

地基沉降计算的新方法及其应用

杨光华 著



科学出版社

地基沉降计算的新方法 及其应用

杨光华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对地基沉降计算提出了一个非线性变形模量的新方法,其依据原位土的压板荷载试验曲线求取不同荷载水平下土体的非线性切线模量,将其应用于分层总和法进行地基沉降计算。新方法可以较好地反映土体的原状性和非线性变形特性,较准确地计算地基的非线性沉降。书中分别建立了双曲线切线模量法、双曲线割线模量法及任意曲线的切线模量法,并发展了依据旁压试验和静力触探试验确定土性参数的方法,使该方法更方便应用。同时,该方法用于桩基的非线性沉降计算,以及刚性桩复合地基的沉降计算和优化设计,建立了依据切线模量法的复合地基沉降计算方法及优化设计方法。书中还系统地总结了现有的各种地基沉降计算方法,并应用新的计算方法研究了地基承载力更科学、合理的确定方法。书中附有多个实际工程的原始资料,包括工程概况、工程地质资料、压板试验结果及沉降观测结果的完整资料,以供进一步的研究参考。

本书可供土木工程,尤其是从事地基基础设计、处理和研究的同行参考,也可作为高等院校相关专业的高年级本科生及研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地基沉降计算的新方法及其应用/杨光华著. —北京:科学出版社,2013
ISBN 978-7-03-037055-6

I. ①地… II. ①杨… III. ①地基沉降-计算 IV. ①TU 433

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第047119号

责任编辑:祝元志 / 责任校对:马英菊
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

*

2013年4月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2013年4月第一次印刷 印张:23 3/4

字数:463 680

定价:78.00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 010-62135763-8228

版权所有,侵权必究

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



序

地基沉降计算方法历来是经典土力学研究中的一个基本而又未能很好解决的问题，常用的地基沉降计算方法多是由现场取样经室内土样压缩试验，将所得的土体压缩曲线用于沉降计算。这种方法虽然比较简便实用，但理论上存在两个大的不足，一是取土时会产生土样扰动，二是试验的应力、变形条件与实际地基的受力状态不尽相同，这就使计算误差难以估计。我国地基规范采用了0.2~1.4这一变化幅度很大的经验系数来对计算结果进行修正，因该修正系数的差异变动大，结果有时相差高达6~8倍，致使人们对地基的实际沉降值不能确切掌控。国外也有一些采用按原位土试验进行地基沉降计算的方法，但大多仍以经验为主。

杨光华教授在本书中另辟蹊径，创造性地提出了切线模量法和割线模量法并运用这一改用非线性变模量的新方法进行地基沉降的分析计算。新方法根据现场原位土试验，通过建立理论模型求取土的计算参数，使之用于地基沉降计算，不仅在相当程度上克服了通常取样扰动的不利影响，还可以进行土体非线性变形条件下的地基沉降计算，使计算精度得以有效提高，较之以往通过原位试验进行沉降计算的方法具有更为坚实的理论基础。可以认为，它是当今土力学学科发展中的一个重要进步，相信对推动地基设计的发展将会很有助益。这也是本书作者长年坚持学科理论与工程实践相结合，并以此深入进行科学研究所取得的又一成果，值得祝贺并供业界同行们参考借鉴。

