

朱才辉 李宁 著

深厚黄土地基高填方 机场变形规律系统研究

SHENHOU HUANGTU
DIJI GAOTIANFANG

JICHANG BIANXING GUIYU XITONG YANJIU



陕西出版传媒集团
陕西科学技术出版社

本书受到国家自然科学基金“51308456”和陕西省科技计划
资助项目“2013JQ7022”的资助

深厚黄土地基高填方机场 变形规律系统研究

朱才辉 李 宁 著

陕西出版传媒集团
陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

深厚黄土地基高填方机场变形规律系统研究/朱才
辉、李宁著. —西安:陕西科学技术出版社,2014. 6

ISBN 978-7-5369-6067-1

I. ①深… II. ①朱… III. ①黄土地基—机场—地基
变形—研究 IV. ①V351②TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 099184 号

深厚黄土地基高填方机场变形规律系统研究

出版者 陕西出版传媒集团 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话 (029)87211894 传真 (029) 87218236
<http://www.snstp.com>
发行者 陕西出版传媒集团 陕西科学技术出版社
印刷 陕西天地印刷有限公司
规格 787mm×1092mm 16 开本
印张 14.5
字数 320 千字
版次 2014 年 6 月第 1 版
2014 年 6 月第 1 次印刷
书号 ISBN 978-7-5369-6067-1
定价 40.00 元

版权所有 翻印必究

(如有印装质量问题,请与我社发行部联系调换)

内容简介

随着西部大开发的进程,在西北黄土地区进行的机场工程建设越来越多,由此而引发的黄土高填方地基变形及稳定性问题备受学术界及工程界的重视。本书正是以此大环境为研究背景,对黄土高填方机场地基的变形时空规律进行了较为系统的研究。本书分别基于大量的原位监测试验,对黄土高填方的宏观沉降规律及其诱因进行了系统分析研究;开展了大量的室内高压固结试验和大尺度的蠕变试验,并基于土力学理论和流变学理论,对不同初始状态的填料土、原状黄土的固结、蠕变特性进行了系统的研究,提出了计算工后沉降的修正分析模型,并提取模型参数,将其应用于黄土高填方工后沉降规律的数值仿真分析中;为了更进一步揭示黄土高填方工后沉降分量及其形成机制,研发了室内“电阻率-压缩”联合测定试验装置,开展了不同初始状态的土电阻率-压缩试验,通过试验研究得出了土电阻率-应变-时间关系,提出了压缩试验中主、次固结(蠕变)的分离方法,并通过电阻率试验研究了土体中水分的迁移规律和结构的演化规律,从而从细观角度上探讨了黄土高填方的工后沉降形成机制;除此之外,本书还采用了回归分析、神经网络、工程类比等途径来研究黄土高填方机场的工后沉降规律,提出了基于实测的工后沉降缝递推分析方法,最后,对黄土高填方的特殊工程地质现象——土洞(暗穴)的扩展对机场道面影响的问题进行了初步研究,提出了相应的分析和评判方法。通过本书的系统研究,笔者希望能为类似工程的设计、施工和规范性文件的建立提供科学参考。

作者简介



朱才辉(1983年2月),汉族,陕西商南人。2006年毕业于西安理工大学土木工程专业,同年考入西安理工大学硕士生,师从土木建筑工程学院学科带头人李宁教授6年,取得了岩土工程专业硕士学位和博士学位。之后于2012年4月在西安理工大学土木建筑工程学院岩土工程研究所从事科研与教学工作,现在西安理工大学水利工程博士后流动站攻读在职博士后。研究工作涉及黄土力学与工程,西安地铁盾构施工诱发地层沉降及古建筑物变形分析,黄土高填方地基变形与稳定性分析,大型地下硐室和水工建筑物现场变形监测、超前地质预报、数值反演及支护结构优化分析等领域。参加与本专著相关的国家支撑课题(2013BAJ06B00)1项;主持与本专著相关的国家自然科学基金(51308456)和陕西省科技计划资助项目(2013JQ7022)各1项;主持和参与横向课题10余项;发表论文10余篇,其中EI检索8篇。



李宁(1959年11月),汉族,陕西西安人。1982年1月在西北农业大学水利系本科毕业,获学士学位;1982年1月~1984年12月在陕西机械学院水利系攻读硕士研究生;1989年3月~1992年2月,在奥地利 Innsbruck 大学攻读博士研究生;2000年5月任西安理工大学水电学院岩土工程研究所所长,2000年5月起任陕西省黄土力学与工程重点实验室主任,2006年7月起任西安理工大学水电学院党委书记,兼任中国岩石力学与工程学会常务理事、中国岩石力学与工程学会地面工程专业委员会副主任、陕西省岩石力学与工程学会理事长等。主要研究方向为:岩石力学与工程、冻土力学与工程。主要从事岩体动力学特性的试验研究与裂隙动力学数值仿真模型分析、寒区冻土力学与工程研究的教学和科研工作。发表学术论文200余篇,出版专著《Structure Dynamics – Recent Advance》《Wave Propagation Problems in the Jointed Rock Mass》《桩基础设计指南》《边坡工程——理论与实践最新发展》《岩土工程化学》等5部。获全国性的奖励2项,获省部级奖4项。

