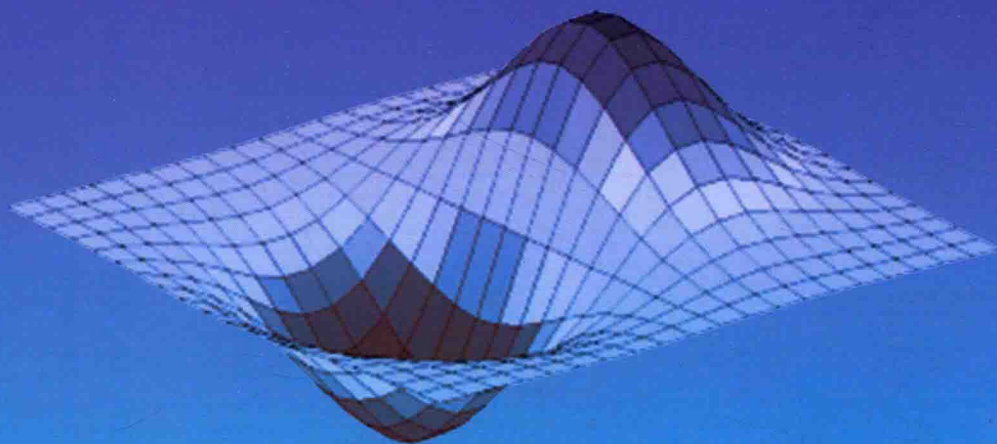


土的本构关系数值建模研究

任青阳 著



非外借



科学出版社

土的本构关系数值建模研究

任青阳 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

土的本构模型是岩土工程理论与实践中的关键基础问题。本书摒弃了寻找塑性势作为唯一建模途径的传统思路,采用数值方法进行建模。首先介绍了不同应力路径下膨胀土、砂土和黏土的三轴压缩试验;然后用数值建模方法建立了膨胀土、砂土和黏土在多种应力路径下的弹塑性本构方程;最后把本构方程嵌入有限元程序,通过对三轴试验土样变形的有限元计算结果与相应的试验结果进行对比,验证了模型的精度。

本书可供从事岩土工程、工程地质等相关专业高等院校、科研院所的教学、科研人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

土的本构关系数值建模研究/任青阳著. —北京:科学出版社, 2017.12
ISBN 978-7-03-055789-6

I. ①土… II. ①任… III. ①土应力-本构关系-系统建模-研究
IV. ①TU431

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第298726号

责任编辑:张 展 朱小刚/责任校对:王萌萌
责任印制:罗 科/封面设计:陈 敬

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>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年12月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年12月第一次印刷 印张:10 1/4

字数:210 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

土的本构关系以土的应力应变规律为研究对象，是岩土工程科学的重要理论基础。目前，大多数现有的土的弹塑性本构模型都是基于塑性势理论，寻找塑性势的解析表达式是唯一的建模途径。然而，这些模型还不能全面、准确地反映土的特性，如压硬性、剪胀性，特别是无法反映应力路径的影响。

鉴于此，作者进行了膨胀土、砂土和黏土数值建模的研究。数值建模具有许多优于传统建模方法的地方。土的本构方程是直接从三轴试验数据中提炼出来的，克服了寻找塑性势解析表达式的困难；建模中土的初始状态和加载路径自由选择，从而可以考虑任何初始状态和应力路径对本构关系的影响。

含水量是膨胀土产生膨胀与收缩、影响强度等重要特性的主要原因，实践证明，膨胀土随着气候、地质环境和工程建设活动等条件的变化而发生水分迁移和转化。因此，在水的变化影响下，膨胀土性质发生改变，显示出不同的特性。膨胀土抗剪强度的可变性，大多与水的作用有关，膨胀土吸水引起各向异性膨胀，有可能产生偏差应力。在不同吸水分布情况下所引起的不均匀膨胀，同样可能引起膨胀土的破坏。因此，在工程实际中膨胀土的起始含水量被视为可以预测膨胀潜势的重要判据。