为此，我欣然写了以上的一点文字，是为序。

孙 钧

2013年元旦晴好佳日

写于沪滨同济园

前 言

地基沉降计算是土力学中一个经典而重要的内容，自太沙基 1925 年出版第一部《土力学》至今近百年，地基沉降算不准的难题仍未得到有效解决，以致严重影响到地基处理设计的水平和科学性，或使设计过于保守而浪费，或过于冒进而造成事故。目前，工程上应用最多的地基沉降计算方法是地基设计规范中的分层总和法，该法要在理论计算结果上乘以一个 0.2~1.4 的经验系数进行修正，相差达 7 倍，说明目前地基沉降计算的问题还没有很好的解决。而造成这一状况的原因，主要是因为用于计算的土体参数不能很好地反映原状土体的变形特性和受力状态的影响。由室内试验确定的土样参数与实际原位土体的参数差异较大，所以只能通过工程实测与理论计算的对比总结出一套经验系数来修正理论计算值。由于室内试验不能很好地反映原位土的实际特性，即使采用现代的数值计算和复杂的本构模型也难以使计算更准确，而根本办法是改进土的参数的获取方法，使其能更真实地反映工程中土的变形特性，提高土的计算参数的准确性。为此，作者在前人工作的基础上，提出一个从原位土的压板荷载试验曲线来获取原位土在不同应力状态下的非线性变模量参数的方法，然后将其用于分层总和法或有限元数值方法来计算地基的沉降。由于这样获取的参数可以较好地反映工程原位土的原状性和应力状态的非线性，因此可以克服以往由室内试验来确定参数的不足，使计算准确性大为提高，解决了长期困扰土力学中地基沉降计算不准的这一科学难题，并进一步发展了利用其他原位测试方法确定原位土参数方法的研究，如旁压试验、静力触探试验等。在研究中，根据土的压板试验的 $p-s$ 曲线的特点，分别建立了双曲线切线模量法、割线模量法和一般曲线下的切线模量法，将新方法应用于桩基和各种基础的沉降计算，并应用于刚性桩复合地基的计算，进行了刚性桩复合地基的优化研究，实现了“缺多少补多少”的地基处理优化设计。这样，就可以充分利用天然地基的承载力，大大提高地基处理设计的水平，节省地基处理的费用，

为地基处理设计实现由目前的承载力控制向变形控制发展提供科学的方法和坚实的理论基础，并可进一步推动土力学的研究。新方法促使土力学研究从以往的注重室内土样试验的研究向以原位土的力学特性为主开展研究的原位土力学的方向发展，使土力学理论能更好地符合工程实际并能更好地解决实际工程问题。

作者自 1997 年在《地基处理》杂志第 1 期上发表《基础非线性沉降变形计算的双曲线模型法》以来，历经了十多年的深入、系统研究，形成了一套系统的地基非线性沉降计算新方法，并付诸工程应用，包括最近用于港珠澳大桥海底隧道岛头过渡段的地基评价。本书内容是作者过去十多年来带领学生和同事们在这一方向上开展研究的一些成果及工程实践的总结，书中还附有一些实际工程案例和试验的完整资料，可供读者进一步研究参考。作者认为这是一个既具有重要理论意义又具有重要实用价值的课题。进一步深入的研究和发展也在进行，希望有兴趣的同行一起为土力学这门古老的学科取得新的发展和应用而共同努力！

本书的整理得到博士和硕士研究生们的大力帮助，他们是张玉成、温勇、姚丽娜、王恩麒、刘惠康、范泽、张明飞、陈富强、官大庶、朱思军、乔有梁、姜燕、王鹏华、刘鹏、骆以道、王俊辉、苏卜坤、陈伟超、刘琼和彭长学等。书中的工程案例是在广东省水利水电科学研究院的同事们的参与下完成的，他们是李思平、杜秀忠、张君禄、蔡小英、曾进群、李川、方大勇、周辉、李德吉、李艳华、梁华和陈夫等。在此，对他们的帮助以及其他给予帮助的同志一并表示感谢！

对孙钧院士热情为本书作序表示衷心感谢！

杨光华

2013 年 1 月 6 日

主要符号表

几何参数

A_p	单桩（墩）截面积
A_{p1}	长桩的单桩截面积
A_{p2}	短桩的单桩截面积
a_0	基础长度方向桩的外包尺寸
B	矩形基础或条形基础底边的宽度
b	桩帽边长或直径
b_0	基础宽度方向桩的外包尺寸
D	基础埋置深度
d	桩（墩）身直径
h	复合地基加固区的深度
h_1	垫层厚度
h_2	垫层之上最小设计填土厚度
L	矩形基础底边的长度
l	桩长
l_i	第 i 层土的厚度
m	复合地基置换率
m_1	长桩的面积置换率
m_2	短桩的面积置换率
r_0	桩截面半径
r_m	桩沉降影响区半径
S	桩间距
s	地基沉降
s_u	桩侧摩阻力充分发挥时的临界位移
u_p	桩（墩）的截面周长
Z	桩身剪切位移
Z_{cn}	桩身剪切位移最大值
Z_{cb}	桩周剪切位移最大值