前 言

近年来,随着西部大开发的进程,在西北黄土地区进行的机场工程建设越来越多,由此而引发的黄土高填方地基沉降及稳定性问题备受学术界及工程技术人员的高度重视。黄土高填方的机场建设与一般填方有着本质的区别:其一,岩土介质是具有特殊结构性、水敏性和流变特性的新老黄土,其工程特性极为复杂;其二,填方高(超过 80m)、延伸面积大,原地基所受附加压力变化大,且建设前后原地基的水循环系统发生了改变,极易产生不均匀工后沉降;其三,其功能属于机场,故对填方顶面不同功能分区的工后沉降要求更严格,其控制标准及设计要求难以完全把握。由于无大量工程先例可借鉴,这对机场的“深挖高填”设计、施工控制性指标和工后沉降控制标准或规范的建立构成了巨大挑战。

根据大量黄土高路堤工程实例及笔者在山西某机场连续多年的现场监测实践经验表明:在地下水埋藏较深的深厚黄土高路堤或高填方的工程区域,其绝大部分沉降属于瞬时沉降,在施工期已经完成或者已完成 80%~90%,而工后沉降仅占总沉降的 10%~20%,其中主固结沉降基本在竣工后 3~6 个月内完成,占工后沉降总量的 60%~70%左右、次固结或蠕变沉降需要 1~3 年或更久的时间完成,且工后总沉降占填方高度的 0.5%~1.5%。可见工后沉降量在整个黄土高填方沉降中仍占据着不小的分量,这对机场土方平衡设计和工后期基础建设的影响不可忽略,故对高填方机场工后沉降深入研究具有重要意义。

虽然目前针对路堤的工后沉降问题研究已经取得了巨大的进步,但针对黄土高填方沉降规律的系统分析尚较少,尤其是对其工后沉降的宏观规律及其形成机制方面的深入研究不多。鉴于此,本书开展了以下四个方面的研究:一是在大量总结分析国内外关于机场高填方变形问题研究现状的基础上,围绕黄土高填方沉降的影响因素、沉降的宏观规律、细观形成机制及沉降数值分析等问题展开讨论,并提出研究中存在的不足和本书要解决的问题;二是以山西某黄土高填方机场试验段为依托,结合原位监测、室内高压固结和大尺度蠕变试验,分别从固结理论和蠕变理论角度来分析不同初始状态下填料及地基黄土的变形时效性,建立可以反映黄土长期变形效应的力学模型,并将其应用到实际工程中进行敏感性分析和数值反演分析,提出了比较适用的分析方法和设计控制标准;三是基于室内土电阻率-压缩试验,从土体的水分运移和土颗粒的演化机制上来进一步研究黄土体及高填方的沉降形成机制,从而为进一步认识黄土的变形时效性及高填方的工后沉降提供了新的思路和方法;四是采用回归分析、BP 神经网络、工程类比分析等常规方法对黄土高填方工后沉降进行了预测,提出了比较符合本工程实际的预测模型和基于实测的递推预测法;五是针对黄土高填方的特殊工程地质现象——土洞(暗穴)的扩展对机场道面影响的问题进行了初步研究,提出了相应的分析和评判方法手段。

由于笔者水平有限,书中难免会有错误和疏漏之处,但愿本书的出版能够起到“抛砖引玉”的作用,并希望得到读者和有关专家的批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景及问题的提出	1
1.2 高填方地基变形规律研究方法综述	2
1.2.1 高填方变形理论计算	2
1.2.2 高填方变形原位监测研究	4
1.2.3 高填方变形离心模型试验研究	5
1.2.4 高填方变形数值反演分析研究	6
1.2.5 高填方变形回归分析研究现状	10
1.3 黄土体宏观变形特性研究	12
1.3.1 黄土的结构性本构关系研究	12
1.3.2 黄土的固结特性研究	13
1.3.3 黄土的蠕变规律研究	18
1.4 黄土体的细观变形规律研究	21
1.4.1 土体的微观结构性研究	21
1.4.2 基于土体电阻率的细观变形研究现状及存在的问题	22
1.5 研究中存在的问题及主要研究技术路线	25
1.5.1 研究现状中存在的问题	25
1.5.2 主要研究工作及技术路线	26
第 2 章 黄土高填方机场地基工程问题及难点分析	28
2.1 黄土高填方的特殊工程问题——以山西某机场试验段为例	28
2.1.1 黄土地区机场工程的特殊性	28
2.1.2 黄土地区机场的岩土工程技术问题	29
2.1.3 基于“三面两体四水控制论”的岩土工程问题研究技术路线	30
2.2 机场高填方沉降机理及预测分析	32
2.2.1 高填方地基的宏观变形规律预分析	33
2.2.2 高填方地基的细观变形机理预分析	34
第 3 章 基于原位监测的黄土高填方工后沉降时空规律研究	36
3.1 山西某机场试验段工程概况	36
3.2 场区工程及水文地质条件	37
3.2.1 地形地貌条件	37
3.2.2 工程地质区域划分	37
3.2.3 气象、水文条件	38
3.2.4 地基土物理性质及力学性质指标	38

