

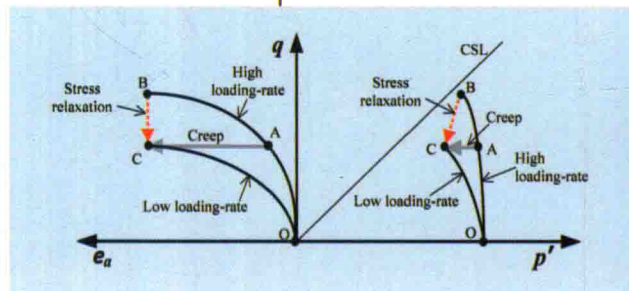
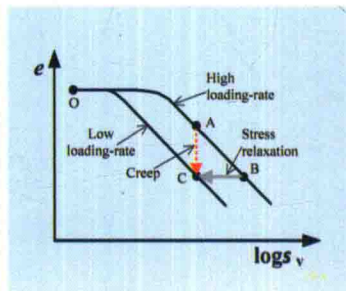
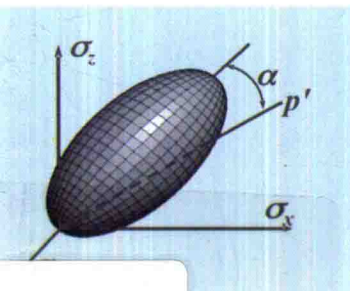


上海市科技专著出版基金资助

Time-Dependency of Soft Clay and Application

软黏土流变理论及应用

尹振宇 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

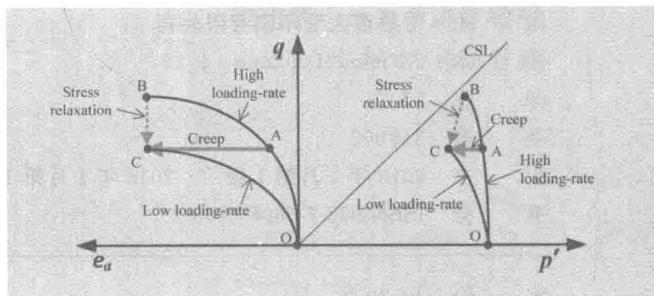
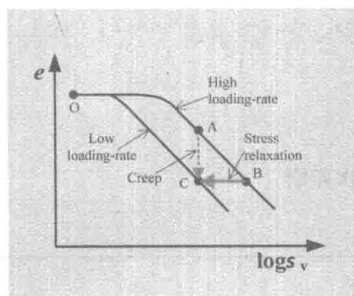
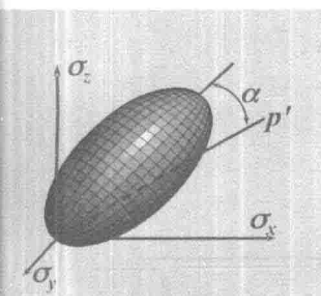


上海市科技专著出版基金资助

Time-Dependency of Soft Clay and Application

软黏土流变理论及应用

尹振宇 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书以大量的饱和软黏土的室内试验为基础,围绕流变特性,阐述了恒应力条件下的蠕变特性及其描述方法、应力应变的加载速率效应特性及其描述方法、恒应变条件下的应力松弛特性及其描述方法以及应力膨胀/剪缩关系的时间相关性;接着系统地总结了流变本构模拟方法、流变模型的数值算法及有限元二次开发;然后以 ANICREEP 模型为例详细介绍了如何开发天然软黏土的流变本构模型,详述了流变特性的统一性及流变参数确定方法;最后以大型岩土工程有限元计算软件 PLAXIS 为例,详述其结合流变模型的二次开发及应用。本书精选了简明易懂的试验成果和规律总结,以期学生能够在较短时间内具备运用试验方法分析问题和解决问题的能力。另外,本书提供了流变模型源程序以及 PLAXIS 二次开发源程序,供分析或练习之用。

本书可作为高等院校和科研院所的土木、水利、交通、铁道及工程地质等专业的研究生教材和高年级本科生的选修课教材,也可作为上述相关专业科研及工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

软黏土流变理论及应用/尹振宇著. —上海:同济大学出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-5608-6185-2

I. ①软… II. ①尹… III. ①软黏土—土体流变学—研究 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 007075 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

