事实上，由于土体是典型的散粒体材料，小主应力方向加卸荷将对其力学性质起决定性作用；工程实践中也广泛存在小主应力加卸荷问题，如工程实践中经常碰到的土压力问题、软土地基加固方法中的真空预压问题、水位发生变化等问题。由于目前的土体本构关系很难反映这些实际的加卸荷应力路径，导致计算结果与实测相差很大，甚至发生规律性错误。因此，非常有必要针对具体工程问题进行特定应力路径的试验研究。

本书主要阐述两类典型问题，即基坑工程中的土压力和地基处理中的真空预压问题。书中重点从试验、理论和应用方面进行系统论述。具体撰写分工如下：

第一章：绪论（张坤勇、梅国雄撰写）。

试验篇

第二章：考虑初始应力的小主应力方向加卸荷真三轴试验研究（李治、梅国雄撰写）；

第三章：考虑初始应力的球形压加卸荷 GDS 三轴试验研究（徐铠、梅国雄撰写）；

第四章：考虑初始应力的土体小主应力向加卸荷平面应变试验研究（陈浩、梅国雄撰写）。

理论篇

第五章：土压力与变形关系的经验公式提出（梅国雄、宋林辉撰

写);

第六章:土压力与变形关系的经验公式验证(宋林辉、梅国雄撰写);

第七章:真空预压地基承载力研究(梅岭、梅国雄撰写)。

应用篇

第八章:考虑位移土压力模型在沉桩问题中的应用(宋林辉、梅国雄撰写);

第九章:考虑位移土压力模型在水平受荷桩问题中的应用(宋林辉、梅国雄撰写);

第十章:考虑位移土压力模型在基坑开挖问题中的应用(赵建平、梅国雄撰写);

第十一章:考虑位移土压力思想在复合支护结构中的应用(周峰、崔晓东、张帆、梅国雄撰写)。

第十二章:结论与展望(宋林辉、梅国雄撰写)。

目 录

ABSTRACT

前言

第一章 绪论	1
1.1 土体的变形特性	1
1.1.1 非线性和非弹性	1
1.1.2 塑性体积应变和剪胀性	2
1.1.3 塑性剪应变	3
1.1.4 硬化和软化	4
1.1.5 应力路径和应力历史对变形的影响	5
1.1.6 固结压力的影响	7
1.1.7 各向异性	8
1.1.8 流变特性	9
1.1.9 结构性	10
1.2 土体本构模型研究进展	12
1.2.1 本构模型的发展	12
1.2.2 主要的本构模型形式	14
1.3 各向异性研究进展	19
1.3.1 20 世纪 60 年代以前的工作	19
1.3.2 20 世纪 70~80 年代左右的成果	20
1.3.3 20 世纪 90 年代至今	25
1.4 土的本构关系的检验	29
1.4.1 不同仪器的相同试验的检验	30
1.4.2 土的本构关系的检验	31
1.5 研究意义及研究内容	33
1.5.1 研究意义	33
1.5.2 研究内容	34
参考文献	34

试 验 篇

第二章 土体加卸荷真三轴试验研究	37
2.1 真三轴试验研究现状	37

2.2	试验思路	39
2.3	试验介绍	39
2.3.1	常规三轴试验	39
2.3.2	真三轴试验	40
2.4	试验成果	41
2.4.1	理论分析	41
2.4.2	试验曲线汇总	44
2.5	试验分析	46
2.6	小结	48
	参考文献	48
第三章	土体球形压加卸荷 GDS 试验研究	50
3.1	试验土样	50
3.2	原状土样的常规压缩试验	51
3.3	原状土样的各向等压试验	52
3.3.1	试验目的	52
3.3.2	试验的应力路径	53
3.3.3	试验结果及其分析	53
3.4	不同应力路径下的球应力加载、卸载试验(CKC 三轴仪)	55
3.4.1	考虑土体初始各向异性的球应力加载、卸载试验	55
3.4.2	考虑不同剪应力水平条件下的球应力加载、卸载试验	57
3.5	模拟真空预压加载、卸载应力路径的原状样试验(GDS 三轴应力系统)	60
3.5.1	试验目的及试验方案	60
3.5.2	具体试验应力路径、试验结果及其分析	61
3.6	模拟真空预压加载、卸载应力路径的重塑样试验(GDS 三轴仪)	67
3.6.1	试样制备	67
3.6.2	试验方案	68
3.6.3	重塑土试验应力路径、试验结果及其分析	69
3.7	小结	74
	参考文献	74
第四章	土体小主应力向加卸荷平面应变试验研究	75
4.1	问题的提出	75
4.1.1	应力路径试验的研究	75
4.1.2	基坑开挖条件下典型的应力路径分析	76
4.1.3	平面应变试验的思路	77