3.2.5	挖方区料源条件	41
3.3	试验段高填方设计与施工概况	41
3.4	高填方地基变形原位监测系统	43
3.4.1	监测目的	43
3.4.2	监测内容与监测点布置	43
3.4.3	监测仪器与监测频次和精度	46
3.5	监测结果分析与评价	48
3.5.1	道槽区填筑体顶面沉降监测	48
3.5.2	边坡坡面位移监测	51
3.5.3	道槽区填筑体内部变形监测	54
3.5.4	边坡区填筑体内部变形监测	55
3.5.5	填筑体内部土压力监测	59
3.6	高填方变形场及应力场时空规律分析	71
3.6.1	实测总沉降的分离及不均匀沉降原因分析	71
3.6.2	应力扩散引起的附加变形分析	75
3.6.3	填土高度及填土速率对工后沉降影响	82
3.6.4	综合压实度对填筑体工后沉降量的影响	84
3.6.5	基于应变速率的工后沉降递推法	85
3.7	基于修正“FDA”方法的工后沉降分析	86
3.7.1	问题的提出	86
3.7.2	加载阶段变形量的分离	87
3.7.3	工后沉降阶段变形量的分离	92
3.7.4	工程应用分析	95
3.8	基于沉降量-沉降速率曲线的工后沉降分析	97
3.8.1	$S_t' - S_t$ 曲线的线性关系证明	97
3.8.2	工程应用分析	102
第4章	基于室内蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律研究	105
4.1	蠕变试验方案及结果	105
4.1.1	蠕变试验装置	105
4.1.2	蠕变试验方案及结果	106
4.2	蠕变试验模型及蠕变参数的求取	107
4.2.1	$R - Q - \lambda$ 经验蠕变模型及参数的求取	107
4.2.2	$A - m - n$ 经验蠕变模型及参数的求取	109
4.2.3	Merchant 蠕变模型及参数的求取	110
4.2.4	Burgers 蠕变模型及参数的求取	112
4.2.5	$M - B$ 蠕变模型及参数的求取	113
4.3	黄土蠕变规律分析	115
4.3.1	不同含水率下压实黄土蠕变规律分析	116

4.3.2	不同压实度下压实黄土蠕变规律分析	121
4.3.3	原状黄土固结蠕变规律分析	125
4.4	基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降数值分析	127
4.4.1	数值反演分析研究存在的问题	127
4.4.2	“概化层”数值模型的建立及参数的选取	128
4.4.3	数值试验方案	130
4.4.4	工后沉降敏感性分析	130
4.4.5	基于实测的数值反演分析及预测	133
第 5 章	基于高压固结试验的黄土高填方工后沉降规律研究	137
5.1	高压固结试验方案	137
5.2	不同性状黄土次固结特性分析	138
5.2.1	不同含水率下黄土次固结特性分析	138
5.2.2	不同压实度下黄土次固结特性分析	142
5.2.3	原状黄土的次固结特性分析	143
5.2.4	考虑含水率和压实度变化的一维次固结模型	145
5.3	基于固结理论的高填方变形数值分析及预测	149
5.3.1	Biot 耦合固结理论及离散化有限元方程式	149
5.3.2	SSC 软土蠕变模型简介	152
5.3.3	反演分析模型及初始参数	154
5.3.4	反演结果分析	156
5.3.5	工后蠕变沉降分析	160
5.4	基于固结试验的工后蠕变沉降解析方法分析	161
5.4.1	基于“修正次固结系数”的工后沉降分析	161
5.4.2	基于“微元体模型”的工后蠕变沉降分析	162
5.4.3	考虑含水率变化的“修正模量”法工后增湿蠕变沉降分析	163
5.4.4	工程算例	165
第 6 章	机场高填方工后沉降的其他预测方法	170
6.1	基于回归分析法的工后沉降预测	170
6.2	基于人工神经网络的工后沉降预测	173
6.2.1	人工神经网络模型(BP)预测方法	173
6.2.2	人工神经网络模型预测结果	174
6.3	基于工程类比法的工后沉降预测	175
6.3.1	贵阳龙洞堡机场	175
6.3.2	云南大理机场	177
6.3.3	杜康沟车站西段高路堤	179
6.3.4	基于实测递推法预测	180
6.3.5	规范方法估算	181

