

湿陷性黄土高填方 地基处理技术及其边坡稳定性

梅 源 著
胡长明

COLLAPSIBLE LOESS
FOUNDATION TREATMENT
SLOPE STABILITY
CENTRIFUGAL MODEL TEST

中国建筑工程出版社

国家自然科学基金青年科学基金项目 (51408463); 陕西省自然科学基金基础研究计划青年人才项目 (2016JQ5091); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (15JK1413); 西安建筑科技大学科技基金资助项目 (QN1409); 西安建筑科技大学科技计划项目 (RC1375) 联合赞助

湿陷性黄土高填方地基处理技术 及其边坡稳定性

梅 源 胡长明 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

湿陷性黄土高填方地基处理技术及其边坡稳定性/
梅源, 胡长明著. —北京: 中国建筑工业出版社,
2016. 8

ISBN 978-7-112-19602-9

I. ①湿… II. ①梅… ②胡… III. ①湿陷性黄土-
地基处理-研究②湿陷性黄土-地基-边坡稳定性-研究
IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 157581 号

本书通过系统总结国内外关于湿陷性黄土高填方地基变形及稳定性的研究成果, 围绕湿陷性地基的加固处理、黄土压实、压实黄土的变形及强度特性、高边坡变形模式及稳定性、深基坑填方地基变形规律等关键问题, 依托典型工程开展了以下内容的研究: 湿陷性黄土高填方地基处理技术及其边坡稳定性研究发展动态, 湿陷性黄土高填方地基稳定性离心模型试验研究, 深厚湿陷性黄土地基处理技术的试验研究, 马兰黄土压实填筑工艺的试验研究, 压实马兰黄土变形与抗剪强度特性, 机场场区工程地质分析与综合评价, 机场场区高边坡稳定性数值分析以及结论和展望。

本书可作为水利、土建、岩土、地质等专业教师、研究生阅读用书, 亦可作为相关科研和工程技术人员的参考用书。

责任编辑: 王华月 岳建光

责任设计: 李志立

责任校对: 王宇枢 关 健

湿陷性黄土高填方地基处理技术及其边坡稳定性

梅 源 胡长明 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8½ 字数: 207 千字

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-19602-9

(29117)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

作者简介

梅源，男，1983年6月生，西安建筑科技大学土木工程学院讲师，博士，主要从事岩土工程及土木工程施工方向的教学和研究工作。发表学术论文30余篇，获准国家专利10余项，主持国家自然科学基金1项，省部级科研项目1项，厅局级项目3项，完成横向课题10余项；获省部级科技进步一等奖1项，陕西高等学校科学技术二等奖1项、西安建筑科技大学科技进步奖1项、西安建筑科技大学校专利奖2项。



胡长明，男，1963年7月生，西安建筑科技大学土木工程学院教授。兼任中国建筑学会工程建设学术委员会理事、陕西省土木建筑学会建设质量安全分会副理事长、陕西省土木建筑学会建筑施工专业委员会副主任委员。主要从事岩土工程及土木工程建造与管理等领域的教学和研究工作，作为项目的负责人完成工程项目几十项。近年来，主持国家自然科学基金一项，省部级纵向科研项目6项，完成横向课题多项。已在国内外专业核心期刊及重要学术会议上发表论文100余篇，主编或参编著作10余部，获准专利20余项，软件著作权登记一项。



前 言

近年来,西部机场、能源、铁路、公路等重点项目随着国家经济的快速发展及西部大开发战略的实施而进入快速建设阶段。土地资源的日益紧张与建设用地大规模需求之间的矛盾日益突出。西部山区荒坡荒山的开发趋势越来越明显,大量的黄土高填方工程涌现出来。黄土在世界范围内分布很广,属于非饱和土,由于非饱和土理论不成熟,在黄土高填方固结变形分析过程中,有学者认为可将非饱和黄土当成干土或者是饱和土来研究分析,并采用饱和土或者干土的基本假设分析黄土高填方的固结变形,这显然是不合理的。采用这种方法分析问题得到的结果只能是近似解,且误差较大,往往不能正确指导工程的设计与施工。事实上,真正意义的饱和土是不存在的,饱和土只是非饱和土的一个特殊种类。正是由于国内外对非饱和土理论研究不到位,对非饱和土高填方工程没有系统深入的认识,才导致黄土高填方地基因工后沉降过大以致失稳的现象屡屡发生,给社会带来巨大的经济损失。随着经济的快速发展,高填方工程填方高度高、填方量大、工期紧的特点越来越显著,有些工程的填方高度可达100m以上。填方地基虽然在施工阶段已经基本完成主固结变形,但工程竣工后由于高自重应力造成的工后固结变形将会持续几年或者是几十年。分析国内外学者关于非饱和土高填方沉降变形的大量研究成果可以发现:高填方地基沉降变形的影响因素有很多,其中填方体压实不到位、地基处置不当、压实机具使用不科学、填筑材料选择不合理等因素均会超出高填方地基的差异沉降,严重时将会缩短工程寿命。大量研究成果表明:改变高填方土体的工程特性可有效减少地基的沉降变形,常用的方法包括改变土体颗粒组成及增加土体压实度等。因此,要达到上述目的,则需要人为压实高填方体,使其合理固结。然而,非饱和土渗透性和黏滞性、弹性、强度、塑性等物理力学性质相互制约,其具有各自的特性,又共同存在于统一的土体中,这种特性给工程的设计和施工带来很大困难。因此,工程界一直力求解决的重点课题之一就是黄土高填方地基工后沉降的控制及固结变形的准确分析。

