

土木工程数值分析与工程软件应用系列教程

PLAXIS

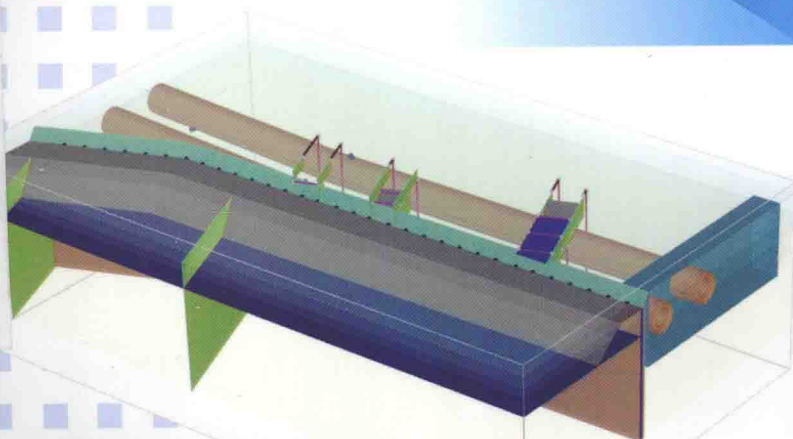
高级应用教程

PLAXIS GAOJI YINGYONG JIAOCHENG

刘志祥 张海清 编著



附赠超值光盘



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



土木工程数值分析与工程软件应用系列教程

PLAXIS

高级应用教程

刘志祥 张海清 编著

机械工业出版社

近十年来,随着我国岩土工程行业的发展,越来越多的岩土工程师和结构工程师开始使用 PLAXIS 软件进行数值分析。然而,实际岩土工程问题千变万化,通过 PLAXIS 解决各种工程难题时,软件自带的用户手册常常难以满足用户寻求更契合国内实际的工况、更深入指导工程应用的需求,急需一本能够帮助用户理解和攻克实战问题的参考书。因此,作者将多年实战中积累的 PLAXIS 应用技术经验和典型成功案例悉心整理总结,形成此书,望能帮助广大具有 PLAXIS 初级水平的读者更快地提升到中高级水平。

本书共 13 章。第 1、2 章讲解高级土体本构 HS & HSS 模型,并结合“土工试验室”工具全面释义相关参数;第 3 章讲解排水方法和若干不排水方法的理论知识,并结合实例讲解释疑;第 4~7 章给出四个基坑工程分析实例,包含软土地区、砂土地区、建筑基坑和地铁基坑;第 8、9 章给出深基础工程分析实例,包含工业建筑桩基础和桥梁桩基础;第 10 章给出盾构隧道工程分析案例;第 11、12 章给出边坡工程分析案例,讲解人工边坡的挖填、加固及安全性数值分析;第 13 章给出港口工程分析案例,讲解驳岸码头的支护与开挖建造分析过程。

本书作为土木工程数值分析与工程软件应用系列教程之一,适合岩土工程、结构工程等领域已经具有一定的 PLAXIS 使用经验的工程技术人员和科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

PLAXIS 高级应用教程/刘志祥,张海清编著. —北京:机械工业出版社, 2015. 8

土木工程数值分析与工程软件应用系列教程

ISBN 978-7-111-51119-9

I. ①P… II. ①刘… ②张… III. ①土木工程—应用软件—教材
IV. ①TU—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 187894 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李 帅 责任编辑:李 帅 臧程程

版式设计:霍永明 责任校对:黄兴伟

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

北京玥实印刷有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·12.75 印张·10 插页·343 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51119-9

ISBN 978-7-89405-827-0 (光盘)

定价:45.00 元(含 1DVD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

策划编辑:010-88379733

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com



前言

PLAXIS 作为一款优秀的岩土工程有限元软件,在国际岩土工程界享有盛誉,尤以其土体硬化模型(HS)和小应变土体硬化模型(HSS)高级本构、完全流固耦合、土工试验模拟程序、Embedded 桩单元、Interface 单元、网格全自动划分自动耦合、简捷明了的操作流程、稳定高效的计算内核和极其优秀的收敛性最为人称道。

自2008年2月至今,本人一直致力于 PLAXIS 中国区应用技术研发和技术支持工作。一方面,曾两次前往 PLAXIS 荷兰总部,学习软件功能、技术研发、国外应用、高阶培训等相关内容;另一方面,在国内与各大设计院及高校相关专业的技术(科研)人员合作,参与多个大型项目的数值分析工作,研发 PLAXIS 应用技术,积累了丰富的软件应用技术经验。