软黏土流变理论及应用

尹振宇 著

责任编辑 季 慧 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 常熟市大宏印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 12.75
字 数 318000
版 次 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6185-2

定 价 49.80 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

序

软黏土在全球的沿江沿海地区广泛分布。这些区域通常又是各国经济相对发达地区,因而工程建设也相对密集。因此,软黏土的力学特性评价,尤其是其力学特性的时间相关性,对于工程的长期稳定性乃至可持续发展意义重大。

尹振宇博士一直潜心于土的本构模拟及应用方面的研究,勤奋刻苦,理论基础扎实,在土力学与岩土工程领域国际顶级期刊上发表了很多高水平学术论文,并且学术活动积极,在国内外均有一定的知名度,为国际岩土工程领域的后起之秀。最初与尹振宇博士认识是在2007年初我主办的土的本构关系国际会议上。三年后尹振宇博士作为上海市“东方学者”特聘教授回国工作,此后相聚机会增多,更增进了对他的了解。2012年夏天我邀请尹振宇博士来我校访学,开始与他开展实质性的合作,如共同发表了2篇国际期刊论文,共同组织并举办了2012年岩土材料流变特性国际研讨会,并成功策划了国际核心期刊 *International Journal of Geomechanics* (ASCE) 的“岩土材料流变”特刊,等等。

尹振宇从博士阶段已开始软黏土流变方面的研究,非常重视试验研究及规律总结,尤其在结构性土的流变特性、数值计算及分析方面有较深的功力。尹振宇博士治学严谨,其试验数据和数值分析均较为可靠,这对土力学与岩土工程来说至关重要。此书从内容上讲,汇集了作者在软黏土室内试验及规律总结、本构方法及实际工程应用等方面的原创性成果,并且从非常直接、直观的试验现象出发到理论公式的提出,从一维到三维、从重塑土到原状土作循序渐进的阐述,让读者快速、准确地建立起软黏土流变力学特性的概念。

一本优秀的专著应该同时能体现本领域最新研究进展,因此需要作者每年仔细研究成百上千的文献,并且对它们进行归纳总结,以形成系统的知识体系,这也正是尹振宇博士在此书撰写中的努力方向。基于尹振宇博士在土力学的研究及教学方面的经验和技巧及其对软黏土流变特性的深入分析及深刻认识,我非常期待此书早日与读者见面。



香港理工大学土木及环境工程系

殷建华 地力学讲席教授

2015年12月于香港

前言

我从小生长在浙南山区的一个滨海小村,小时候的游戏和自制玩具都离不开泥巴,而且一定要有足够的水平才能制作各种玩具,直到上了大学才知道这种材料叫“饱和软黏土”。之后更是接触了大量的软黏土工程及难以解答的疑难杂症,直到有一天终于下定决心与“软黏土”为伴。现在想想真的很神奇,原来小时候的我就已经跟软黏土结缘,一直“玩”到现在。

第一个带我走上土木工程这条路的是我的一位建筑工程师舅舅,由于软黏土地基的沉降问题,即使在农村盖楼房都需要做地基处理设计,这直接造就了家乡庞大的基础工程设计市场,在那个就业导向性专业选择的年代,我毫无悬念地选择了浙江大学建筑工程专业。1997年夏天大学毕业后,我顺理成章地加入了建筑工程师的行列,每天奔波于施工现场和设计院之间,这段近5年忙碌且丰富的工程实践经历使我受用至今。

2002年选择再次回到校园得幸于当时我仅存的一点对软土地基沉降机理的好奇。而选择去法国留学并不是因为法国的岩土行业有多先进,更多的是一种无奈和投机取巧。因为长期繁杂的工作已经让我把非专业课本知识,尤其是英语,几乎全部还给了老师,这几乎让我丧失了进入中国或英语国家攻读硕士的机会。而这时候正值法国留学开放,可以凭还算优异的大学记录、且不太需要语言门槛,我便成功申请了南特中央理工大学的硕士项目。这段充满未知数的留学计划因为与 Pierre-Yves HICHER 教授和同济大学黄宏伟教授的偶遇而变得异常顺利。当时正值黄宏伟教授访问南特中央理工大学,也是张冬梅师姐中法博士联合培养的最后阶段,研究课题刚好是软黏土地基中地铁长期沉降问题。于是我拼命学习,且积极与来自法国和法语国家的同学们交流讨论,最终以第二名的成绩拿到了当时仅有的两个法国国家博士奖学金名额之一。此后,以法国博士生的身份展开与同济大学联合培养,可以说 Pierre-Yves HICHER 教授、黄宏伟教授以及张冬梅师姐是我软黏土流变科研的领路人和启蒙人。我的留学经历也再次证明了法国也可以是一个不错的选择。