本书进行了膨胀土的物性试验、矿物化学成分试验，进行了不同含水量、容重的常规三轴压缩排水和不排水试验，用数值建模方法建立了在不同含水量条件下的膨胀土弹塑性本构方程，并把该本构方程嵌入有限元程序，通过对三轴试验土样的变形分析获得了应力-应变关系曲线。与相应的试验结果对比发现，两者吻合较好。同时，绘出了两种不同含水量情况下整个应力场 (p, q) 中的应力应变关系三维曲面，经过对比，发现两者之间存在明显差别，证实了含水量对膨胀土本构关系的影响是比较明显的。

本书对砂土进行了等主应力比路径、常规路径和等 p 应力路径三种应力路径下的循环加载试验。用数值建模方法建立了砂土在三种应力路径下的弹塑性本构方程，并把该本构方程嵌入有限元程序，通过对三轴试验土样变形的有限元计算结果与相应的试验结果进行对比，验证了模型的精度是比较高的；绘出了三种应力路径下整个应力场 (p, q) 中的应力-应变关系曲面和屈服轨迹，经对比可知，三者之间存在显著差别，而且应力-应变关系曲面和屈服轨迹所反映

出的这种差别具有相同的变化趋势，从而证实了应力路径对本构关系的影响是不可忽略的。

本书进行了黏土四种应力路径——增 p 排水剪切、等 p 排水剪切、常规三轴不排水剪切和减 p 排水剪切下的三轴加载试验，建立了这四种应力路径下黏土的弹塑性本构模型，给出了整个应力场中的应力-应变关系，通过可视化显示为应力场中的空间应变曲面。特别是建立了减 p 路径和不排水条件下黏土的弹塑性本构模型，为土体挖方工程和不排水条件下的相应土体工程提供了符合实际的本构模型。通过应力-应变关系可视化和数值模拟，进一步表明数值建模方法能够比较全面地描述不同应力路径下的土体变形特征。

对比黏土四种应力路径下正常固结土的变形结果发现，在应力范围、应变峰值、应变曲面的形状和体积屈服轨迹的变化趋势上都存在显著差别，而剪切屈服轨迹相似，这些差别都是由应力路径相关性造成的。同时说明，土体本构关系中应力路径相关性不可忽视；而数值建模方法是描述土体应力路径相关性的有效方法。

由不同应力路径下正常固结土的剪切与体积屈服轨迹的对比表明，应力路径对黏土应变硬化的演变过程有显著影响；同时说明，在土体弹塑性本构模型的传统建模方法中，通过假设屈服面的固定形式来描述土体应力-应变关系是不准确的。

研究表明，数值建模优于传统的建模方法，它不仅能较好地描述土体的剪胀性、压硬性，而且能反映出不同初始状态和应力路径的影响。数值建模方法是可行的、有效的，具有广阔的发展前景。

在本书的编写过程中，得到了王靖涛教授、周葆春教授的大力支持，在此深表感谢！

本书主要得到了国家自然科学基金“强卸荷条件下岩体流变特性对高边坡锚固效果研究(41472262)”、“巴渝学者特聘教授”和“交通运输青年科技英才”等项目的资助，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免会有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

符 号 表

σ	应力
ε	应变
E	弹性模量
G	剪切模量
K	体积模量
τ	剪应力
p	平均正应力
q	广义剪应力
σ_1	最大主应力
σ_2	中间主应力
σ_3	最小主应力
ν	泊松比
ε_e	弹性应变
ε_p	塑性应变
ε_v	体应变
$\bar{\varepsilon}$	剪应变
ε_v^p	塑性体应变
ε_v^e	弹性体应变
ε_s^p	塑性剪应变
u	孔隙压力
w	含水量
ρ	密度
e	孔隙比
OCR	超固结比
c	黏聚力
φ	内摩擦角
W_l	液限
W_p	塑限