Δ 加筋体的下垂高度

作用和作用效应

p_0	复合地基加固区顶部的附加压力
p_{cz}	软弱下卧层顶面处土的自重压力值
p_k	相应于荷载效应标准组合时,作用在复合地基上的平均压力值
$p_{k\max}$	相应于荷载效应标准组合时,作用在基础底面边缘处复合地基上的最大压力值
p_z	荷载效应标准组合时,软弱下卧层顶面处的附加压力值
Δp_i	第 i 层土的平均附加应力增量
Q_n^g	桩侧负摩阻力引起的下拉荷载标准值
s_1	复合地基加固区复合土层压缩变形量
s_{11}	短桩范围内复合土层压缩变形量
s_{12}	短桩以下只有长桩部分复合土层压缩变形量
s_2	加固区下卧土层压缩变形量
Δs_p	褥垫中桩顶的向上贯入量
T_t	最危险滑动面上的总剪切力
T_s	最危险滑动面上的总抗剪切力

抗力和材料性能

a	双曲线的初始切线模量
c_u	软土层不排水抗剪强度
C_s	土的剪切变形模量
D_{r1}	地基挤密后要求砂土达到的相对密实度
E_{50}	荷载 $p = \frac{1}{2} p_u$ 时对应的变形模量
E_{ij}	对应 P_i 在 h_j 处原状土的等效切线模量
E_β	相应应力水平为 $\beta = p_i / p_u$ 的割线模量
E_p	土的割线模量; 桩身弹性模量
E_s	土的压缩模量
E_t	土的等效切线模量
E_{t0}	土的初始切线模量
$\bar{E}_s$	地基变形计算深度范围内土的压缩模量当量值

E_{si}	基础底面下第 i 层土的压缩模量
$\overline{E}_{si}$	基础底面下第 i 层土的计算压缩模量
E_{sp}	复合地基压缩模量
E_{spi}	第 i 层复合土体的压缩模量
e_0	地基处理前砂土的孔隙比
e_1	地基挤密后要求达到的孔隙比
$e_{\max}$	砂土的最大孔隙比
$e_{\min}$	砂土的最小孔隙比
f	复合地基加固区桩侧摩阻力
f_a	复合地基经深度修正后的承载力特征值
f_{az}	软弱下卧层顶面处经深度修正后的地基承载力特征值
f_c	混凝土轴心抗压强度设计值
f_{cu}	立方体抗压强度平均值
f_{sk}	处理后桩间土承载力特征值
f_{spk}	复合地基承载力特征值
G_{si}	土体小变形时的初始剪切模量
I_p	塑性指数
q_p	桩（墩）端土承载力特征值
p_u	地基极限承载力
q_{si}	第 i 层土的桩（墩）侧摩阻力特征值
R_a	单桩（墩）竖向承载力特征值
R_{a1}	长桩单桩竖向承载力特征值
R_{a2}	短桩单桩竖向承载力特征值
$[R_t]$	地基土的承载力设计值
$[R_p]$	桩的承载力设计值
T	加筋体抗拉强度设计值
γ	土的重度
γ_{cm}	桩帽之上填土的平均重度
γ_d	土的干重度
γ_{d0}	挤密填孔后，3 个孔之间的形心点部位的干重度
$\gamma_{d\max}$	击实试验确定的最大干重度
γ_m	基础底面以上土的加权平均重度
γ_s	桩间土体重度
γ_{sp}	加固土层重度
$\tau_{\max}$	桩破坏时发挥的最大剪应力

τ	桩周土剪应力和最大剪应力
τ_u	桩周土最大剪应力

计 算 系 数

A_i	第 i 层土附加应力系数沿土层厚度的积分值
k_d	垫层刚度系数
K	安全系数；平均侧向土压力系数
n	桩土应力比
R_f	荷载水平修正系数；应力-应变曲线的拟合常数
α	柔性桩桩端天然地基土的承载力折减系数
β_p	单桩承载力发挥系数
β_{p1}	长桩承载力发挥系数
β_{p2}	短桩承载力发挥系数
β_s	桩间地基承载力发挥系数
θ	压力扩散角
ψ_c	桩工作条件系数
ψ_s	沉降计算经验系数
ξ	挤密砂石桩桩间距修正系数；地基土承载力的发挥系数；桩的承载力发挥系数
η	桩身强度折减系数