第 7 章 基于土电阻率的黄土高填方细观变形机理研究	182
7.1 黄土结构性微观机理研究现状及存在的问题	182
7.2 研究内容及思路	183
7.3 试验装置及试验方案	184
7.4 基于电阻率特性的黄土变形规律分析	185
7.4.1 黄土电阻率与温度和含水率关系	186
7.4.2 黄土电阻率与压实度关系	187
7.4.3 黄土电阻率模型	187
7.4.4 黄土电阻率-应变-时间特性	188
7.4.5 黄土电阻率分布及水分迁移规律	192
7.4.6 工程实例分析	195
第 8 章 机场高填方地基中暗穴扩展对道面变形影响研究	198
8.1 黄土高填方暗穴成因及临界厚度	198
8.1.1 黄土高填方地基暗穴成因	198
8.1.2 暗穴抬升过程临界高度(垂直裂隙发育)	200
8.1.3 暗穴扩容过程临界高度(水敏性较强)	201
8.1.4 黄土暗穴临界高度影响因素分析	202
8.1.5 黄土暗穴塌陷过程稳定性案例分析	203
8.2 基于 3D-FEM 的道面响应分析	204
8.2.1 暗穴扩容对道面的影响	204
8.2.2 暗穴抬升对道面的影响	205
8.3 暗穴扩展对道面的破坏时间预测	206
8.3.1 压实黄土侵蚀性试验研究	206
8.3.2 基于室内试验的暗穴坍塌量分析	207
参考文献	209

第1章 绪论

1.1 研究背景及问题的提出

近年来,随着我国经济的飞速发展,基础设施建设异军突起,其中机场建设越来越多,客观上要求民用机场的建设要有与之相适应的发展水平。近20年来,我国新建、改扩建了一大批机场,使机场布局更趋合理,机场容量显著扩大,安全运行条件明显改善,服务水平也有较大提高。目前正在集中力量进行建设的有北京首都国际机场航站区扩建工程,新建上海浦东、海口、南昌、杭州机场,以及成都、乌鲁木齐、哈尔滨、厦门、深圳、昆明、兰州、喀什等机场改扩建工程,计划迁建广州机场、新建长春机场、汕头机场,扩建沈阳、宁波、济南、长沙、西安、大连、青岛、重庆等机场,另外,根据需求和可能,建设和改造部分中小城市和地面交通不便地区的支线机场。其中国际三大机场:北京首都、上海虹桥和广州白云三个国际机场集中了我国民航约40%的旅客量和50%的货物量,是我国民用航空运输的枢纽,也是民用机场建设的重点。

经济的快速发展和人们对交通需求的不断增长催生着机场建设,山西某机场正是在这样一个大背景下进行修建的黄土高填方机场。为了进一步挖掘该地区发展潜力,为该地区经济发展起到催化作用、架起与国内乃至世界发达地区的快速沟通桥梁,建设民用运输机场,无疑是一个较好的选择。目前,山西某机场建设已经列入中国民航总局《中国民用航空第十一个五年规划》。

山区机场都基本具有如下特点:①高填方,填方高度一般在30 m以上,最高可达100多m;②场区地质条件复杂,且高填方地基地部一般都分布有一定厚度的软弱土层,并且软弱土层厚度和分布极不均匀,因此,对软弱土层如不进行特殊的工程处理,必将导致严重的地基沉降与不均匀沉降,甚至危及高填方体的整体稳定;③气候条件差,机场建设施工气候条件恶劣,部分机场季节性冻土较为严重,工程施工期短,而机场高填方工程浩大,工程进度与工程质量间的矛盾十分突出,高填方体压实度很难保证,地基易产生不均匀沉降。山西某机场高填方最深处填方高度约为80m,这在国内尚属首次,高填方的设计施工难度极大,且没有相应的工程先例可类比,由此产生的一系列工程难题,在高填方工程中也比较罕见。本书正是在这样一个大背景下进行了相应的研究工作,其中,对于在西北黄土地区建设的机场,所在场区主要是剥蚀堆积的黄土丘陵区,冲沟发育,纵横切割,由黄土梁、峁组成丘陵地貌,都具有以下共同点:

(1)高填方和深挖方:这些机场多建于黄土梁上以减少占用耕地,但为满足场地条件和净空条件,机场建设势必进行深挖高填。

(2)场区地貌复杂:机场在建区域存在黄土沟谷地貌、黄土沟间地貌和黄土潜蚀地貌等,沟谷地貌多见沟壁陡峭,两侧多见崩塌堆积体,沟间地貌多有黄土梁和黄土峁,潜蚀

地貌多见黄土碟、黄土洞穴、黄土柱等。

(3)场区地质条件复杂:沟谷和坡体存在一定厚度的 Q_4 黄土坡积物和堆积体,再向下有 Q_3 、 Q_2 黄土及砂岩等,其中 Q_3 、 Q_4 黄土还具有一定的湿陷性。