4.2 模拟基坑开挖过程的试验研究	78
4.2.1 土体原始应力状态的模拟	78
4.2.2 排水条件的模拟	79
4.3 试验过程及结果	79
4.3.1 常规三轴试验	79
4.3.2 平面应变试验	80
4.4 试验分析	86
4.5 卸荷、加荷条件下的非线性切线弹性模量	88
4.5.1 土体的 D-C 模型	88
4.5.2 侧向卸荷条件下的非线性切线弹模公式推导	90
4.5.3 侧向加荷条件下的非线性切线弹模公式推导	94
4.5.4 竖向加荷条件下的非线性切线弹模公式推导	94
4.6 不同应力路径下的试验结果及分析	95
4.6.1 常规三轴试验	95
4.6.2 平面应变的侧向卸荷试验	97
4.6.3 平面应变的侧向加荷试验	98
4.6.4 平面应变的竖向加荷试验	99
4.6.5 试验的综合分析	100
4.7 小结	103
参考文献	104

理 论 篇

第五章 基于试验的土压力与侧向位移关系分析	105
5.1 引言	105
5.2 土体变形对土压力影响的机理	105
5.3 土压力与基坑支护结构位移间的关系	106
5.3.1 土压力与支护结构物位移间的关系	106
5.3.2 卸荷土体的应力-应变关系研究	106
5.4 主动侧土压力与侧向位移关系	108
5.5 被动侧土压力与侧向位移关系	109
5.6 小结	110
参考文献	111
第六章 真空预压加固地基承载力研究	112
6.1 地基承载力的计算理论	112
6.1.1 极限平衡法	112

6.1.2 滑移线法	114
6.1.3 极限分析法	114
6.2 真空预压基本原理	114
6.3 真空预压下的地基承载力确定方法	116
6.3.1 数值计算方法的思路	116
6.3.2 算例分析	118
6.3.3 参数分析	119
6.4 小结	122
参考文献	123
第七章 考虑位移的土压力计算模型研究	125
7.1 土压力与变形关系的公式推导	125
7.1.1 土压力随位移的发展规律	125
7.1.2 考虑位移的土压力计算模型	126
7.1.3 模型参数的关系	127
7.1.4 参数求解	128
7.2 计算模型的验证	129
7.2.1 主动土压力的验证	129
7.2.2 被动土压力的验证	131
7.3 基于朗肯土压力理论的考虑位移的土压力计算公式	134
7.3.1 计算公式的推导	134
7.3.2 计算式中各参数的取值	135
7.4 已有模型试验的验证	138
7.4.1 主动土压力的验证	138
7.4.2 被动土压力的验证	139
7.5 土压力修正系数讨论	141
7.5.1 被动土压力修正系数的讨论	141
7.5.2 主动土压力修正系数的讨论	143
7.6 小结	144
参考文献	145

应 用 篇

第八章 土压力模型在沉桩问题中的应用	147
8.1 沉桩问题的研究现状	147
8.1.1 圆孔扩张法(CEM)	147
8.1.2 应变路径法(SPM)	147