2006年博士毕业,再次面临回归企业或是继续科研的选择。可能是科研的神秘面纱多于企业使我最终放弃了好几个法国的长期工作合同,而毅然选择了跟随当时尚在英国的 Minna Karstunen 教授做博士后。在接下来的几年,得益于欧盟玛丽居里项目资助以及 Minna Karstunen 教授给予我的充分学术自由,继续开展结构性软黏土的流变特性及模拟研究,直至2010年回国。

此书的酝酿始于2010年在上海交通大学任教,我有意把软黏土流变作为研究生选修课的部分内容,以期对学生们在今后的工作中有所帮助。因此,分别针对不同的内容,在河海大学朱俊高教授的指点下,与博士生朱启银做了一些综述工作,并分别发表在《岩土工程学报》《岩土力学》等期刊上。因此,在朱启银的博士论文中也能找到这些影子。

本书以大量的饱和软黏土的室内试验为基础,围绕流变特性,阐述了恒应力条件下的蠕变特性及其描述方法、应力应变的加载速率效应特性及其描述方法、恒应变条件下的应力松弛特性及其描述方法,以及应力剪胀/剪缩关系的时间相关性;接着系统地总结了流变本构模拟方法、流变模型的数值算法及有限元二次开发;然后以 ANICREEP 模型为例详细介绍了如何开发天然软黏土的流变本构模型,并详述了流变特性的统一性及流变参数确定方法;最后以大型

岩土工程有限元计算软件 PLAXIS 为例,详述其结合流变模型的二次开发及应用。本书精选了简明易懂的试验成果并做了规律总结,以期学生能够在较短时间内具备运用试验方法分析问题和解决问题的能力。

此外,本书提供了流变模型源程序以及 PLAXIS 二次开发源程序。另外,本书对图表进行整理,形成一套试验数据库,可供读者分析或训练之用,以期对读者有所帮助。

本书的部分成果和出版得到了上海科技专著出版基金、国家自然科学基金(41372285、51579179)、欧盟玛丽居里行动计划(PIAPP-GA-2011-286397)等资助,在此表示衷心的感谢。

同时感谢香港理工大学殷建华教授在理论研究上给予我的指导,感谢上海交通大学与法国南特中央理工大学联合培养博士生朱启银和金银富、法国南特中央理工大学博士生吴则祥、赵朝发、刘江鑫、熊昊、金壮,博士后李舰在本书编排、整理和校阅过程中所付出的辛勤劳动。

鉴于专业水平有限,书中难免有纰漏之处,望读者和同行批评指正。



尹振宇 2015 年 9 月

符号定义

C_c	压缩指数 $C_c = \Delta e / \Delta \lg p'$ (一维条件下 $C_c = \Delta e / \Delta \lg \sigma'_v$)
C_p	先期固结压力指数
C_s	回弹指数 $C_s = \Delta e / \Delta \lg p'$ (一维条件下 $C_s = \Delta e / \Delta \lg \sigma'_v$)
C_α	次固结系数 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \lg(t)$
$C_{\alpha e}$	次固结系数 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \ln(t)$
$C_{\alpha cf}$	次固结系数参考值
CI	黏粒含量
D^e	弹性刚度矩阵
D^{ep}	弹塑性刚度矩阵
D^{evp}	弹黏塑性刚度矩阵
e, e_0	孔隙比, 初始孔隙比
e_i	参考孔隙比
E	杨氏模量
g	塑性势函数
G	剪切模量
G_s	土粒比重
I_p	塑性指数
K	体积模量
K_0	静止土压力系数 $K_0 = \sigma'_{h0} / \sigma'_{v0}$
$\bar{K}$	输入能量与输出能量的增量比
k, k_v, k_h	渗透系数, 竖向渗透系数, 水平向渗透系数
M	临界状态线的斜率
M_c	压缩条件下临界状态线的斜率
M_e	伸长条件下临界状态线的斜率
m	$\lg \epsilon - \lg t$ 图中曲线的斜率
n	材料常数
POP	超静止土压力 $POP = \sigma_{p0} - \sigma'_{v0}$
p_{mi}	固有屈服面大小
p_m^r	参考屈服面大小
p, p'	平均应力, 平均有效应力
q	偏应力
R_α	应力松弛系数
S	应力松弛曲线斜率
s_{ij}	偏应力张量