目 录

第 1 章 地基沉降计算的现状及其存在的问题	1
1.1 沉降计算研究的现状	1
1.2 地基沉降变形的机理	2
1.3 现行沉降计算方法的主要特点及存在问题	4
1.4 地基应力计算	5
1.5 现行地基沉降计算方法介绍	6
1.5.1 压缩模量法	6
1.5.2 弹性力学方法	9
1.5.3 砂土地基的沉降计算	11
1.5.4 利用压板荷载试验计算基础的沉降	12
1.6 小结	16
1.7 展望	16
第 2 章 地基沉降计算新方法研究	17
2.1 非线性双曲线模型法	17
2.1.1 概述	17
2.1.2 双曲线模型法	17
2.1.3 应用步骤	19
2.1.4 试验检验及应用	19
2.1.5 在残积土地基上的应用	21
2.1.6 结论	25
2.2 非线性沉降计算的原状土双曲线切线模量法	25
2.2.1 概述	25
2.2.2 原状土的切线模量法	27
2.2.3 依据荷载试验确定计算参数	29
2.2.4 切线模量与应力水平的关系	35
2.2.5 工程应用和验证	36
2.2.6 结论	40
2.3 非线性沉降计算的原状土割线模量法	41
2.3.1 概述	41
2.3.2 原状土割线模量法	41

2.3.3	原状土割线模量方程的建立	41
2.3.4	割线模量 E_p 中参数的分析和确定	43
2.3.5	应用和验证	45
2.3.6	结论	47
2.4	任意曲线的切线模量法	48
2.4.1	概述	48
2.4.2	任意曲线的切线模量法	48
2.4.3	用试验数据直接求切线模量的应用和验证	49
2.4.4	工程应用	53
2.5	用旁压和静力触探试验确定切线模量法的参数	54
2.5.1	概述	54
2.5.2	旁压试验的基本原理	54
2.5.3	旁压试验的特征参数确定	56
2.5.4	由旁压试验的特征参数确定岩土体参数	58
2.5.5	旁压试验曲线推导荷载试验 $p-s$ 曲线的方法	61
2.5.6	旁压试验确定地层初始切线模量	66
2.5.7	静力触探试验确定地基强度参数	68
2.5.8	基于旁压试验和静力触探试验参数计算地基沉降	72
2.5.9	结论	74
2.6	考虑地基压缩层深度的地基沉降简易计算方法	74
2.6.1	概述	74
2.6.2	地基压缩层深度的概念及确定方法	75
2.6.3	利用地基沉降计算新方法验证地基压缩层深度	77
2.6.4	利用地基沉降计算新方法确定的地基压缩层深度	80
2.6.5	修正的地基沉降弹性理论计算方法	81
2.6.6	结论	87
第3章	地基沉降计算新方法的应用	88
3.1	采用割线模量修正的有限压缩层地基模型	88
3.1.1	概述	88
3.1.2	地基柔度(刚度)矩阵的建立	88
3.1.3	有限压缩层地基模型	89
3.1.4	割线模量修正的有限压缩层地基模型	90
3.1.5	相关参数的确定	90
3.1.6	工程实例	92
3.1.7	在筏板基础中的应用	94

3.1.8 小结	109
3.2 切线模量法在复杂荷载下地基沉降计算中的应用	109
3.2.1 概述	109
3.2.2 工程实例	109
3.2.3 小结	117
3.3 切线模量法在桩基沉降计算中的应用	118
3.3.1 单桩沉降机理	118
3.3.2 单桩非线性沉降计算的原状土切线模量法	120
3.3.3 算例计算	130
3.3.4 小结	132
3.4 基于切线模量法的刚性桩复合地基沉降计算方法研究	132
3.4.1 概述	132
3.4.2 基于原状土切线模量法的刚性桩复合地基沉降计算方法	134
3.4.3 切线模量法在工程中的应用	140
3.4.4 小结	150
3.5 基于切线模量法的刚性桩复合地基优化设计研究	150
3.5.1 概述	150
3.5.2 地基优化设计的方法	152
3.5.3 复合地基优化设计及其应用	153
3.5.4 小结	158
3.6 切线模量法在合理确定地基承载力中的应用	159
3.6.1 地基的破坏形式及 $p-s$ 曲线特点	159
3.6.2 地基的极限承载力和临塑承载力	161
3.6.3 目前地基承载力取用及规范等确定地基承载力中存在的问题	162
3.6.4 地基承载力确定的新方法	165
3.6.5 地基承载力确定的案例分析	166
3.6.6 比萨斜塔地基承载力的研究	172
3.6.7 珊瑚礁岩地基承载力的研究	181
3.7 切线模量法在 CM 复合地基设计中的应用	189
3.7.1 CM 三维高强复合地基的介绍	189
3.7.2 CM 桩复合地基沉降计算的切线模量法	192
3.7.3 垫层作用的考虑	193
3.7.4 方法的计算参数	194
3.7.5 方法的程序设计	195
3.7.6 工程案例分折	196