I_p	塑性指数
f	屈服函数
F	力
D	变形
DCTC	固结排水剪切三轴压缩试验
DPTC	固结排水剪切等 p 三轴压缩试验
UCTC	固结不排水剪切三轴压缩试验
DRTC	固结排水剪切减围压三轴压缩试验
ERTC	固结排水等主应力比三轴压缩试验

目 录

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 土的本构关系	1
1.2 土的力学特性	2
1.3 土的本构模型发展及现状	8
1.3.1 解析方法	9
1.3.2 数值方法	15
1.3.3 膨胀土的本构关系研究	18
1.4 问题的提出	20
1.5 主要研究工作	21
第 2 章 岩土本构关系及影响因素	23
2.1 土的应力-应变	23
2.1.1 应力	23
2.1.2 应变	24
2.2 土的本构关系模型	25
2.2.1 弹性模型	25
2.2.2 塑性模型	28
2.3 膨胀土本构模型	36
2.3.1 膨胀土强度理论	37
2.3.2 膨胀土变形理论	38
2.4 应力路径对岩土本构关系的影响	40
第 3 章 数值建模方法	44
3.1 岩土本构关系的反问题理论及应用	44
3.1.1 反问题的一般描述	44
3.1.2 本构关系的反问题	44
3.2 塑性体应变与塑性剪应变之间的相互作用原理	45
3.3 建模基本理论	47
3.3.1 数值建模方法的基本框架	47
3.3.2 数值建模方法的优越性	48

3.4	神经网络理论及原理	49
3.4.1	神经网络结构	49
3.4.2	神经网络的特点	49
3.4.3	神经网络的学习算法	50
3.5	BP 与 RBF 神经网络的比较	51
3.5.1	BP 神经网络	51
3.5.2	RBF 神经网络	52
3.5.3	RBF 学习算法	53
3.5.4	RBF 神经网络与 BP 神经网络的比较	54
3.6	神经网络在岩土工程中的应用	54
第 4 章	膨胀土三轴试验和数值建模	57
4.1	工程背景与物性试验	57
4.2	膨胀土基本物性试验	61
4.3	膨胀土三轴压缩试验	63
4.4	膨胀土三轴试验曲线	69
4.5	神经网络学习及预测	73
4.5.1	输入层和输出层设计	73
4.5.2	隐含层神经元选择	74
4.5.3	RBF 算法	74
4.5.4	RBF 神经网络与 BP 神经网络预测对比	75
4.5.5	RBF 神经网络预测效果	76
4.6	应力-应变三维曲面	78
4.7	数值模型的建立	80
4.8	数值模型的验证	83
4.8.1	计算模型	84
4.8.2	计算结果	84
4.8.3	结论	85
第 5 章	砂土三轴试验和数值建模	87
5.1	砂土物理指标测定试验	87
5.1.1	砂土颗粒分析试验	87
5.1.2	砂土表观密度测定	88
5.1.3	砂土堆积密度	88
5.2	砂土三轴试验	89
5.2.1	试验方案	89

5.2.2 砂样配制	90
5.3 试验数据整理和分析	91
5.3.1 三轴试验数据	91
5.3.2 静水压力试验数据和 K 值的测定	95
5.4 等主应力比三轴试验应力-应变曲线	101
5.5 应力-应变三维曲面	103
5.6 屈服轨迹	104
5.7 数值模型的建立	106
5.7.1 本构模型	106
5.7.2 神经网络学习及预测	107
5.8 数值模型的验证	108
第 6 章 黏土三轴试验和数值建模	109
6.1 试样制备	109
6.2 试样饱和	109
6.2.1 抽气饱和	109
6.2.2 反压力饱和	110
6.3 试样安装和固结	110
6.4 试验方案	111
6.4.1 正常固结土三轴压缩试验方案	111
6.4.2 超固结土排水剪切常规三轴压缩试验方案	113
6.4.3 弹性变形参数试验方案	113
6.5 试验结果及分析	115
6.5.1 正常固结土三轴压缩试验结果及分析	115
6.5.2 超固结土三轴压缩试验结果及分析	116
6.5.3 弹性变形参数试验结果	119
6.5.4 试验结果分析	121
6.6 黏土本构关系的数值建模	122
第 7 章 应力路径和应力历史对本构关系的影响	128
7.1 应力路径对土的本构关系影响机理研究	128
7.1.1 试验工作	128
7.1.2 应力路径相关性是塑性体应变与剪应变相互作用的综合表现形式	129
7.1.3 旋转硬化的机理	130
7.2 应力历史对黏土本构关系影响机理研究	131
7.2.1 塑性体应变对应力-应变关系曲线的控制作用	132