2010年8月,本人带领团队出版了国内第一本 PLAXIS 应用参考书《PLAXIS 岩土工程软件使用指南》,深受广大读者喜爱。时隔三年,鉴于软件更新之快和国内用户对中高级教程的需求,决定撰写本书。2014年伊始,本人着手整理多年学习和研究的成果,历时半年形成初稿,并且在全国多个 PLAXIS 高级培训班中对此书案例进行讲解交流,进而吸收用户反馈,不断修正与完善,最终于2015年1月完稿。此前,由刘志祥与张海清编写的入门教程《PLAXIS 3D 基础教程》已经于2015年2月由机械工业出版社出版发行,供初学者使用。

本书通过讲解 PLAXIS 工程实战中最常用的重点理论和典型工程应用实例,希望全面提升读者的数值模拟实战技能。本书第1~3章侧重理论知识的讲解,主要帮助读者提升对土体硬化本构模型、小应变刚度、土工试验室、排水和不排水分析等重要理论的理解。模拟土体(包含孔隙水)关键在于土体的本构模型,小应变土体硬化本构是 PLAXIS 中重要的、常用的本构。它与土工试验室功能联合应用,能够较好地模拟土体的真实属性。第4~13章通过一系列基坑工程、深基础工程、隧道工程、边坡工程和港口工程等实际工程案例,全面讲解 PLAXIS 用于岩土工程数值分析的方法和技巧,包括建模前的工程分析、岩土分层和参数、结构建模和参数、网格划分、计算结果查看与解析等内容,将软件使用与工程问题分析相结合,力求对用户工程应用中最常遇到的实际问题给出参考解答。

本书的编写由本人与张海清完成,绝大部分内容源自编者多年积累的使用经验和参与的工程案例,少部分内容(第3、10、11章)参考了 PLAXIS 官方高阶培训教程的内容。感谢中国建筑标准设计研究院北京金土木信息技术有限公司各位领导对本书的重视与大力支持;

感谢前同事卢萍珍早年所做的编译工作；最后要感谢广大 PLAXIS 用户，他们对 PLAXIS 高阶应用技术的需求正是我们编写本书的动力源泉。

本书所有实例的模型文件附于随书光盘中，供读者参考。由于水平和时间所限，书中难免存在错漏之处，敬请广大读者批评指正。也请您在发现错误后反馈给我们（我的 E-mail: 75718651@qq.com），以便再版时进行更新与修正！再次感谢广大读者。

刘志祥

目 录

前言

第 1 章	小应变土体硬化高级本构模型	1
1.1	双曲线	1
1.2	剪切硬化和体积硬化	3
1.2.1	剪切硬化	3
1.2.2	体积硬化	5
1.2.3	双硬化	7
1.3	小应变刚度	7
1.3.1	小应变刚度的发现	7
1.3.2	小应变刚度的重要性	8
1.3.3	小应变刚度的表述公式	10
1.4	参数经验	12
1.4.1	工程应用的经验参数	12
1.4.2	土工试验的经验参数	13
1.4.3	小应变刚度计算经验公式	15
1.5	小结	16
第 2 章	土工试验与 HS 参数	17
2.1	根据试验结果确定砂土参数	17
2.2	根据试验结果确定黏土参数	22
2.3	小结	26
第 3 章	基坑开挖不排水分析——不排水 A 和 B	27
3.1	材料参数	27
3.1.1	MC 模型的有效强度参数 (不排水 A)	28

3.1.2 MC 模型的不排水强度参数 (不排水 B)	29
3.1.3 HSS 模型的有效强度参数 (不排水 A)	30
3.1.4 结构单元的参数	32
3.2 模型构建	32
3.2.1 土层/结构	32
3.2.2 网格	33
3.3 施工阶段定义及计算	33
3.4 计算结果分析	37
3.4.1 围护结构变形	37
3.4.2 安全系数	39
3.4.3 莫尔-库仑模型与不排水行为	39
3.5 小结	41

第4章 拉锚板桩墙基坑开挖变形及周边环境影响分析 42

4.1 工程概况	42
4.2 模型构建	43
4.2.1 土层	43
4.2.2 结构	45
4.2.3 网格	49
4.3 施工阶段定义及计算	49
4.4 计算结果分析	52
4.4.1 模型整体变形	52
4.4.2 拉锚板桩的变形与受力	53
4.4.3 坑外地表和桩基的变形	53
4.4.4 锚杆与斜撑的轴力	54
4.5 小结	54