(4)不良地质作用:主要有局部的滑坡、崩塌和黄土洞穴等作用。

由上述共性可见,西北地区的机场建设多地处于黄土丘陵地区,梁、峁及冲沟纵横交错,时有滑坡、洞穴分布,沟底到梁顶高差逾百米,土层成因多样,沉积年代和沉积环境各异。为了给机场制造一个运行平台,不得不进行深挖高填,从而进一步加剧了工程地质条件的复杂性。因此,不仅仅存在差异沉降、边坡稳定问题,而且可能因地形地貌的改变,使水文地质条件发生变化,如果处理不好,可能产生湿陷、冲刷、水毁等问题,应引起设计施工者的密切关注,由此将产生诸多工程问题需要解决,具体岩土工程问题如下:

(1)黄土地基的湿陷性及地基处理问题。

(2)黄土压(夯)实方法及其检测评价问题。

(3)土方工程优化设计问题。

(4)填方与挖方交接面的处理。

(5)土洞处理及暗穴扩展对道面的影响问题。

(6)坡面处理问题。

(7)工后沉降及差异沉降问题。

(8)信息化施工问题。

(9)工程环境与环境保护问题。

上述岩土工程问题是黄土地区高填方机场普遍存在的问题,但其中关于“工后沉降及差异沉降问题”和“土洞处理及暗穴扩展对道面的影响问题”是本书研究的重点所在。

1.2 高填方地基变形规律研究方法综述

1.2.1 高填方变形理论计算

通常,由附加应力引起的土基沉降,可用分层总和法来计算压缩层范围内的总沉降量,用太沙基固结理论来计算不同时间的沉降量。但是,对于填筑体的自身瞬时压缩变形和不同时间的压缩变形计算,尚无通行的方法。为此,有学者采用改进的分层总和法和非线性有限元法分析填筑体的变形等。刘宏^[1]通过对四川九寨黄龙机场高填方地基变形与稳定性的系统研究认为:高填方地基变形则是指由包括软弱土层在内的原地基土体所发生的变形和由人工填筑体压缩引起的变形两部分构成,提出了系统的高填方变形预测方法,但总的来说,路堤自身沉降的各种计算方法还处于探索阶段^[2]。根据土力学理论,土体的变形主要是其孔隙水、气体的排出及水和气相互作用、土颗粒发生弹塑性或黏弹塑性破坏的变形。实际上,工程中最为关注的是工后长期沉降问题,大量研究表明,路基大部分主固结沉降基本在施工期已完成,工后沉降主要表现为:未完全排出水分的缓慢固结和土体颗粒发生结构性恢复、滑移、破坏等缓慢的蠕变或次固结过程。关于地基沉降的理论计算方法主要有以下几种,见表 1.2.1-1 所示,而计算次固结或蠕变沉降的方法见表 1.2.1-2 所示。

表 1.2.1-1 地基沉降计算方法总结

计算方法	计算公式	说 明
分层 总和法	$s = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}} h_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha}{1 + e_1} \right)_i \bar{\sigma}_{zi} h_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \right)_i h_i$	利用室内压缩试验 $e-p$ 曲线确定压缩模量 E_s 和压缩系数 α
经验 系数法	$s = \sum_{i=1}^n m_s S_i$	m_s 为与土质有关的沉降计算经验系数, ΔS_i 各分层图的沉降值
考虑不 同时段 的影响	瞬时沉降量: $S_d = \frac{pb(1 - \mu^2)\omega}{E_0}$; 固结沉降量: $S_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha}{1 + e_1} \right)_i \bar{\sigma}_{zi} h_i$ 或 $S_c = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i \sigma_{li}}{1 + e_{li}} \right) \left[A + \frac{\sigma_{3i}}{\sigma_{li}} (1 - A) \right] h_i$; 次固结沉降量: $S_i = \sum_{i=1}^n \frac{C_{\alpha i}}{1 + e_{li}} \lg \left(\frac{t_2}{t_1} \right) h_i$; 总沉降量: $S = S_d + S_c + S_i$	A: 孔隙压力系数; S_d: 瞬时沉降量; S_c: 固结沉降量; S_i: 次固结沉降量; E_0: 变形模量; t_1、t_2 分别为排水固结所需时间及计算次固结所需时间; ω: 沉降影响系数, 与基础的刚度、形状和计算点的文职有关; b 为矩形基础宽度或圆形基础直径
考虑应 力历史 的影响	正常固结土 $P_0 = P_c$: $S = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} C_{ci} \lg \left(\frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{0i}} \right) ;$ 超固结土, 当 $P_0 + \Delta p \leq P_c$ 时: $S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} C_{ci} \lg \left(\frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{0i}} \right) ;$ 超固结土, 当 $P_0 + \Delta p > P_c$ 时: $S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} \left[C_{si} \lg \left(\frac{P_{ci}}{p_{0i}} \right) + C_{ci} \lg \left(\frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{0i}} \right) \right] ;$ 超固结土地基的总沉降量: $S = S_1 + S_2$; 欠固结土: $S_c = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} C_{ci} \lg \left(\frac{p_{0i} + \sum p_i}{p_{0i}} \right)$	P_{0i}: 第 i 分层的初始应力 P_{ci}: 第 i 分层的先期固结压力 C_{ci}: 第 i 分层的压缩指数 C_{si}: 第 i 分层的回弹指数 e_{0i}: 为第 i 分层的初始孔隙比 Δh_i: 为第 i 分层的厚度
三维弹 性理论	黄文熙: $S = \sum \left\{ \frac{1}{1 - 2\mu} \left[\frac{(1 + \mu)\sigma_z}{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z} - \mu \right] \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \Delta h \right\}$ 魏汝龙: $S = \sum \left\{ \frac{1 - \mu}{1 - 2\mu} \left[1 - \frac{\mu}{1 + \mu} \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sigma_z} \right] \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \Delta h \right\}$	μ : 土的泊松比