7.2.2	剪胀与剪缩发生的条件	132
7.2.3	临界状态	133
7.2.4	试验工作	134
7.3	应力路径对重塑黏土有效抗剪强度参数影响研究	135
7.3.1	试验工作	136
7.3.2	试验结果处理与分析	137
第 8 章	内容归纳与研究展望	139
8.1	内容归纳	139
8.2	研究展望	141
参考文献		143

第1章 绪 论

本构关系是反映物质宏观性质的数学模型。最熟知的反映纯力学性质的本构关系有胡克定律、牛顿内摩擦定律、圣维南理想塑性定律等；反映热力学性质的有克拉珀龙理想气体状态方程、傅里叶热传导方程等。把本构关系写成具体的数学表达形式就是本构方程。在许多文献中，往往都不把本构关系和本构方程区别开来。建立本构方程是理性力学研究的重要内容之一。

1.1 土的本构关系

土的本构关系，即土的应力张量与应变张量的关系，一般情况下是指将描述土的变形参量与描述内力的参量联系起来的一组关系式。具体地讲，它是指将变形的应变张量与应力张量联系起来的一组关系式，又称本构方程。对于不同的土，在不同的变形条件下有不同的本构关系，也称为不同的本构模型，它是土的宏观力学性能的综合反映。

在土力学和岩土工程计算问题方面，不同类型的实际工程往往采用不同土的强度指标，例如，在地基沉降计算方面多采用单向固结条件下土的变形模量，而在边坡稳定性分析、地基承载力和挡土墙土压力计算等方面多采用土的抗剪强度；在沉降计算时将土视为弹性体，在稳定性分析和土压力计算时又将土视为塑形体。造成这种情况的原因是土这种天然地质材料本身具有的复杂性，包括非线性、不均匀性等，所以，要想合理、切实地解决土力学和岩土工程中的计算问题，就应将土作为土体，也就是说离不开土的应力-应变和时间的本构关系。因此，对土的本构关系有必要进行深入的研究。

自1963年英国剑桥大学 Roscoe 等提出剑桥 (Cam-clay) 模型以来，土的本构关系研究发展极快，特别是近二十年来，解决工程问题的数值方法已基本趋于成熟并得到广泛应用，使得复杂的工程问题可以得出切实的解答。然而，在这些工程问题中，关键的问题仍是土的工程特性，即土的应力-应变和时间的本构关系，也就是说，土的本构关系还是土力学和岩土工程数值分析中的首要问题。本书的目的就是在土的应力-应变和时间的本构关系论述的基础上，提出土的本构关系数值建模方法。

1.2 土的力学特性

土是连续、坚固的岩石在风化作用下形成的大小悬殊的颗粒，经过不同的搬运方式，在各种自然环境中生成的沉积物。在漫长的地质年代中，由于各种内力和外力地质作用形成了许多类型的岩石和土。岩石经历风化、剥蚀、搬运、沉积生成土，而土历经压密固结，胶结硬化也可再生成岩石。