第5章 软土地区水泥土挡墙支护基坑开挖数值模拟 55

5.1 工程概况	55
5.2 模型构建	56
5.2.1 土层	56
5.2.2 结构	57
5.2.3 网格	60
5.3 施工阶段定义及计算	61
5.4 计算结果分析	63
5.5 小结	64

第 6 章 明挖地铁车站对临近桩基的影响分析 66

6.1 工程概况	66
6.2 模型构建	67
6.2.1 土层	67
6.2.2 结构	68
6.2.3 网格	71
6.3 施工阶段定义及计算	72
6.4 计算结果分析	75
6.4.1 桩基变形	75
6.4.2 基坑变形	76
6.4.3 结构内力	77
6.5 小结	80

第 7 章 地铁基坑开挖对相邻桥桩基础的变形影响 81

7.1 工程概况	81
7.2 模型构建	83
7.2.1 土层	83
7.2.2 结构	85
7.2.3 网格	87
7.3 施工阶段定义及计算	88
7.4 计算结果分析	91
7.5 小结	94

第 8 章 筒仓桩筏基础与临近边坡的相互影响 95

8.1 工程概况	95
8.1.1 工程背景	95
8.1.2 分析方案	96
8.2 模型构建	97
8.2.1 土层	97
8.2.2 结构	99
8.2.3 网格	105
8.3 施工阶段定义及计算	105
8.4 计算结果分析	107
8.5 小结	111

第9章	某桥梁桩基施工数值模拟	112
9.1	Embedded 桩概述	112
9.1.1	2D 中的模拟方法	112
9.1.2	2D 中的 Embedded 桩模拟原理	112
9.1.3	2D 与 3D 中 Embedded 桩	113
9.2	2D 建模及计算	114
9.2.1	工程概况	114
9.2.2	建立地层模型	114
9.2.3	建立桥台及桩基	117
9.2.4	网格划分与计算阶段设置	118
9.3	3D 模型	120
9.4	计算结果对比分析	121
9.5	小结	122
第10章	地铁盾构隧道施工二维有限元分析	123
10.1	工程概况	123
10.2	模型构建	125
10.2.1	土层/结构	125
10.2.2	网格	130
10.3	施工阶段定义及计算	131
10.4	计算结果分析	135
10.5	小结	137
第11章	半填半挖公路边坡稳定性分析	138
11.1	工程概况	138
11.2	模型构建	139
11.2.1	土层/结构	139
11.2.2	网格	143
11.3	施工阶段定义及计算	144
11.4	计算结果分析	155
11.4.1	关键破坏机制 (潜在滑动面)	155
11.4.2	安全系数	157
11.5	小结	159
第12章	某高速公路路堑边坡开挖及加固稳定性分析	160
12.1	工程概况	161

12.2 模型构建	162
12.2.1 土层/结构	162
12.2.2 网格	174
12.3 施工阶段定义及计算	175
12.4 计算结果分析	180
12.5 小结	182
第 13 章 锚拉式驳岸码头施工数值分析	184
13.1 工程概况	184
13.2 模型构建	184
13.2.1 土层	184
13.2.2 结构	186
13.2.3 网格	188
13.3 施工阶段定义及计算	189
13.4 计算结果分析	191
13.5 小结	193
参考文献	194

小应变土体硬化高级本构模型

土体硬化模型 (Hardening Soil, 简称 HS 模型) 是 PLAXIS 中使用率最高的一个高级土体本构模型。它是根据三轴试验和固结试验提出的弹塑性本构, 能够描述三轴试验和固结仪试验揭示的绝大部分土体行为, 比如: 三轴双曲线、固结压缩曲线、应力水平相关、卸载/再加载、应力历史、剪胀性等。

小应变土体硬化模型 (Hardening Soil with small-strain stiffness, 简称 HSS 模型) 是在土体硬化模型的基础上引入了小应变属性, 可以考虑动力作用下的滞回圈行为。小应变属性是动三轴试验中发现的土体特性。

在常规岩土工程数值分析中, 使用小应变土体硬化模型获得的土体变形结果与工程实际是最相符的, 显著优于其他土体本构模型, 如常用的莫尔-库仑 (PLAXIS 软件中为“摩尔-库伦”) 模型、修正剑桥模型、邓肯-张模型等。此外, 对于一些特殊的土体属性, PLAXIS 提供了具有针对性的本构模型, 如: 考虑各向异性、蠕变、流变等属性, 选择相应的本构可能更适合。