表 1.2.1-2 次固结沉降计算方法

代表学者	计算原理	计算公式
Crawford ^[3]	不同历时压缩试验图	
Bjermm ^[4]	等时 $e - \lg P$ 曲线	
殷建华 ^[5]	一维流变模型	$S_s = C_\alpha H \frac{\lg(t_2/t_1)}{1 + e_0}, C_\alpha$ 次固结系
Buisman, Leonards, Walker, L. K. Raymond G. P. ^[6-8]	析蠕变率与时间半对数的关系 (经验方法)	数, t_1 主固结完成时间, t_2 计算次固结 时间, H 土层厚度, e_0 初始孔隙比
布依斯曼 ^[9]	饱和黏土的时间与沉降 (经验关系式)	$S = \Delta\sigma H(\alpha_p + \alpha_r \lg(t))$, S 沉降量, H 土 层的起始厚度, $\Delta\sigma$ 荷载增量, α_p 主固结 系数, α_r 时间效应系数
Gibson and Lo ^[10]	结构的黏滞性被认为是线性	$S = \Delta\sigma'_z H \left[(a + b(1 + \exp(\frac{\lambda}{b}t))) \right]$
Mitchell ^[11]	线性应变与时间的经验关系式	$\varepsilon = a + (\frac{A}{1-m})t^{(1-m)}e^{ap} (m \neq 1)$, $\varepsilon = \varepsilon_1 + A \ln(t)e^{ap} (m = 1, t > 1)$
詹美礼等 ^[12]	提出了荷载增量作用下的次固结应变	$S_{\text{次}} = \frac{\Delta\sigma H[1 - e^{(-\eta\varepsilon)}]}{E_{\text{次}}}$, $E_{\text{次}}$ 次固结压缩 模量, η 次固结衰减指数

1.2.2 高填方变形原位监测研究

高填方地基原位监测试验的主要目的是为了获得地质体的水分场、应力场、变形场等数据,并用以研究地质体的空间状态与时间特性。试验一般由“内观”和“外观”两部分组成。“外观”主要是观测高填方地基的外形和相关部位的水平位移、垂直位移和倾斜位移等^[13-16]。“内观”主要观测高填方地基的土压力和孔隙水压力等,一般用土压力盒和渗压计观测。目前,国内的原位监测试验还处于以常规的大地测量为主,其他方法为辅,并逐步向自动化过渡^[17-20]。国外原位监测正向多媒体可视化的监测网络技术发展,它具有遥测、遥控、遥信、遥警和遥视(5 Remote)一体化功能。

高填方原位变形监测的目的是得到地基的沉降控制指标和工后沉降的预测,目前,系统原位监测结果较少,在非饱和和粗(巨)粒土的沉降计算上,仅有少数的经验公式^[21],如德国和日本的工后沉降计算公式(1.2.2-1),劳斯和列斯特公式(1.2.2-2),顾慰兹公式(1.2-3)。

$$S = H^2/3000 \tag{1.2.2-1}$$

$$S = 0.001H^{3/2} \tag{1.2.2-2}$$

$$S_t = kH^n e^{-m/t} \tag{1.2.2-3}$$

式中, $S(S_t)$ 为路堤的工后沉降量(m); H 为路堤高度(m); k 、 n 、 m 是经验系数,按表1.2.2-1取值。

表 1.2.2-1 顾慰兹经验系数取值

经验系数	k	n	m
面板坝	0.004331	1.2045	1.746
斜墙坝	0.0098	1.0148	1.4755
心墙坝	0.016	0.876	1.0932

谢春庆(2001 年)等^[22]对贵州龙洞堡机场和云南大理机场高填方地基沉降观测资料进行系统研究之后,提出了高填方地基工后沉降估算公式:

$$S = H^2 / \sqrt[3]{E^2} \tag{1.2.2-4}$$

式中, E 为地基土变形模量。

由于公式中仅考虑了填筑高度这一因素,而未考虑填料的变形模量和工程加载速率等因素,因此其结果是十分粗略甚至是危险的。如在龙洞堡机场和大理机场高填方地基沉降分析中,上式的计算值与实测值最大差值可达 10 倍以上,且差值随填筑体高度和变形模量的增大而增大。