土的物质成分包括作为土骨架的固态矿物颗粒、孔隙中的水及其溶解物质以及气体。因此，土是由颗粒（固相）、水（液相）和气（气相）所组成的三相体系（图 1.1）。各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大，土的三相间的数量比例也不尽相同，而且土粒与其周围的水又发生了复杂的物理、化学作用。所以，要研究土的性质就必须了解土的三相组成以及在天然状态下土的结构和构造等特征。

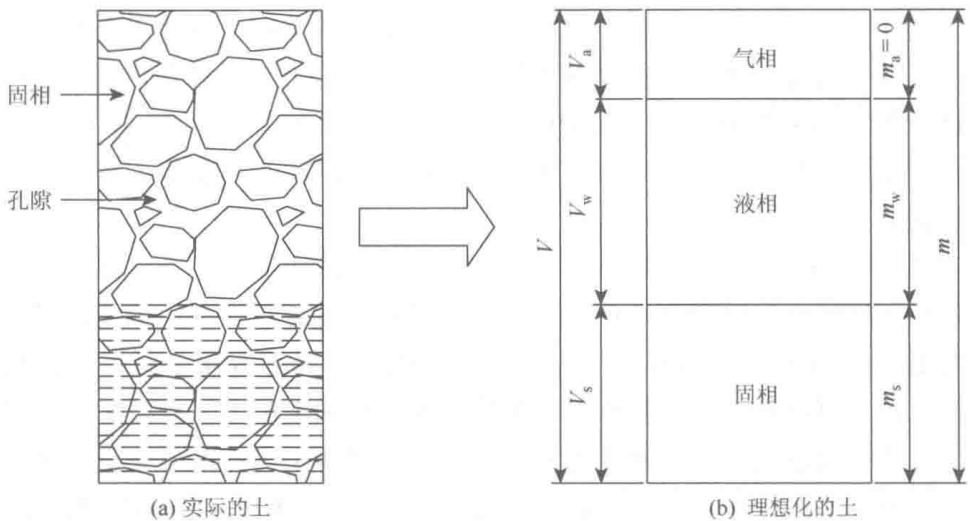


图 1.1 土的三相简图

按土颗粒之间有无黏聚力把土分为黏性土和无黏性土。黏性土按照应力历史可分为正常固结黏土和超固结黏土，正常固结黏土超固结比 $OCR = 1$ ，超固结黏土 $OCR > 1$ 。无黏性土主要包括碎石土、砂土、粉土等。

土体在荷载作用过程中应力状态变化的轨迹称为应力路径，应变状态变化的轨迹称为应变轨迹，土体中从开始形成到研究它时某一点的应力变化的全部历史过程称为应力历史。土的孔隙比、含水率、结构及物质组成、应力历史和应力路径都会影响土的力学性质。主要包含以下特性。

1. 应力-应变关系的非线性

土宏观的变形主要不是由于颗粒本身变形，而是由于颗粒间位置的变化。这样在不同应力水平下由相同应力增量引起的应变增量就不会相同，即表现出较强的非线性。

图 1.2 所示为土的常规三轴压缩试验的一般结果。其中，实线表示密砂或超固结黏土，虚线表示松砂或正常固结黏土。从图中可以看到，正常固结黏土和松砂的应力随应变增加而增加，但增加速率越来越慢，最后逼近一渐近线；而在密砂和超固结土的试验曲线中，应力开始随应变增加而增加，达到一个峰值之后，应力随应变增加而下降，最后也趋于稳定。在塑性理论中，前者称为应变硬化（或加工硬化），后者称为应变软化（或加工软化）。应变软化过程实际上是一种不稳定过程，有时伴随着应力的局部化剪切带的出现，其应力-应变曲线对一些影响因素比较敏感。由于其应力-应变不呈单值函数关系，所以反映土的应变软化的数学模型一般形式较复杂，难以准确描述；反映应变软化的数值计算方法也有较大难度。