s_u	不排水抗剪强度 $s_u = q_{\text{peak}}/2$
t_0	应力松弛初始等效时间
t_c	蠕变时间
t_{EOP}	主固结结束时间
Δt	时间增量
$u, \Delta u$	孔隙水压力, 超孔隙水压力
$du, \delta u$	孔隙水压力增量
w	含水量
w_L	液限
w_P	塑限
α	屈服面或塑性势面在 $p'-q$ 平面上的倾斜斜率
α_{ij}	屈服面各向异性结构张量
β	加载速率效应系数
χ, χ_0	结构比, 初始结构比
δ_{ra}	洞壁侧向位移与洞室初始半径的比值
$\epsilon_a, \delta\epsilon_a$	轴向应变, 轴向应变增量
$\epsilon_r, \delta\epsilon_r$	径向应变, 径向应变增量
$\epsilon_v, \delta\epsilon_v$	体积应变, 体积应变增量
$\epsilon_v^{\text{vp}}, \delta\epsilon_v^{\text{vp}}$	黏塑性体积应变, 黏塑性体积应变增量
ϵ_{vm}	对应当前平均有效应力 p' 的体积应变
ϵ_{vm}^r	对应当前 p' 的参考体积应变
$\epsilon_{vm1}^{\text{vp}}$	临界蠕变应变 $\epsilon_{vm1}^{\text{vp}} = \epsilon_0 / (1 + e_0)$
$d\epsilon_v^p, \delta\epsilon_v^p$	塑性体应变增量
$d\epsilon_d^p, \delta\epsilon_d^p$	塑性偏应变增量
$d\epsilon_v^e, \delta\epsilon_v^e$	弹性体应变增量
$d\epsilon_d^e, \delta\epsilon_d^e$	弹性偏应变增量
$\dot{\epsilon}$	应变速率
$\dot{\epsilon}_v$	体积应变速率
$\dot{\epsilon}_z$	竖向应变速率
$\dot{\epsilon}^e$	弹性应变增量
$\dot{\epsilon}^p$	塑性应变增量
$\dot{\epsilon}^r$	参考先期固结压力 σ_{p0}^r 对应的参考应变速率
$\dot{\epsilon}^{\text{in}}$	非弹性应变速率
$\dot{\epsilon}^{\text{vp}}$	黏塑性应变速率
$\dot{\epsilon}_z^e$	竖向弹性应变速率

$\dot{\epsilon}_v^r$	参考体积应变速率
$\dot{\epsilon}_z^r$	参考竖向应变速率
$\dot{\epsilon}_v^{vp}$	蠕变体积应变速率
$\dot{\epsilon}_z^{ip}$	黏性竖向应变速率
$\dot{\epsilon}_z^{vp}$	黏塑性竖向应变速率
$\Delta\epsilon$	应变增量
$\Delta\epsilon^{vp}$	塑性体积应变增量
φ	摩擦角
γ	材料重度
γ_{xy}	工程剪应变
η	应力比 $\eta=q/p'$
η_{K_0}	一维固结条件下的应力比 ($K_0=1-\sin\phi_c$)
κ	回弹系数 $\kappa=\Delta e/\Delta\ln p'$
λ	压缩系数 $\lambda=\Delta e/\Delta\ln p'$
λ_i	重塑土压缩指数
μ	黏性系数
$\sigma_a, \delta\sigma_a$	轴向应力, 轴向应力增量
$\sigma_r, \delta\sigma_r$	径向应力, 径向应力增量
$\sigma'_v, \delta\sigma'_v$	竖向应力, 竖向应力增量
σ'_v	有效竖向应力
$\sigma'_s, \delta\sigma'_z$	竖向有效应力, 竖向有效应力增量
σ_{ra}	旁压洞室径向应力
σ_p, σ_{p0}	先期固结压力, 初始先期固结压力
σ'_p, σ'_{p0}	参考先期固结压力, 初始参考先期固结压力
$\Delta\sigma$	应力增量
ν	泊松比
$\Phi(f)$	超应力标度函数
$\langle \cdot \rangle$	MacCauley 函数