目前研究非饱和黄土地基内部受力方式、固结变形大小都采用传统理论,但其真实的稳定性和使用性能尚需进一步研究。西部黄土地区高填方工程大量涌现。随之而来的工程问题也越来越多,其核心问题主要集中于以下几点:

(1) 由于非饱和土理论还不成熟,至今在分析超高黄土填方体固结变形时仍部分沿用饱和土的基本假设,同时,也缺乏公认的、能正确反映黄土高填方体力学特性的本构关系模型,因此,所得到的有关问题的解答只能是近似的,存在较大误差,无法较为准确地计算和分析高填方体变形及由差异变形造成的裂缝。

(2) 黄土填筑体的压实工艺不合理,难以满足工程成本及工期要求。

(3) 超高黄土填方地基稳定性评价体系不完善,对复杂病害环境下(滑坡、崩塌、黄土洞穴)高填方地基稳定性问题认识不足,缺乏经济且可靠的处理技术及安全评价方法。

(4) 黄土高填方地基设计和施工存在一定的盲目性,目前还没有有关高填方地基的国

家或行业标准。

与此同时，由于黄土山区地貌单元类型较多，地形起伏大，需要深挖或者高填的区域较多，黄土的厚度不一，差别较大，场地湿陷程度不同，湿陷类型较多，场地内不良地质作用显著，导致黄土山区高填方工程面临的问题较大，且相对复杂，主要存在的问题包括：

(1) 由于黄土场地湿陷等级不同，湿陷类型较多，导致地基处理不能按统一的方法或者参数施工，给工程带来很大困难。

(2) 湿陷性黄土山区，崩塌较为发育，洞穴数量多且极为发育。黄土洞穴不但能够对塬畔、梁峁分割蚕食以加剧沟蚀发展，而且能够直接造成土壤物质的流失，除此之外，因其发育常伴随重力作用，一定程度上造成了地质环境的改变和严重的水土流失。黄土洞穴作为一种外部营力作用塑造了黄土高原的地貌，黄土的地质地貌环境因洞穴独特的作用方式而时刻发生改变，对黄土山区的各种工程设施形成了巨大的潜在危害。

(3) 黄土天然地基因填筑体上部巨大的附加荷载作用产生了很大的沉降变形，同时，在自重应力下高填方填筑体的水平变形或压缩变形和沉降周期较长，且不易控制。

(4) 场地内由于深挖或者高填方而产生大量的人工地基，这些人工地基的稳定性问题是工程中需要解决的关键问题。

本文依托典型工程，对湿陷性黄土高填方地基变形规律及稳定性开展试验和理论研究，研究成果对类似工程具有借鉴意义，为工程设计施工提供科学指导及参考性建议。

目 录

第一章 湿陷性黄土高填方地基处理技术及其边坡稳定性研究发展动态	1
第一节 非饱和土的固结理论	1
第二节 黄土本构关系模型	5
第三节 原状黄土土工试验技术	6
第四节 离心模型试验研究	7
第五节 地基变形预测方法	9
第六节 高填方地基沉降变形控制技术	11
参考文献	12
第二章 湿陷性黄土高填方地基稳定性离心模型试验研究	17
第一节 离心模型试验技术	17
第二节 离心模型试验基本原理	23
第三节 试验设备及基本要求	24
第四节 原状黄土大型离心模型试验的难点及基本步骤	26
第五节 高贴坡变形模式和稳定性的离心模型试验	28
第六节 高贴坡合理坡度数值分析	38
第七节 深壑填方地基变形规律的离心模型试验	53
第八节 本章小结	60
参考文献	61
第三章 深厚湿陷性黄土地基处理技术的试验研究	63
第一节 试验区概况	63
第二节 素土挤密桩加固地基试验	65
第三节 碎石桩加固地基试验	68
第四节 强夯加固地基试验	71
第五节 本章小结	79
参考文献	79
第四章 马兰黄土压实填筑工艺的试验研究	82
第一节 击实试验	82
第二节 现场压实试验	83
第三节 压实马兰黄土物理力学指标设计建议值	88
第四节 本章小结	88
参考文献	89
第五章 压实马兰黄土变形与抗剪强度特性	90
第一节 初始压实度及初始含水率对抗剪强度的影响	91