3.7.7	CM 桩复合地基沉降计算的切线模量法与规范法的比较	205
3.8	基于原位试验确定高层建筑岩石地基承载力的应用	209
3.8.1	概述	209
3.8.2	原位压板试验确定岩石承载力	210
3.8.3	沉降分析	212
3.8.4	结果分析	213
3.8.5	结论	214
3.9	基于原位试验设计岩溶地区高层建筑筏板基础的应用	215
3.9.1	概述	215
3.9.2	工程概况	215
3.9.3	压板荷载试验结果	215
3.9.4	地基承载力的分析	216
3.9.5	基础沉降及受力计算	217
3.9.6	基础板厚抗冲切验算和配筋	220
3.9.7	实测结果	221
3.9.8	结论	221
第 4 章	工程案例	223
4.1	荔湾商业大厦地基设计	223
4.1.1	工程概况	223
4.1.2	地质情况	223
4.1.3	优化基础方案的可能性及存在的问题	230
4.1.4	不同土层厚度基础的沉降分析	230
4.1.5	荷载不均匀引起基础沉降差的处理	232
4.1.6	整体基础的沉降及倾斜分析	234
4.1.7	现场压板试验结果	235
4.1.8	小结	235
4.2	杨箕综合楼地基设计	236
4.2.1	工程概况	236
4.2.2	场地工程地质条件	237
4.2.3	优化目的及内容	238
4.2.4	桩基础及筏基基础计算	240
4.2.5	现场荷载试验结果	250
4.2.6	小结	250
4.3	德华大厦地基处理设计	251
4.3.1	工程概况	251

4.3.2	工程地质情况	251
4.3.3	地基土荷载板试验结果	260
4.3.4	标准贯入试验结果	265
4.3.5	地基处理方案	267
4.3.6	现场荷载试验结果	269
4.3.7	优化计算分析	272
4.3.8	沉降计算结果分析	277
4.3.9	小结	278
4.4	淘金家园地基处理设计	278
4.4.1	工程概况	278
4.4.2	场地工程地质条件	279
4.4.3	基础持力层荷载试验及分析	288
4.4.4	复合地基静荷载试验及分析	294
4.4.5	现场监测结果	311
4.4.6	小结	313
4.5	丽源居地基处理设计	313
4.5.1	工程概况	313
4.5.2	场地工程地质条件	313
4.5.3	计算分析内容	321
4.5.4	地基优化及承载力、沉降复核	326
4.5.5	结论和建议	340
4.6	现场压板静载试验工程案例	343
4.6.1	东莞某工程地基压板荷载试验	343
4.6.2	广州某工程地基压板荷载试验	349
第5章 结论和展望		355
参考文献		356