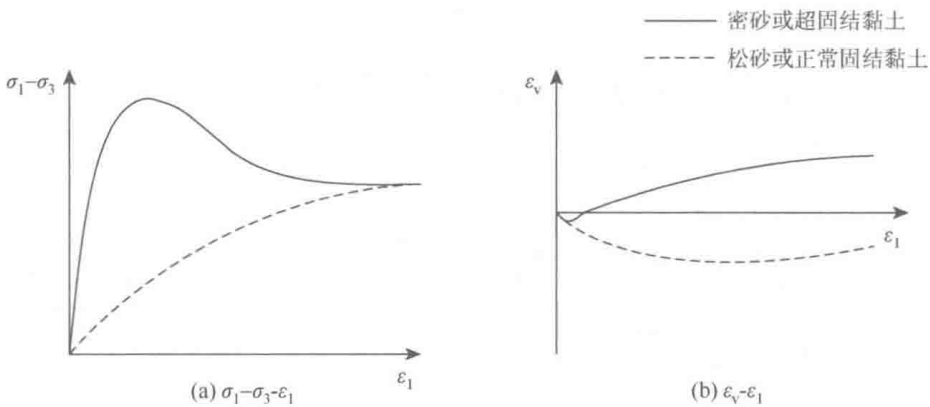


图 1.2 不同密实度土的典型常规三轴压缩试验曲线

2. 土的剪胀性

土在各向等压或等比压缩时，孔隙减少，从而发生较大的体积压缩。这种体积压缩大部分是不可恢复的。从图 1.2 (b) 中可以发现，在三轴试验中，密砂或超固结黏土偏差应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 增加引起了轴应变 ϵ_1 的增加，但除开始时少量体积压缩（正体应变）外，发生明显的体胀（负体应变）。由于在常规三轴压缩试验中，平均主应力增量 $\Delta p = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3$ 在加载过程中总是正的，不可能是体积的弹性回弹，因此这种体应变只能是由剪应力引起的，称为剪胀性。广义的剪胀性指剪切

引起的体积变化，包括体胀，也包括体缩。后者也常被称为剪缩。土的剪胀性实质上是由于剪应力引起土颗粒间相互位置的变化，使排列变化而使颗粒间的孔隙加大（或减小），从而发生了体积变化。

3. 弹塑性

在加载后再卸载到原应力状态时，土一般不会恢复到原来的应变状态。其中部分应变是可恢复的，部分应变是不可恢复的塑性应变，并且后者往往占很大比例，可以表示为 $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ 。其中， ε_e 表示弹性应变， ε_p 表示塑性应变。如图 1.3 所示，其中单调加载试验曲线用虚线表示；循环加载试验曲线用实线表示。可见每一次应力循环都有可恢复的弹性应变及不可恢复的塑性应变，即永久变形。

对于结构性很强的原状土，如很硬的黏土，可能在一定的应力范围内，它的变形几乎是“弹性”的，只有到一定的应力水平，即达到屈服条件时，才会产生塑性变形。一般土在加载过程中弹性和塑性变形几乎是同时发生的，没有明显的屈服点，所以亦称为弹塑性材料。