8.1.3 有限单元法(FEM)	147
8.1.4 滑移线理论	148
8.1.5 研究新思路	148
8.2 土压力模型在沉桩中的应用	149
8.2.1 浅层土体隆起分界面公式的推导	149
8.2.2 深部土体变形计算式	150
8.3 数值计算及对比分析	151
8.3.1 计算模型	151
8.3.2 计算结果	152
8.3.3 对比分析	154
8.4 小结	155
参考文献	155
第九章 土压力模型在水平受荷桩问题中的应用	157
9.1 引言	157
9.2 研究现状	157
9.3 考虑位移的土压力计算公式	160
9.4 土压力模型在横向承载桩分析中的应用	161
9.4.1 横向承载桩挠度计算公式	161
9.4.2 挠度计算式中各项系数的正负性研究	164
9.4.3 挠度计算式中各项的收敛情况	165
9.4.4 挠度计算式中初始项系数的求解	165
9.4.5 横向承载桩所受土反力计算公式	165
9.4.6 计算公式适用范围讨论	166
9.5 同一横截面上桩周各点的挠度和土反力计算式	167
9.5.1 桩移动方向前方土体挠度的计算公式	167
9.5.2 桩移动方向后方土体挠度的计算公式	168
9.5.3 对挠度计算公式的讨论	169
9.5.4 同一横截面桩周各点土反力计算式	169
9.6 算例分析	169
9.6.1 算例参数设定	169
9.6.2 桩沿深度纵剖面的情况	170
9.6.3 桩在同一横截面上的情况	170
9.7 小结	171
参考文献	172

第十章 土压力模型在基坑开挖问题中的应用	173
10.1 共同变形理论	173
10.1.1 共同变形理论基本假定	173
10.1.2 共同变形理论基本计算公式	173
10.2 弹性杆系有限单元法	175
10.2.1 支护结构的有限元离散	175
10.2.2 单元分析	175
10.2.3 整体分析	177
10.3 基于共同变形理论考虑土压力受变形影响的有限单元法	179
10.3.1 土压力的结点荷载转换	180
10.3.2 被动区土体弹簧系数的处理	180
10.3.3 支承条件引入总刚度矩阵	181
10.3.4 程序初步设计框图	182
10.4 算例分析及讨论	183
10.4.1 悬臂式支护结构	183
10.4.2 单支点式支护结构	184
10.4.3 各类参数变化对变形的影响	185
10.5 压顶圈梁对变形的影响	187
压顶圈梁对支护结构的作用的有限单元分析	188
10.6 小结	190
参考文献	191
第十一章 基于土压力模型的复合挡土墙应用研究	192
11.1 刚柔复合挡土结构概念	192
11.2 刚柔复合挡土墙工作机理	193
11.2.1 土压力与位移的关系	193
11.2.2 柔性材料吸收能量	193
11.3 刚柔复合挡土结构模型试验	194
11.3.1 试验模型设计	194
11.3.2 试验土体及柔性材料	198
11.3.3 试验步骤及工况	199
11.3.4 试验结果整理及分析	199
11.4 刚柔复合支护结构二维数值分析	203
11.4.1 计算模型的建立	203
11.4.2 有限元计算结果	204
11.4.3 参数分析	204

11.5 刚柔复合支护结构三维数值分析	208
11.5.1 计算模型	208
11.5.2 传统支护结构	208
11.5.3 刚柔复合支护	210
11.6 工程实例	213
11.6.1 传统支护	213
11.6.2 刚柔复合支护	215
11.6.3 对比分析	216
11.7 小结	217
参考文献	218
第十二章 结论与展望	219
12.1 结论	219
12.1.1 试验研究	219
12.1.2 理论研究	220
12.1.3 应用研究	220
12.2 展望	222
12.2.1 试验研究	222
12.2.2 理论研究	222
12.2.3 应用研究	223
致谢	224

第一章 绪 论

1.1 土体的变形特性

1.1.1 非线性和非弹性

金属和混凝土等坚硬材料，在受轴向拉压时，应力-应变关系如图 1.1 (a) 所示，初始阶段为直线，材料处于弹性变形状态；当应力达到某一临界值时，应力-应变关系明显地转为曲线，材料同时存在弹性变形和塑性变形。土体也有类似的特性，图 1.1 (b) 为土的三轴试验得出的轴向应力差与轴向应变之间的关系曲线。与金属等材料不同的是，其初始的直线阶段很短，对于松砂和正常固结黏土，几乎没有直线阶段，加荷一开始就呈非线性。土体的非线性变形特性比其他材料明显得多。