本章对小应变土体硬化模型的讲述, 更侧重于帮助读者从概念上理解小应变土体硬化模型, 可视之为对 PLAXIS 程序的材料本构模型手册 (Material Models Manual) 中相关内容的补充和延伸。建议读者在学习本章之前, 先学习土力学、高等土力学和 PLAXIS 材料本构模型的相关内容。

1.1 双曲线

一般土的标准三轴排水试验应力-应变曲线 (见图 1-1), 可通过双曲线拟合获得 (Kondner, 1963), 邓肯等人据此提出了后来被广泛应用的邓肯-张 (Duncan-Chang) 模型。土体硬化模型也是采用双曲线公式去拟合三轴试验的应力-应变曲线 (见图 1-2)。

实际工程中, 总是会有偏应力和总应力的改变, 双曲线关系用于计算随偏应力 q 的增长而产生的主方向的压缩 (主应力的压缩不由它计算, 等向压缩是根据固结仪模量计算变形, 卸载则是基于胡克定律计算)。土体硬化模型中的双曲线不考虑残余强度, 只考虑峰值强度。

双曲线公式中偏应力 q 是自变量, 轴应变 ε_1 是因变量, 具体表达式为

$$-\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{q_a - q} \quad (1-1)$$

从式 (1-1) 不难看出, E_{50} 和 q_a 是影响双曲线的主要因素。图 1-2 中 q_a 是双曲线的渐进

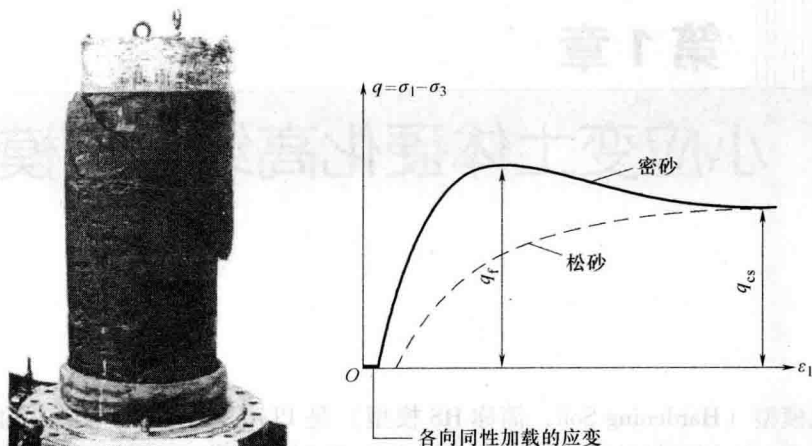


图 1-1 三轴试验及典型试验成果曲线

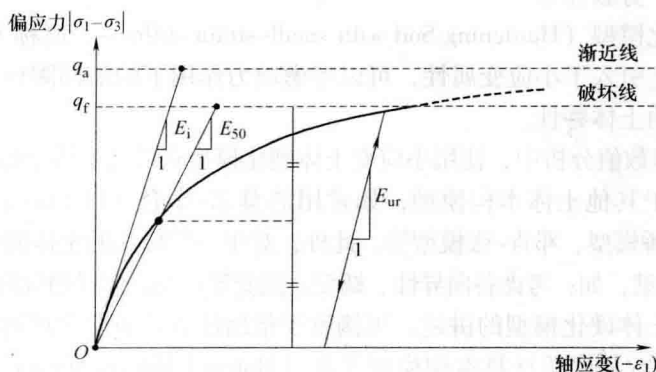


图 1-2 土体硬化本构模型的双曲线近似

线，它大于莫尔-库仑剪切强度 q_f ，它们之间的比例关系称为破坏比，即 $R_f = q_f/q_a$ （见图 1-3）。PLAXIS 默认设置 R_f 为 0.9，一般情况下采用默认值即可。如果用户手动修改 R_f 值，将引起双曲线的曲率发生变化，一般不建议修改。

土体硬化模型的输入参数中对双曲线起到控制作用的参数有四个： E_{50}^{ref} 、 m 、 c' 和 φ' 。

- 1) E_{50}^{ref} 是参考模量，它是 100kPa 围压下 $q_f/2$ 偏应力的割线斜率。
- 2) m 是应力相关系数，决定不同围压下曲线的 E_{50} 等刚度模量，详见式 (1-2)。

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{\text{ref}} \sin \varphi} \right)^m \quad (1-2)$$