1.2.3 高填方变形离心模型试验研究

我国早在 20 世纪 50 年代就了解到离心模型试验在模拟土工建筑物的性状和研究土力学基本理论等方面的良好作用。然而,真正着手土工离心模拟试验却是在 80 年代初,在清华大学黄文熙教授的倡导下,南京水利科学研究院与其他单位率先开展了土工离心模型试验工程应用研究,但当时的试验大都是将光弹离心机加以改装而进行的。之后,相继有长江科学院、河海大学、水利水电学研究院、上海铁道学院、清华大学逐步建立了自己的离心机并进行了大量的土工模型试验研究。我国已对小浪底斜墙及斜心墙堆石坝(坝高 154 m)、西北口混凝土面板堆石坝(坝高 95 m)、瀑布沟心墙堆石坝(坝高 188 m)、天生桥一级混凝土面板堆石坝(坝高 178 m)、三峡风化料深水高土石围堰(高 80 m)等工程进行了离心模型试验研究,取得了众多国际先进水平的科研成果。近几年来,很多学者采用土工离心模型试验方法解决了很多工程问题,具有代表性的如:胡黎明等^[23]为了解污染物在土壤中迁移的规律,利用 BTEX 模拟轻非水相污染物质,采用土工离心试验技术对 BTEX 在非饱和土和地下水系统的迁移过程进行模拟。得到了 BTEX 的时空分布特征和长期迁移规律。胡红蕊等^[24]以黄骅港北防波堤工程为依托,对土工织物加筋软黏土地基及斜坡式防波堤体系的固结过程进行了离心模型试验和有限元数值模拟,通过分析地基土体固结过程中防波堤—加筋垫层—基体系的位移场和应力场的发展及织物拉应力分布和发展,验证离心试验及数值模拟方法的合理性,并得出很多重要结论。胡再强等^[25]应用非饱和黄土的结构性模型,采用考虑渗流与变形耦合作用的方法,编制了能够模拟非饱和黄土结构性及湿陷性的平面有限元程序,并对非饱和结构性黄土渠道模型离心试验进行了有限元数值模拟。牟太平^[26]为了研究土坡的破坏过程并进一步探讨滑坡的机理,开发了土坡离心模型试验和测量技术以观测加载条件下土坡的变形过程。进行了自重加载情况下的土坡离心模型试验,观察了土坡的破坏过程并测量了土坡的位移场变化。杨俊杰^[27]通过对原型的模拟结果进行总结,得出对于承载力试验只要离心试

验中的模型基础宽度与重力场试验中的不同,离心模型试验结果总大于重力场试验结果,即离心试验中总是存在粒径效应问题。翁效林^[28]为了对强夯黄土地基震陷性进行较为直观合理的分析,基于离心模型试验定量评价了强夯黄土地基抗震性能。杨明等^[29]基于离心试验模型,采用数值模拟方法分析桩间土拱承载能力随桩宽度的变化规律。张敏等^[30]为了在离心机试验中模拟降雨引起的滑坡,设计和使用了一套降雨模拟系统,通过一个降雨条件下砂土边坡的离心模型试验,成功应用了该套降雨模拟系统,研究了边坡中的降雨入渗过程。刘悦等^[31]为了研究开挖和堆载对黄土边坡变形破坏特征的影响,采用原状黄土在离心机上模拟黄土边坡在开挖和堆载作用下的变形过程,得到了两种工况下黄土边坡的位移变化规律和破坏特征。潘宗俊、刘庆成为研究压实黄土土一水特征曲线,采用离心机对不同压实度黄土进行脱水试验,得出不同压实度黄土土一水特征曲线的变化规律。郭永建等^[32]针对在软弱地基上进行路堤的拓宽工程中出现不均匀沉降的问题,利用离心模型试验进行不同工况分析。

从以上土工离心模型试验研究现状中可以看出,离心模型试验可以作为研究非饱和黄土有效技术手段之一,从而为工程的设计与施工提供可靠的依据,但是,在以往的研究中,尚无完全采用原状黄土制作模型进行土工离心试验,数据的采集难度也很大,尤其是采用非饱和原状黄土进行大型土工离心试验更是困难重重,然而,将结构性黄土重塑进行试验的效果存在很多不理想之处。因此,有必要研究采用原状土进行大型离心试验的相关技术,开发一整套非饱和土离心试验数据采集系统。从而,为非饱和黄土的理论研究打下坚实的基础。

1.2.4 高填方变形数值反演分析研究

地基沉降计算的另一种方法就是数值分析方法,常用的数值分析方法有:有限单元法(Finite Element Method 简称 FEM)、边界单元法(Boundary Element Method 简称 BEM)、有限差分法(Finite Difference Method 简称 FDM)、离散单元法(Distinct Element Method 简称 DEM)和快速拉格朗日差分分析法(Fast Lagrangian Analysis of Continua 简称 FLAC)。目前应用于地基沉降计算的数值分析方法主要有差分法和有限元法。