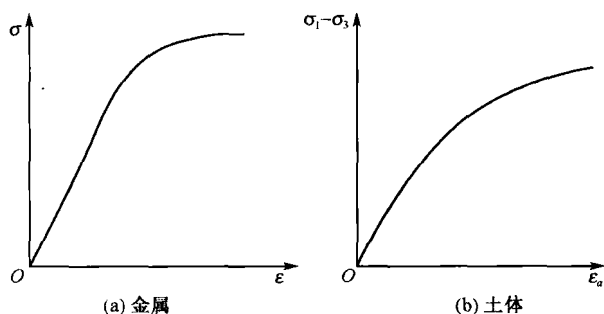


图 1.1 材料的应力-应变关系

这种非线性变化的产生，就是因为除弹性变形以外还出现了不可恢复的塑性变形。土体是松散介质，受力后颗粒之间的位置调整在荷载卸除后不能恢复，形成较大的塑性变形。如果加荷到某一应力后再卸荷，曲线将如图 1.2 所示。OA 为加荷段，AB 为卸荷段。卸荷后能恢复的应变即弹性应变，不可恢复的那部分应变为塑性应变。

经过一个加荷退荷循环后，再加荷，将如图 1.2 中的 BC 段所示，它并不与 AB 线重合，而存在一个环，叫回滞环。回滞环的存在表示退荷再加荷过程中能量消耗了，要给以能量的补充。再加荷还会产

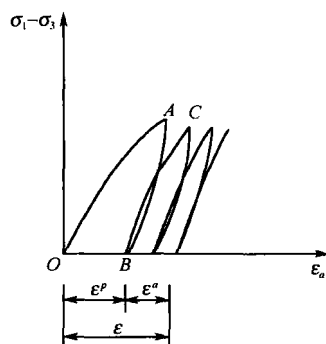


图 1.2 加荷与卸荷的应力-应变曲线

生新的不可恢复的变形, 不过同一荷载多次重复后塑性变形逐渐减小。

土体在各种应力状态下都有塑性变形, 哪怕在加荷初始应力-应变关系接近直线的阶段, 变形仍然包含弹性和塑性两部分。退荷后不能恢复到原点。非线性和非弹性是土体变形的突出特点。

1.1.2 塑性体积应变和剪胀性

土体受力后会有明显的塑性体积变形。图 1.3 为土样在三轴仪中逐步施加各向相等的压力 p 后, 再卸除, 所得到的 p 与体积应变之间的关系曲线, 可见存在不可恢复的塑性体积应变, 而且它往往比弹性体应变更大。这一点与金属不同, 金属被认为是没有塑性体积变形的。塑性变形是由于晶格之间的错动滑移而造成的, 它仅体现形状改变, 不产生体积变化。土体的塑性变形也与颗粒的错位滑移有关。在各向相等的压力作用下, 从宏观上来说是不受剪切的; 但在微观上, 颗粒间有错动。图 1.4 可以说明这种变形机理。压缩前, 颗粒架空, 存在较大孔隙; 压缩后, 有些颗粒挤入原来的孔隙中, 颗粒错动, 相对位置调整, 颗粒之间发生着剪切位移。当荷载卸除后, 不能再使它们架空, 无法恢复到原来的体积, 就形成较大的塑性体积变形。不仅压力会引起塑性体积变形, 而且剪切也会引起塑性体积变形。在三轴仪中对土样施加偏压力的同时, 减小围压, 而保持平均法向应力 (球应力) p 不变, 所得出的应力-应变曲线将如图 1.5 所示。尽管体积应力 p 不变, 但图中仍有体积应变, 可见测得的体积应变完全是剪切造成的。在图 1.5 (a) 中, 体积应变随偏应力增大而增大。剪切引起的体积收缩, 叫剪缩。软土和松砂常表现为剪缩。在图 1.5 (b) 中, 开始阶段为剪缩, 以后曲线向上弯曲, 即体积膨胀, 这种现象叫做剪胀。紧密砂土、超固结黏土, 常表现为剪胀。文献中常把剪切引起的体积变化, 不管膨胀还是收缩, 都称为剪胀性, 剪缩是负的剪胀。剪胀性是散粒体材料的一个非常重要的特性。