第 1 章 地基沉降计算的现状及其存在的问题

1.1 沉降计算研究的现状

地基的沉降计算是土力学的一个核心问题，但也是一个经典的世界难题。自从土力学创立的近百年来，全世界学者虽做过很多的努力，但目前为止，地基沉降计算仍是一个未很好解决的问题。即便有限元等数值方法已相当完善，现代计算机技术也完全可以绰绰有余地满足计算的要求，但各国的地基规范仍是以常规的半理论半经验法为主进行地基沉降的设计计算。当然其中关键是土的本构模型还没有很好的解决，以我国目前已使用了几十年的国家地基设计规范采用的分层总和法为例，其在理论计算结果上，还需乘以变化范围为 0.2~1.4 的经验系数来进行修正，说明沉降计算理论的准确性仍是较差的。实际工程中，对沉降计算的准确性则要求越来越高，而由于沉降计算不准确已极大地限制了地基设计水平的提高，一些先进的设计思想也难以完全实现，如有学者一直提倡的按变形控制设计的新思想等。因而目前仍是采用强度安全系数为主的方法进行地基设计，这种方法有时过于保守和浪费，即使这样，但对于变形协调要求较高的地方仍会产生风险。目前的地基工程事故，主要也是由于变形控制不当而产生的。因此对沉降变形的要求以及地基设计水平的提高都极大地依赖于地基沉降计算的准确性。珠港澳大桥海底沉管隧道的基础处理设计，沉管隧道通过海床挖槽后下沉于海床以下，地基的附加应力增加很少，不存在沉管下地基强度失稳的问题。但由于要与跨海大桥连接过渡，珠港澳大桥海底沉管隧道长约 6km，其中中部为天然地基，而两端通过人工岛与跨海大桥连接进行变形过渡，因而在两端的人工岛头段的隧道基础要采用地基处理，以使其沉降与中间天然地基段有较好的过渡，减小隧道结构的内力，为此分别采用了管桩复合地基、旋喷桩复合地基和大直径挤密砂桩复合地基进行变形过渡。这是一种变形控制设计，其对地基沉降计算的准确性提出了很高的要求。这是一个很典型的按沉降控制设计地基处理的例子，可见沉降计算准确性的重要性。

对于现有的地基沉降计算理论，一个比较简单的现场压板荷载试验的荷载沉降过程 $P-s$ 曲线目前都没有什么合适的方法能进行很好的模拟计算。1994 年美国的 Texas A&M University 对地基沉降这一问题进行了系统试验研究，在现场进行了各种岩土原位测试，包括旁压试验、静力触探试验、标贯试验、波速试验

等原位测试,同时取样进行了包括三轴应力应变关系等的各种室内土工试验,然后在现场进行了边长分别为 1m、1.5m、2.5m 和 3m 的正方形压板荷载试验,邀请全世界 31 个大学和顾问公司对压板试验的沉降采用包括有限元数值方法等各种算法进行预测。结果并不理想,其中对 1m 板的试验,65% 预测在给定设计荷载下沉降为 2~4mm,而实际沉降了 9.5mm,由此可见,地基的沉降计算包括有限元数值方法等现代土力学理论也并不能准确预测地基的沉降。这是土力学和基础工程中目前还没有解决好的科学问题。

1.2 地基沉降变形的机理

材料力学指出,材料的变形可划分为体积变形和剪切变形,地基的沉降也可划分为由于体积变形引起的沉降和剪切变形引起的沉降。传统的压缩试验即是反映了体积变形的沉降,如图 1.2-1 和图 1.2-2 所示。

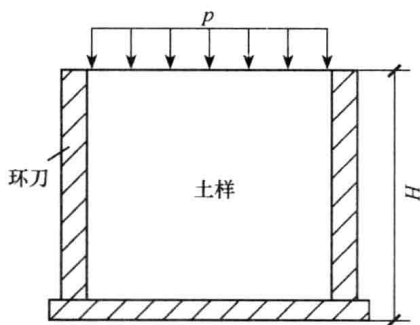


图 1.2-1 有侧限压缩试验

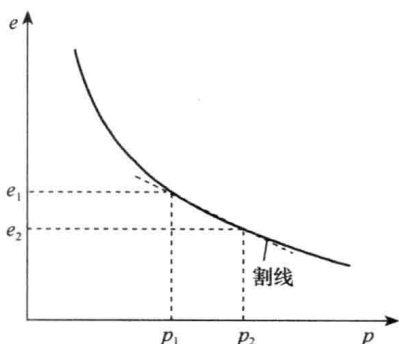


图 1.2-2 压缩试验的 $e-p$ 曲线

通常压缩试验是在环刀内进行的有侧限的单向压缩,其反映的是体变沉降。由此所得到的压缩产生的孔隙比 e 的变化与荷载 p 的关系如图 1.2-2 所示,通常取 $e-p$ 曲线中 $p=0.1\sim 0.2\text{MPa}$ 的割线定义为土的压缩模量,则由 $p=0.1\text{MPa}$ 到 0.2MPa 期间压缩引起的沉降为

$$\Delta s = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot H_1 \quad (1.2-1)$$

H_1 为当孔隙比为 e_1 时土样的高度。定义土的压缩系数为

$$a = \frac{e_1 - e_2}{p_1 - p_2} = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (1.2-2)$$

则

$$\Delta s = \frac{a}{1 + e_1} \cdot \Delta p \cdot H_1 \quad (1.2-3)$$