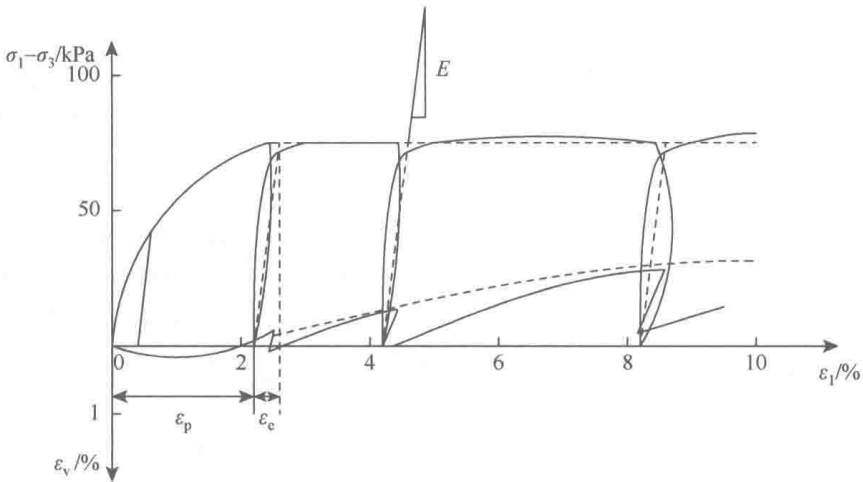


图 1.3 单调、循环加载三轴压缩试验曲线

土在应力循环过程中的另一个特性是存在滞回圈，在图 1.3 中卸载初期应力-应变曲线陡降，减少到一定偏差应力时，卸载曲线变缓，再加载曲线开始陡而随后变缓。这就形成一滞回圈，越接近破坏应力，这一现象就越明显。在图 1.3 中另一个值得注意的现象是卸载时试样发生体缩。由于卸载时土平均主应力 p 是减少的，这种卸载体缩显然无法用弹性理论解释。人们认为这主要源于土的剪胀变形的可恢复性和加载引起土结构的变化。总之，即使是在同一应力路径上的卸载-再加载过程，土的变形也并非是完全弹性的。

4. 各向异性和土的结构性

所谓各向异性是指在不同方向上材料的物理力学性质不同。由于土在沉积过程中，长宽比大于1的针、片、棒状颗粒在重力作用下倾向于水平方向排列而处于稳定的状态；另外，在随后的固结过程中，竖向的上覆土体重力产生的竖向应力与水平土压力产生的水平应力大小是不等的，这种不等向固结也会产生土的各向异性。土的各向异性主要表现为横向各向同性，即在水平面各个方向的性质大体上是相同的，而竖向与横向性质不同。土的各向异性可分为初始各向异性和诱发各向异性。天然沉积和固结造成的各向异性可归入初始各向异性之列。在室内重力场中各种制样过程也会使土试样具有不同程度的初始各向异性，如图1.4所示。

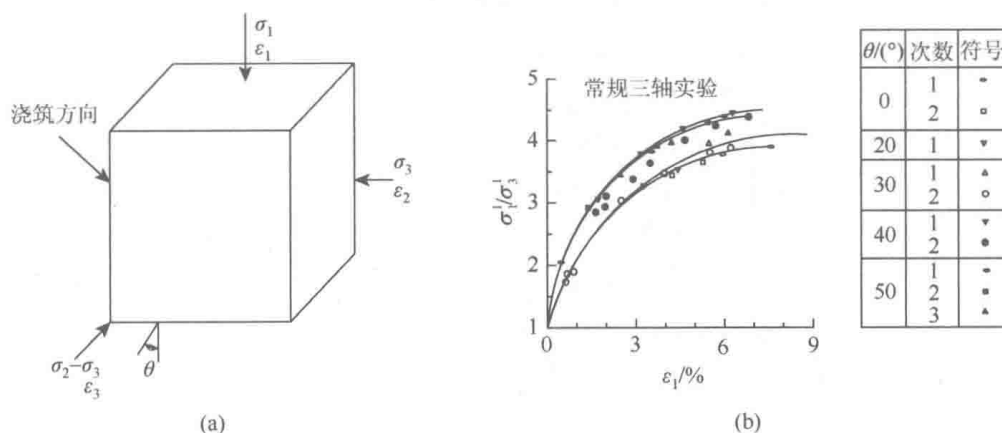


图 1.4 砂土的各向异性

5. 流变性

黏性土的应力-应变强度关系受时间的影响除了基于有效应力原理的孔压消散和土体固结问题之外，还有土的流变性的影响。与土的流变性有关的现象是土的蠕变与应力松弛（图1.5）。所谓蠕变是指在应力状态不变的条件下，应变随时间逐渐增长的现象；应力松弛是指维持应变不变，材料内的应力随时间逐渐减小的现象。在某一常应力作用下，土的应变不断增加，但当这个应力值较小时，试样变形逐渐趋于稳定；当这个常应力较大时，应变量会在相对稳定之后又突然加快，最后达到蠕变破坏。这种蠕变强度低于常规试验的强度，有时只有后者的50%左右。黏性土的蠕变性随着其塑性、活动性和含水量的增加而加剧。