对于系数 m 的经验取值，砂土可取 0.5，黏（PLAXIS 软件中为“粘”）土取 1，中间可插值选取。

- 3) c' 和 φ' 共同决定曲线的破坏线， q_f 。

以上四个输入参数将共同决定土体双曲线的形状，每一个参数的变化都会引起双曲线的变化，如偏应力加载条件下，主应变 ε_1 的计算值会受到影响。

【实例 1】某超固结黏土标准三轴实验。当采用土体硬化模型时，控制参数选取 “ $c' =$

20kPa、 $\varphi' = 20^\circ$ 、 $E_{50}^{\text{ref}} = 15\text{MPa}$ 、 $m = 0.7$ ”。实测应力-应变曲线与双曲线拟合结果，如图 1-4 所示，可见不同的围压下，双曲线都能够较好地与试验曲线拟合，即土体硬化模型能够同时反映应力相关性与双曲线属性。

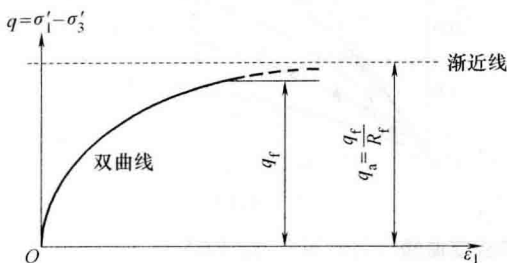


图 1-3 双曲线的破坏比

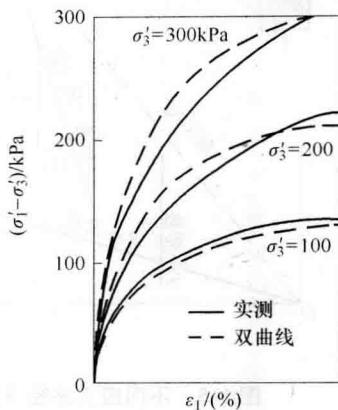


图 1-4 土体硬化本构双曲线对比三轴实测应力-应变曲线 (Amann 等, 1975)

1.2 剪切硬化和体积硬化

土体硬化模型是一个弹塑性本构模型，在加载过程中要产生塑性变形，变形中的塑性部分在卸载过程中是不可恢复的。土体硬化模型将这一过程称为“硬化”，也可称为“屈服”，室内试验表明，可以将“硬化”分为剪切硬化和体积硬化。

1.2.1 剪切硬化

三轴试验中，通过双曲线可获得 ε_1 ， $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \approx 1.5\varepsilon_1$ ，结合式 (1-1)，即有

$$\gamma = \frac{3q_a}{4E_{50}} \cdot \frac{q}{q - q_a} \quad (1-3)$$

根据上式可计算出总剪应变，通过回弹模量可计算弹性剪切应变，进而可以计算出塑性剪切应变，具体过程参见 PLAXIS 程序的材料本构模型手册相关内容。

在标准三轴试验中可发现，不同的加载路径下，相同的剪切应变对应的若干应力状态点总是分布在一条曲线上，可称为等剪应变线，如图 1-5 所示。

这些等剪应变线与双曲线形态近似，使用双曲线方程可以拟合剪切硬化曲线，因此，在 p - q 平面中，借助双曲线表达式，可以形象地表现出等剪应变曲线和硬化过程（见图 1-6）。等剪应变的双曲线被看作剪切屈服的曲线。屈服方程可定义如下：

$$f^s = \frac{q_a}{E_{50}} \cdot \frac{q}{q_a - q} - \frac{2q}{E_{ur}} - \gamma^{\text{ps}} \quad (1-4)$$