目 录

序	
前言	
符号定义	
第 1 章 绪论	(1)
1.1 流变是什么	(1)
1.2 为什么要研究软黏土流变	(1)
1.2.1 工程尺度下的软黏土流变现象	(1)
1.2.2 试样尺度下的软黏土流变现象	(2)
1.2.3 微观尺度下的软黏土流变现象	(3)
1.3 软黏土流变的研究内容	(5)
1.3.1 加载速率效应的试验研究	(5)
1.3.2 蠕变特性的试验研究	(5)
1.3.3 应力松弛特性的试验研究	(6)
1.3.4 应力剪缩/剪胀关系的试验研究	(6)
1.3.5 流变本构理论研究	(6)
1.3.6 流变特性的统一性及关键参数研究	(7)
1.3.7 流变本构理论的应用研究	(7)
1.4 本书的特点及不足之处	(8)
第 2 章 加载速率效应特性	(9)
2.1 加载速率效应的定义	(9)
2.2 一维条件下的先期固结压力加载速率效应	(9)
2.2.1 先期固结压力的速率效应	(10)
2.2.2 压缩曲线的速率归一化	(11)
2.2.3 不同先期固结压力-速率方程的探讨	(12)
2.3 三轴条件下的不排水抗剪强度加载速率效应	(16)
2.3.1 不排水抗剪强度的速率效应	(16)
2.3.2 应力-应变曲线的归一化	(17)
2.3.3 不同抗剪强度-速率方程的探讨	(17)
2.4 复杂应力条件下的强度加载速率效应	(21)

2.5 加载速率效应的统一性探讨	(22)
2.5.1 一维~三轴统一性探讨	(22)
2.5.2 三轴压缩/伸长统一性探讨	(24)
2.5.3 不同 OCR 统一性探讨	(26)
第3章 蠕变特性	(27)
3.1 蠕变的定义	(27)
3.2 一维蠕变试验	(27)
3.2.1 次固结及次固结系数	(27)
3.2.2 次固结系数如何演化	(28)
3.2.3 次固结系数的确定	(28)
3.3 一维次固结特性的微观结构相关性	(30)
3.4 如何准确考虑非线性次固结特性	(32)
3.4.1 非线性蠕变的试验依据	(32)
3.4.2 现有分析方法	(33)
3.4.3 非线性蠕变方程的提出	(33)
3.5 三轴蠕变试验	(35)
3.5.1 排水蠕变速率的演化过程	(35)
3.5.2 不排水蠕变及长期不排水抗剪强度	(36)
3.6 复杂应力下的蠕变试验	(37)
3.6.1 室内旁压试验	(37)
3.6.2 现场试验	(38)
第4章 应力松弛特性	(41)
4.1 应力松弛的定义	(41)
4.2 一维应力松弛试验	(41)
4.2.1 孔压变化规律	(41)
4.2.2 应力变化规律	(42)
4.3 三轴应力松弛试验	(43)
4.3.1 应力变化规律	(43)
4.3.2 不排水条件下的孔压变化规律	(46)
4.3.3 排水条件下的体应变变化规律	(46)
4.4 非常规应力松弛试验	(46)
4.4.1 室内旁压试验	(47)
4.4.2 现场试验	(47)
4.5 应力松弛系数	(48)