在侧限压缩条件下，由于土的流变性而发生的压缩称为次固结，长期的次固

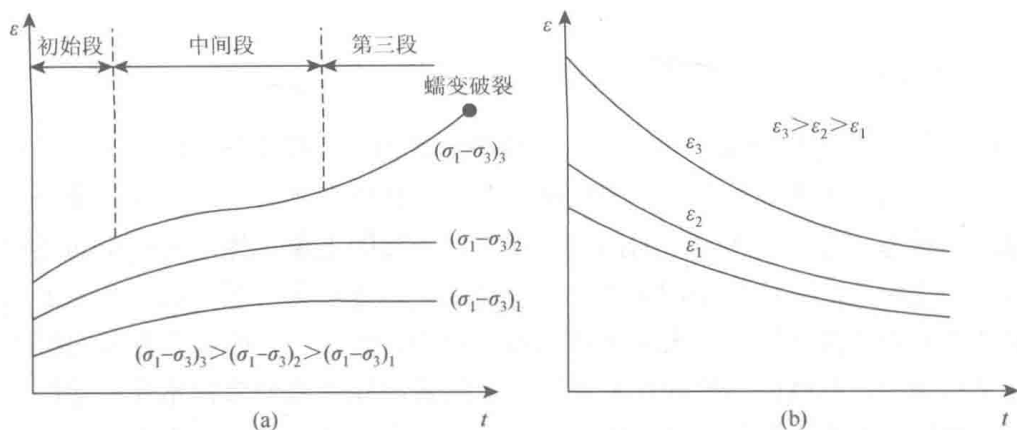


图 1.5 土的蠕变和应力松弛

结可以使土体不断加密而使正常固结土呈现出超固结土的特性，被称为似超固结土或“老黏土”。结构性土的压缩曲线如图 1.6 所示。

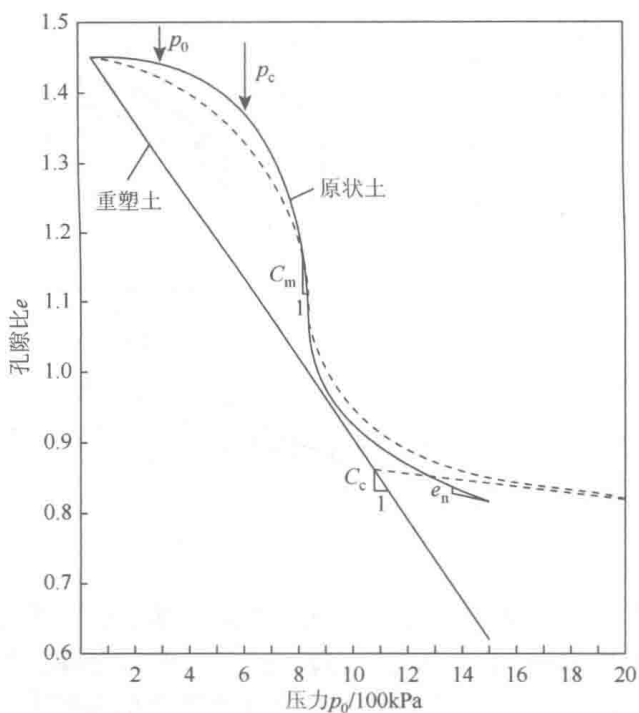


图 1.6 结构性土的压缩曲线

6. 应力水平、应力历史和应力路径的影响

1) 应力水平的影响

所谓应力水平一般有两层含义：一是指围压的绝对值的大小；二是指应力（常为剪应力）与破坏值之比，即 $S = q/q_r$ 。这里应力水平是指围压。