式中 γ^{ps} ——状态参数，它记录屈服面的扩展，即硬化曲线的扩展。

能够通过屈服方程 [式 (1-4)] 描述屈服曲线后，实际计算中，就可以根据加载、卸载和应力历史情况分为以下三种计算方案（见图 1-7）：

1) 剪切硬化曲线上加载。应力点在硬化曲线上，应力历史范围内被视为弹性区，应力

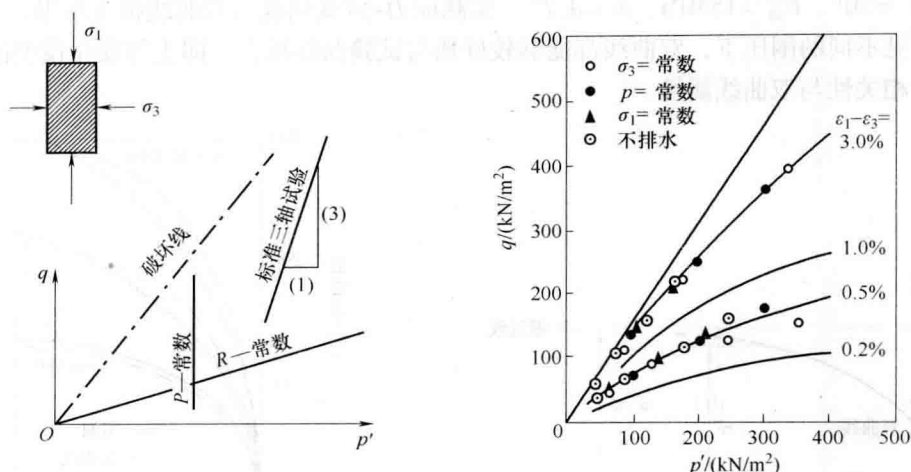


图 1-5 不同应力路径下三轴试验等剪应变曲线 (石原研而等, 1975)

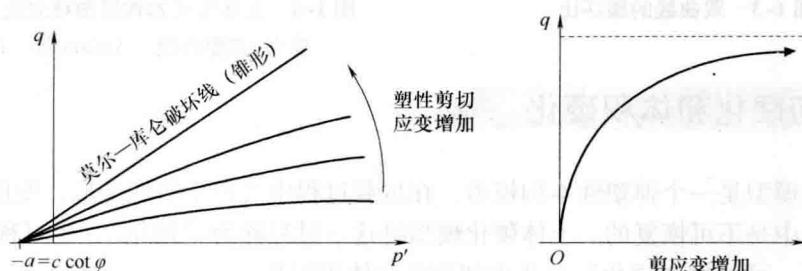


图 1-6 剪切硬化屈服面扩展

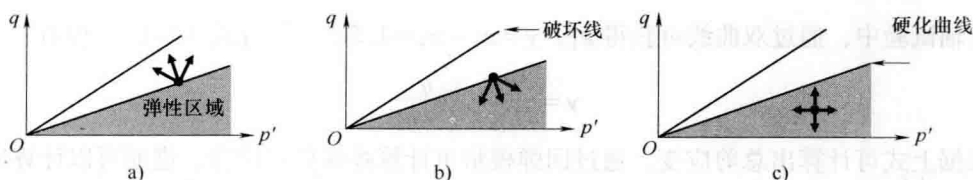


图 1-7 不同应力路径的剪切硬化示意图

a) 加载 b) 卸载 c) 应力历史范围内

增量指向弹性区外。这将导致塑性屈服, 产生塑性应变, 即为材料硬化, 硬化曲线将随之扩展。

2) 剪切硬化曲线上卸载。应力点在硬化曲线上, 应力增量指向弹性区内, 这将导致弹性应变恢复, 应变增量与应力增量按照胡克定律计算, 计算使用回弹模量 E_w 。

3) 应力历史范围内。应力点位于弹性区域内, 所有可能的应力路径都将产生弹性应变, 都遵循胡克定律进行计算。

屈服曲线之内的应力状态的改变, 视为弹性计算, 遵循胡克定律, 但使用回弹模量计算, 且回弹模量具有应力相关属性, 具体如下:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_1^e = \frac{1}{E_{ur}} (\Delta \sigma'_1 - \nu_{ur} \Delta \sigma'_2 - \nu_{ur} \Delta \sigma'_3) \\ \Delta \varepsilon_2^e = \frac{1}{E_{ur}} (-\nu_{ur} \Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2 - \nu_{ur} \Delta \sigma'_3), \text{ 其中 } \nu_{ur} \approx 0.2 \\ \Delta \varepsilon_3^e = \frac{1}{E_{ur}} (-\nu_{ur} \Delta \sigma'_1 - \nu_{ur} \Delta \sigma'_2 + \Delta \sigma'_3) \end{cases} \quad (1-5)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{\text{ref}} \left(\frac{\sigma'_3 + a}{p_{\text{ref}} + a} \right)^m, \text{ 其中 } a = c' \cot \varphi' \quad (1-6)$$

[实例2] 某河沙实测对比双曲线屈服方程。从图 1-8 可知, 硬化方程可以较好地拟合不同剪切应变对应的等剪应变曲线。其中试样参数: $a = 0$; $\varphi_a = 38^\circ$; $E_{50}^{\text{ref}} = 30\text{MPa}$; $m = 0.5$; 其中, φ_a 对应于渐近线 q_a 而来 (对应关系如同 φ' 与 q_f), 因为 q_a 大于 q_f , 所以, φ_a 略微大于 φ' 。