4.6 蠕变与速率效应及应力松弛的相关性讨论	(50)
4.6.1 一维应力条件	(50)
4.6.2 三轴应力条件	(50)
第5章 应力剪胀/剪缩特性的时间效应	(52)
5.1 几种典型的应力剪缩/剪胀方程	(52)
5.2 三轴试验中应力剪胀剪缩数据分析	(53)
5.3 应力剪胀剪缩关系的应变速率效应	(54)
5.4 蠕变过程中的应力剪胀剪缩关系	(57)
5.4.1 三轴排水蠕变试验	(57)
5.4.2 三轴不排水蠕变试验	(58)
5.4.3 应力剪缩/剪胀关系	(60)
5.5 应力松弛过程中的应力剪胀剪缩关系	(61)
5.5.1 三轴压缩条件下的剪缩/剪胀特性	(61)
5.5.2 三轴伸长条件下的剪缩/剪胀特性	(62)
第6章 流变本构模拟方法	(65)
6.1 一维流变本构模型	(65)
6.1.1 基于次固结现象的模型	(65)
6.1.2 基于先期固结压力的速率效应的模型	(67)
6.1.3 元件组合流变模型	(69)
6.1.4 基于三轴蠕变速率发展规律的一维模型	(70)
6.2 三维流变本构模型	(71)
6.2.1 基于非稳态流动面理论的模型	(71)
6.2.2 基于超应力理论的模型	(72)
6.2.3 基于扩展超应力理论的模型	(73)
6.2.4 基于边界理论框架的模型	(74)
6.3 流变模型在工程中的应用	(76)
6.3.1 路堤	(76)
6.3.2 边坡	(77)
6.3.3 其他工程	(77)
第7章 有限元二次开发及应力积分算法	(78)
7.1 有限元二次开发概述	(78)
7.1.1 数值计算及有限元概述	(78)
7.1.2 切线刚度法	(79)

7.1.3	修正牛顿-拉弗森法	(80)
7.1.4	收敛标准	(81)
7.1.5	高斯点应力积分方法	(81)
7.2	耦合固结分析	(82)
7.2.1	基本思想	(82)
7.2.2	数值实现	(82)
7.3	流变模型应力积分算法	(83)
7.3.1	概述	(83)
7.3.2	牛顿-拉弗森算法	(84)
7.3.3	EVP-Desai 算法	(85)
7.3.4	EVP-Katona 算法	(86)
7.3.5	EVP-Stolle 算法	(87)
7.3.6	EVP-cutting plane 算法	(88)
7.3.7	步长及回归方式的选择原则	(89)
第 8 章	基于速率效应的流变本构模型开发	(91)
8.1	一维非结构性软黏土模型	(91)
8.1.1	模型描述	(91)
8.1.2	模型参数	(93)
8.1.3	模型的固结耦合	(93)
8.1.4	模型验证	(93)
8.2	三维非结构性软黏土模型	(94)
8.2.1	模型描述	(94)
8.2.2	模型参数	(96)
8.2.3	模型验证	(96)
8.3	一维结构性软黏土模型	(97)
8.3.1	试验现象	(97)
8.3.2	模型描述	(99)
8.3.3	模型参数	(99)
8.3.4	模型验证	(100)
8.4	三维结构性软黏土模型	(101)
8.4.1	模型描述	(101)
8.4.2	模型参数	(101)
8.4.3	模型验证	(102)
第 9 章	流变三大特性统一性及参数确定	(103)
9.1	三大流变特性的统一性	(103)

9.1.1	应力松弛解析解	(103)
9.1.2	应力松弛特性预测	(105)
9.1.3	流变参数内在关系	(105)
9.2	软黏土流变参数统一性验证	(107)
9.2.1	试验描述及参数确定	(107)
9.2.2	加载速率效应对比	(109)
9.2.3	蠕变特性对比	(109)
9.2.4	应力松弛特性对比	(110)
9.3	流变参数确定方法	(111)
9.3.1	优化反演分析法概述	(111)
9.3.2	目标函数	(111)
9.3.3	搜索策略和优化算法	(112)
第 10 章	基于流变模型的 PLAXIS 二次开发及验证	(114)
10.1	PLAXIS 二次开发简介	(114)
10.1.1	PLAXIS 简介	(114)
10.1.2	用户自定义模型简介	(114)
10.2	用户自定义流变模型	(116)
10.2.1	材料输入参数界面自定义	(117)
10.2.2	状态变量初始化(IDTask=1)	(119)
10.2.3	流变本构模型计算(IDTask=2)	(121)
10.2.4	创建材料刚度矩阵(IDTask=3&6)	(124)
10.2.5	计算结构及调试	(125)
10.3	常规试验模拟测试	(126)
10.3.1	一维固结试验模拟	(126)
10.3.2	三轴剪切试验模拟	(128)
第 11 章	流变模型在软土工程中的应用	(130)
11.1	路堤建造及长期沉降分析	(130)
11.1.1	路堤施工与监测点布置	(130)
11.1.2	土工试验资料	(131)
11.1.3	有限元模型及材料参数	(132)
11.1.4	计算结果及分析	(132)
11.2	浅基础沉降分析	(136)
11.2.1	计算模型	(137)
11.2.2	计算步骤	(138)