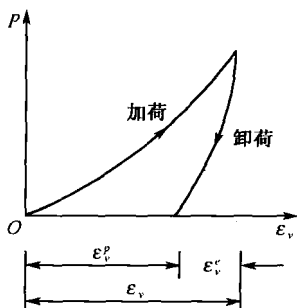


图 1.3 p - ϵ_v 曲线

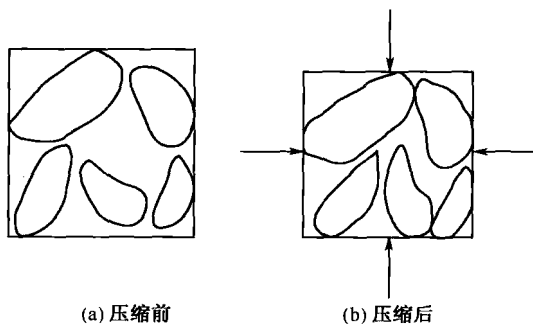


图 1.4 土体的压缩

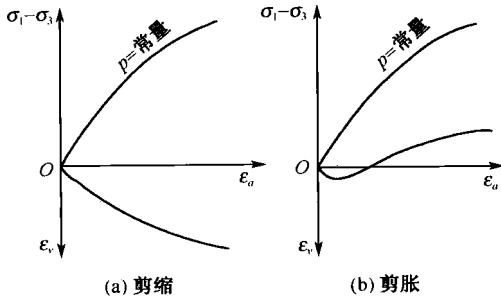


图 1.5 剪切引起的体积应变

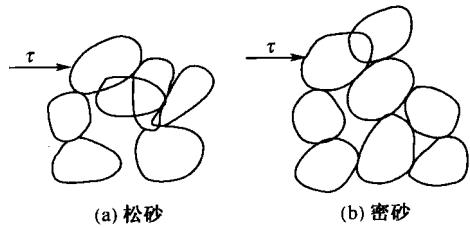


图 1.6 松砂和密砂的剪胀性

砂土受剪所产生体积变形可用图 1.6 来说明。假定土体沿水平向受剪切。对于松砂，受剪后某些颗粒填入原来的孔隙，体积减小，对于密砂，原来的孔隙体积较小，受剪时一些颗粒必须上抬才能绕过前面的颗粒产生错动滑移，于是体积膨胀。黏土的剪胀、剪缩机理也是相似的。剪切引起的体积变形与颗粒的错动相关联，当荷载卸除后，便不能恢复，应看作塑性体积变化，另外，根据胡克定律，剪应力不引起弹性体积变形。因此，剪切所引起的体积变形也只能认为全部是塑性变形。

1.1.3 塑性剪应变

土体受剪发生剪应变。剪应变的一部分与骨架的轻度偏斜相对应，荷载卸除后能恢复，它是弹性剪应变；另一部分则与颗粒之间的相对错动滑移相联系，为塑性剪应变。

不仅剪应力能引起剪应变，体积应力也会引起剪应变。三轴仪中的土样，在应力差和围压下变形稳定后，保持应力差不变而降低围压，则会发现，随着围压减小，轴向应变不断增大，直至最后达到破坏。在这一应力变化过程中，应力莫尔圆直径不变，位置不断向左移动，如图 1.7 (a) 所示，莫尔圆从 A 移动到 B。当围压降到一定值，莫尔圆与库仑破坏线相切，土样剪坏 [图 1.7 (b)]，这时剪应变已发展到很大数值。由此可见，球应力的变化确实引起了不可恢复的剪应变。

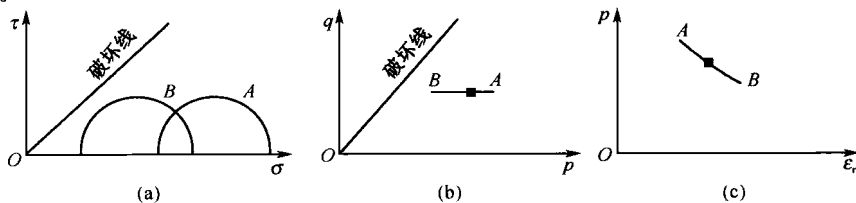


图 1.7 球应力变化引起的剪应变