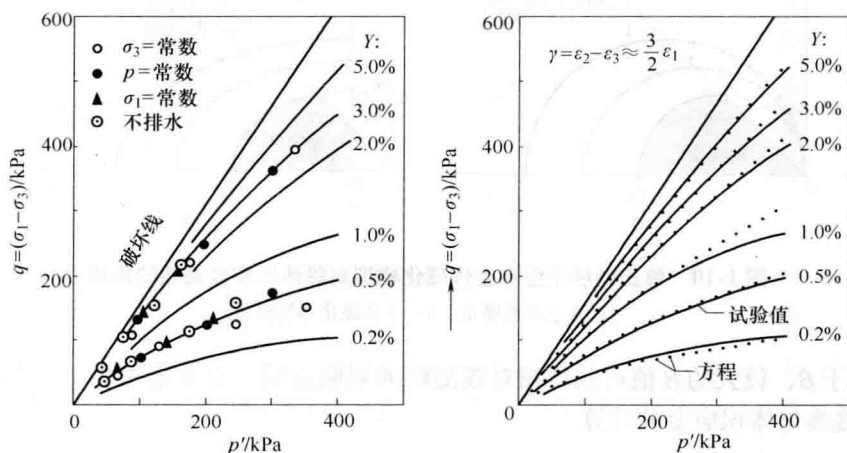


图 1-8 剪切硬化方程与三轴试验实测对比

1.2.2 体积硬化

剪切硬化用于描述剪切应变的屈服过程, 而体积硬化用于描述体积应变的屈服过程。通过正常固结黏土试验发现, 相同的体积应变对应的若干应力状态点总是分布在某一条曲线上 (见图 1-9)。该曲线就是等体积应变曲线, 同样可以视为体积应变屈服曲线, 体积硬化的屈服方程如下:

$$f^c = \frac{\tilde{q}^2}{\beta^2} + p'^2 - p_p^2 \quad (1-7)$$

式中 $\tilde{q}$ —— $\tilde{q} = \sigma'_1 + (\alpha - 1)\sigma'_2 - \alpha\sigma'_3$, $\alpha = \frac{3 + \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$;

p' —— $p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3}$;

p_p —— 前期固结压力, 作为状态参数, 记录帽盖的位移;

βp_p —— 椭圆的 y 轴截距 (见图 1-10b)。

土体硬化模型的体积应变曲线与修正剑桥模型不同。从图 1-10 可以看出, 土体硬化模

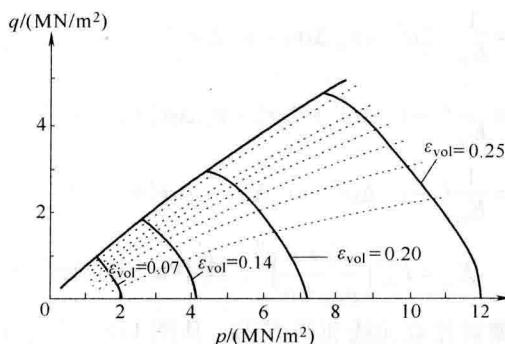


图 1-9 等体积应变的实测数据 (Biarez 和 Hicher, 1994)

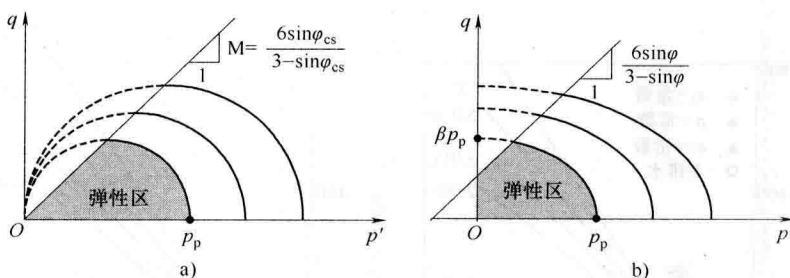


图 1-10 修正剑桥模型和土体硬化模型对等体积应变曲线的描述

a) 修正剑桥模型 b) 土体硬化本构模型

型曲线受控于 β , 较大的 β 值可获得相对较陡峭的屈服盖帽。而 β 值可由 E_{oed} 计算得来, 所以, E_{oed} 间接参与体积应变的计算。



提示: 仔细阅读“材料本构模型手册”不难发现, E_{oed} 与一般地勘报告中的 E_s 都是侧限压缩模量, 但大小不同。

与剪切硬化相同, 能够通过屈服方程 [见式 (1-7)] 描述屈服曲线后, 实际计算中, 就可以根据加载、卸载和应力历史情况分为以下三种计算方案 (见图 1-11):