11.2.3 计算结果及分析	(138)
11.3 隧道施工及工后沉降分析	(140)
11.3.1 计算模型	(140)
11.3.2 材料设置及参数	(141)
11.3.3 计算步骤	(141)
11.3.4 计算结果及分析	(142)
参考文献	(144)
附录一:ANICREEP 模型源程序	(156)
附录二:ANICREEP 的 PLAXIS 用户自定义模型源程序	(172)

第1章 绪 论

1.1 流变是什么

流变学研究的是在外力作用下,物体的变形和流动的学科,研究对象主要是流体,还有软固体或者在某些条件下固体可以流动而不是弹性形变,它适用于具有复杂结构的物质。流变学出现在 20 世纪 20 年代。学者们在研究橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土,以及金属等工业材料;岩石、土、石油、矿物等地质材料;以及血液、肌肉骨骼等生物材料的性质的过程中,发现使用古典弹性理论、塑性理论和牛顿流体理论已不能说明这些材料的复杂特性,于是就产生了流变学的思想(吴其晔,巫静安,2002)。

英国物理学家麦克斯韦(Maxwell)在 1869 年发现,材料可以是弹性的,又可以是黏性的。对于黏性材料,在恒定载荷作用下会出现变形随时间而增大的现象,我们称之为“蠕变”;而黏性材料在恒定应变下,应力随着时间的变化而减小至某个有限值,这一过程称为“应力松弛”;同样地,黏性材料在不同的加载速度下会测出不同的强度屈服值,称为强度的加载速率效应。材料的这三大特性我们统称为材料的流变特性,也称为时间效应。可以说,一切材料都具有流变特性或时间效应,只不过应不同的材料有强弱而已。鉴于材料流变特性的重要性,1929 年,美国在宾厄姆教授的倡议下,创建流变学会;1939 年,荷兰皇家科学院成立了以伯格教授为首的流变学小组;1940 年英国出现了流变学家学会。1948 年国际流变学会议就是在荷兰举行的。法国、日本、瑞典、澳大利亚、奥地利、捷克斯洛伐克、意大利、比利时等国也先后成立了流变学会,而中国流变学学会相对来说成立较晚(1985 年)。

在土木工程中,建筑物地基的变形可延续数百年之久,如意大利的比萨斜塔。地下隧道竣工数十年后,仍可出现结构蠕变断裂和下沉等蠕变灾害。因此,对于土流变性能和岩石流变性能的研究日益受到重视,尤其是在软黏土分布较广的地区工程流变灾害日益突出。在我国,软黏土主要分布在东南沿海地区、各大河流的中下游地区以及湖泊附近地区,这些地区基本上是人口稠密、经济活动活跃、各类工程建设大量展开的地区(图 1-1)。

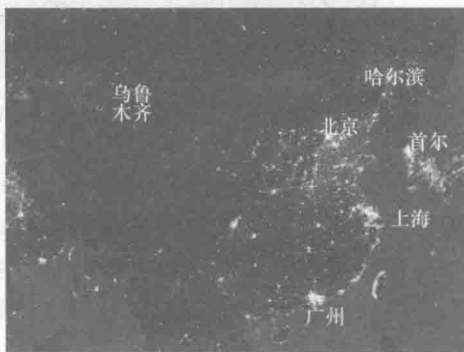


图 1-1 中国夜景卫星图(NOAA 提供)

1.2 为什么要研究软黏土流变

1.2.1 工程尺度下的软黏土流变现象

早在 20 世纪 90 年代末,孙钧院士就指出“软黏土受力作用后其变形位移随时间的增长变化以及他们的后期沉降与土体的长期强度等等都是人们迫切关注的热点”(孙钧,1999)。