(1) 差分法

太沙基建立的饱和土体一维固结基本微分方程,是在一定的初始条件和边界条件下获得的。因此太沙基固结理论研究的只是一维固结中一种简单而特殊的情况。实际中,若边界条件复杂或多维固结问题时,固结方程的解析解是很难得到的,常用差分法数值求解。差分法求解土工问题就是将研究区域用差分网格离散,对每一个节点通过筹商代替导数把问题的微分方程转化为差分方程,然后结合初始条件和边界条件,求解线性方程组得到课题的数值解。

(2) 有限元法

有限元法计算路堤沉降时,将地基和结构作为一个整体来分析,将其划分网格,形成离散体结构,在荷载作用算得任一时刻地基和结构各点的位移和应力。其中基础底面的竖向位移就是所要求的沉降。它可以考虑土体应力应变关系的非线性特性,也可以考虑应力历史对变形的影响,若应力低于或高于前期固结应力,则采用不同的弹性模量计算;

还可以考虑土与结构的共同作用,考虑复杂的边界条件,考虑施工逐级加荷,考虑土层的各向异性等。有限元法对土体的固结计算,可以用 Biot 三维固结理论,避免了一维固结计算的许多弊端^[33]。

由于科学发展水平有限,目前人们对土体固结压缩过程的微观认识仍不充分和完全,基于固结理论建立的本构模型存在着理论上无法克服的缺陷。同时,有限单元法和其他数值方法都依赖于计算参数的准确性,然而这些参数需要借助室内试验获得。由于土样在取土、运输过程中的扰动,现场和试验两者边界条件的差异,以及地基土分布的不均匀,由室内试验测定的参数往往与实际值存在差异。因此理论方法计算的沉降值往往与实测值出入较大。

对于土石坝和高填方地基,沈珠江^[34]根据鲁布革堆石坝的沉降观测资料和试验结果,建立南水模型并对大坝沉降进行了反馈分析,周虎鑫^[35]用 8 节点有限元对大理机场石渣填筑体工后沉降进行了分析。此外,国内外的研究者还发展了随机有限元进行沉降概率分析,如 Baecker 和 Ingra^[36]、Righetti 和 Williams、Phoo 和 Ouck 等人运用 Taylor 展开法随机有限元探讨了沉降的概率计算方法,Quek 和 Chow 运用摄动随机有限元对沉降进行了分析,Brakala 和 Pula^[37]将纽曼级数展开式与 Monte - Carlo 随机有限元法相结合进行了研究。

刘奉银等^[38]的黄土高填方路堤沉降分析,采用 4 种条件(层重固结法、层重未固结法,孔隙水压力求孔压系数法、孔隙气压力求孔压系数法)下的最终沉降计算方法,和简化的考虑施工加载过程的非饱和土一维固结方法,对某公路高路堤的沉降进行计算分析,并与实测资料相比较。结果表明:公路路堤各土层在自重作用下固结已经完成,甚至有超固结,简化的非饱和土一维固结计算方法可以满足计算精度的要求。

马南飞^[39]以浙江某高速公路为研究背景,对路基关键部位的竖向沉降进行了现场监测,得到了软土路基的变形的初步规律,然后采用 FLAC - 3D 软件中的软土黏塑性蠕变本构模型,对其蠕变沉降规律进行了数值模拟。计算表明,黏塑性蠕变本构模型可以较好地模拟软土路基变形问题,可将该模型用于软土路基沉降计算及预测预报,为软土路基沉降控制提供重要的理论依据。陈国荣等^[40]根据施工期实测资料,采用黏弹性有限元和非线性二乘法阻尼优化方法,反演了路基土体的地质力学参数,然后计算路面铺筑后的工后沉降,编制了有限元正反分析程序,并对沪宁高速公路某路段进行了反分析计算,得到了令人满意的结果。

孔令伟等^[41]通过建立反分析模型,提出强夯后地基土变形模量的确定方法,即可根据计算所得的夯沉量随变形模量变化的关系曲线,运用单值反分析法,以达到夯实效果时的单井夯沉量来确定,进而结合载荷实验的基本理论,按相对沉降法预测夯后地基土的容许承载力。大量反演计算实例表明,所得结果精度满足工程要求,可靠性也较高,为预测强夯加固效果、检验原设计的合理性和改进强夯设计方案提供了一种新的分析途径。

苏超^[42]成功地将地基参数反分析方法应用到锡澄 - 沪宁高速公路工程。谭昌明等^[43-44]采用直接反分析法对土体双曲线本构模型参数 K_f 的反演进行了研究,确定实现这些参数反演时所要满足的条件。通过一填土算例分析探讨了观测信息对参数反演结