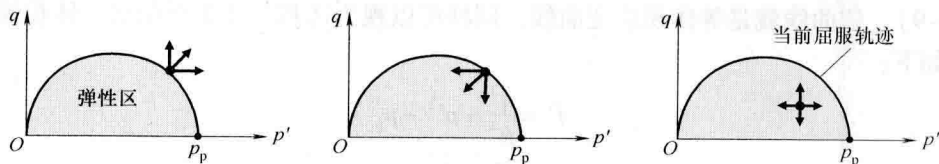


图 1-11 不同应力路径的体积硬化示意图

1) 体积硬化曲线上加载。应力点在硬化曲线上, 应力历史范围被视为弹性区, 应力增量指向弹性区外。这将导致塑性屈服, 产生塑性应变, 同时弹性区扩张, 即为材料硬化, 硬化曲线扩展。

2) 体积硬化曲线上卸载。应力点在硬化曲线上, 应力增量指向弹性区内, 这将导致弹

性应变恢复, 应变增量与应力增量按照胡克定律计算, 刚度采用回弹模量 E_{ur} 。

3) 应力历史范围内。应力点位于弹性区域内, 所有可能的应力路径都将产生弹性应变。按照胡克定律计算, 刚度采用回弹模量 E_{ur} 。

1.2.3 双硬化

土体硬化模型能同时考虑剪切硬化和体积硬化, 它们往往会同时发生, 哪一个占主导, 要根据应力路径和材料属性确定。对于一些典型工况已有如下认识:

- 1) 边坡或者基坑挡墙外的土体, 往往剪切硬化占主导。
- 2) 基础中部下方土体, 往往体积硬化占主导。
- 3) 正常固结黏土或者松砂, 往往体积硬化占主导。
- 4) 超固结黏土和密砂, 往往剪切硬化占主导。

土体硬化本构模型采用不同的模量和方程计算剪切硬化和体积硬化, 实现双硬化 (见图 1-12), 可以对复杂应力路径下 (包括卸载) 发生的剪应变和体积应变进行更准确的计算。

综合上述 1.1 和 1.2 节的内容可知, 本构模型的作用就是找到应力和应变的对应关系, 通过应力计算应变。主要计算内容: 双曲线用于计算偏应力下的主应变, 而剪应变也可以相应获得, 回弹模量 E_{ur} 可以计算弹性部分应变, 因而, 可计算任意偏应力作用下的弹性剪切应变和塑性剪切应变; 而体积应变等值线符合类椭圆曲线, 土体硬化模型利用体积屈服方程判定和计算弹性和塑性体积应变, 其中 E_{oed} 以辅助确定系数的方式起作用, 通过双曲线和双硬化, 土体硬化本构模型就实现了土体材料在不同应力路径下的各应变张量的弹性和塑性计算。

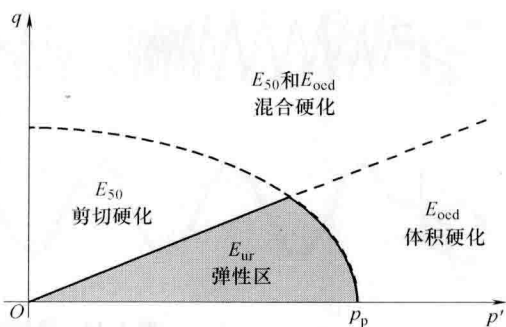


图 1-12 土体硬化本构模型的双硬化

然而, 普适的完美的土体本构模型是不存在的, 土体硬化本构模型也同样有其局限性, 它不能考虑土体的初始刚度, 动力分析中没有黏滞阻尼, 庆幸的是, 这些局限性恰恰是小应变刚度可以解决的。

1.3 小应变刚度

1.3.1 小应变刚度的发现

土体硬化本构模型假设土体在卸载和重加载时是弹性的, 定义屈服面内的刚度为卸载-再加载 E_{ur} , 是卸载再加载 (大的) 滞回环的割线模量, 小应变 (或小滞回) 下的模量也采用 E_{ur} , 然而, 实际上小应变情况下应该采用 E_0 才能够更加准确。

当卸载再加载的幅值减小, 滞回环近乎消失时, 才能获得近乎真实的弹性刚度, 即小应变刚度 E_0 , 如图 1-13 所示。