近年来随着我国经济的迅猛发展和城市化进程的进一步深入,在软黏土地基环境中的建

设项目日益增多,比如:道路桥梁工程、大型港口工程、机场建设、大型地下空间的开发利用、大型基坑工程及高层建筑深基础、沿海的海防工程及沿江的堤岸工程等。最近几年,由于土地的稀缺,在沿海软黏土地区更是涌现出很多大型围海造地及人工岛等类型的建设项目。由于软黏土作为构筑物的支承地基在不同应力状态作用下有长期变形难以收敛的流变特性,造成工程结构物的长期沉降变形速率难以控制,对工程稳定性带来很大的安全隐患,且对工程灾变的防控及维护带来巨大的经济负担。比如,沿海地区的结构性软黏土地基上修建的公路,在即桥(涵)台和路堤连接处由于公路路堤的长期沉降远大于桩基处理过的桥台而普遍出现“桥头跳车”现象;我国东部沿海的“千里海堤”大都建在结构性软黏土层上,堤坝的长期沉降很大,轻则导致其高度满足不了设计标高,重则导致地基滑移破坏。然而,工程建设的可持续发展需要既安全又经济的工程设计。因此,软黏土的长期变形难以收敛问题,给软土地基环境下的岩土工程的设计和建设提出一个新的挑战。

针对软土工程流变灾害报道较多的有:①软土地基上修建路堤。路堤作为一种填方路基,在其自重以及交通荷载作用下会产生压密沉降以及路堤基础的变形。而当路堤基础土为软黏土时,由于孔隙水压力消散较慢,其长期变形的特性就显得尤为明显。②边坡。边坡工程或黏土质自然边坡的稳定性是一个比较复杂的问题,也是关系民生的重要研究课题。对于软黏土边坡,由于土体的流变性、各向异性和结构性的存在,会导致其变形渐进产生;反过来,塑性变形又会降低其抗剪强度,最终造成破坏。因此,在边坡渐进性破坏分析中考虑土体流变特性很有必要。③基坑开挖和隧道建设。黏土蠕变是引起基坑周围土体时效变形的因素之一,深入研究土体蠕变特性对于分析基坑的时效变形有着重要作用。建设于软黏土地区的地铁隧道会有显著的长期沉降,在正常情况下隧道的长期沉降占总沉降量的 30%~90% (Shirlaw, 1995)。

1.2.2 试样尺度下的软黏土流变现象

试样尺度下的软黏土流变主要指在实验室土工试验中发现的应力应变关系的时间效应,主要包括:①抗剪强度的大小和先期固结压力的大小在很大程度上都取决于加载速率,即强度的加载速率效应;②在恒定应力下应变随时间发生的蠕变现象;③在恒定应变值下应力随时间减小的应力松弛现象。这三大现象我们统称为土的流变特性。

在软黏土的室内土工试验中,一维固结或压缩试验及三轴不排水剪切试验较为普遍。流变三大特性的相互关联性和统一性可由图 1-2 来描述:

在一维应力条件下,相同的土样在高加载速率 CRS(Constant Rate of Strain)试验中表现出先期固结压力大于低加载速率 CRS 试验。如图 1-2(a)所示,路径 OAB 和 OC 分别对应高加载速率和低加载速率情况,应力状态点 O 代表初始状态,A 点和 C 点具有相同的竖向应力,B 点和 C 点具有相同的孔隙比。从应力状态 O 点到 C 点可以通过三种不同的应力路径实现:①慢速加载,直接从 O 点到 C 点;②从 O 点到 A 点快速加载,然后从 A 点到 C 点通过蠕变实现;③从 O 点到 B 点快速加载,然后从 B 点到 C 点通过应力松弛实现。

在三轴应力条件下,三轴不排水试验可以得到与一维条件下相类似的土的流变特性。如图 1-2(b)所示,不同加载速率条件下在偏应力-轴向应变“ q - ϵ_a ”坐标和有效应力路径“ p' - q ”坐标下,图中 4 个应力状态点 O、A、B 和 C 具有相同的孔隙比,O 点是初始状态,A 点和 C 点具有相同的偏应力,B 点和 C 点具有相同的轴向应变。类似于上述一维情况,从应力状态 O 点到 C 点同样可以通过三种不同的应力路径来实现。