第二节 初始压实度及初始含水率对压缩变形的影响 93

第三节 初始压实度及初始含水率与割线模量的关系 95

第四节 压实马兰黄土填筑地基变形修正公式 98

第五节 本章小结 99

参考文献 99

第六章 机场场区工程地质分析与综合评价 101

第一节 场区概况 101

第二节 场区工程地质条件及工程地质问题 103

第三节 场地工程地质分析与评价 108

第四节 本章小结 113

第七章 机场场区高边坡稳定性数值分析 115

第一节 强度折减有限元法原理 115

第二节 场区边坡稳定计算及分析 119

第三节 本章小结 124

第八章 结论及展望 125

第一节 结论 125

第二节 展望 127

第一章 湿陷性黄土高填方地基处理技术 及其边坡稳定性研究发展动态

第一节 非饱和土的固结理论

工程中常常会遇到非饱和土的固结问题,其研究的主要内容包括孔隙气压力和孔隙水压力随时间增长而消散以及随土体变形而变化的规律,由于建立同时适用于不同类型土的固结方程是一个复杂的过程,因此,很多学者只是解答了某种特定的非饱和土的固结问题。

国外研究非饱和土固结问题始于二十世纪六十年代,比较有代表性的有 Scott, R. F.^[1] (1963 年), Barden L.^[2] (1965 年), Lioret A.^[3] (1980 年), Fredlund D. G.^[4] (1982 年) 等人建立的非饱和土固结方程,其中以 Fredlund 的固结理论最为流行。Hasan 和 Fredlund 认为非饱和土为四相系,将有争议的非饱和土有效应力原理放弃,采用吸力和外加应力这两个独立的应力状态变量代之,以建立非饱和土各相的体应变本构方程,虽然 Fredlund 的固结理论所具有的缺点与 Terzaghi 固结理论类似,即假定总应力在固结过程中不变,采用了过多的与实际情况不大相符的简化假设导出孔隙压力消散方程,测定本构方程中参数很困难,但同时也推广了 Terzaghi 固结理论。Blight^[5] (1961 年) 采用将压力梯度与质量传递联系起来的 Fick 扩散定律推导出干硬状非饱和土气相的固结方程。Barden^[6] (1965 年, 1974 年) 分析了压实非饱和黏土的一维固结问题,将液相和气相的流动用 Darcy 定律描述,进行了土的不同饱和度的若干种独立分析,但这些分析具有不确定性,这是因为不了解对非饱和土本构关系和应力状态。Fredlund 和 Hasan^[7] (1979 年) 提出非饱和土固结过程的孔隙水压力和孔隙气压力的求解方法,该方法采用了 2 个偏微分方程,通常被称为两相流方法, Fredlund 和 Hasan 的公式可以在饱和与非饱和两种情况之间过渡,且形式上类似于传统的 Terzaghi 一维公式。Lloret 和 Alonso (1980 年) 结合渗水渗气的 Darcy 定律及连续方程组成封闭方程,以状态面代替本构方程求解了非饱和土的固结和一维入渗时的湿陷问题和膨胀问题,虽然模型没有参数化,不便于应用,但拓宽了非饱和土固结的内涵。Alonso 和 Lioret^[8] (1981 年) 也曾根据研究结果提出过类似的非饱和土固结方程。Duncan 和 Chang^[9] (1983 年) 针对非饱和土的弹塑性固结问题也开展了深入的研究,但是由于他们研究的土中气处于封闭状态,且将气和水视为混合流体,因此,他们研究的对象接近饱和土,且表达的理论体系不够严谨。Dakshanamurthy^[10] (1984 年) 等人联立平衡方程和连续方程求解,延伸非饱和土的固结理论至三维的情况。Rahardjo^[11] (1990 年) 特别设计了 K_0 圆筒仪,并采用该圆筒仪开展了非饱和粉砂一维固结试验,试验结果表明试样的超孔隙水压力的消散是随时间进行的过程,超孔隙气压力基

本上是瞬时消散的,且可采用流体偏微分方程近似模拟这个过程。1979年,Fredlund教授提出了非饱和土一维固结理论,他在1993年出版的《非饱和土土力学》一书中又推导出了非饱和土三维固结控制方程组,该方程组包含5个独立变量的。Kitamura^[12](1996年)从微观角度考虑,应用概率论理论建立了非饱和土固结本构模型,并基于概率统计的方法,得到了非饱和状态时土的含水量、孔隙率、吸力值以及饱和-非饱和渗透系数等,在这个本构模型中,管直径和倾角的分布可采用概率密度函数来表示,与此同时,他还采用数值方法模拟非饱和土一维固结过程,并将土工试验结果与数值模拟结果进行比较,从而证明了假设模型的可靠性。Wong Tai T^[13](1998年)采用数值方法对非饱和土耦合的固结问题进行了研究,介绍了非饱和土固结理论中耦合公式的数值应用,分析非饱和-饱和土的固结问题时可采用该耦合固结模型。Loret, Benjamin^[14](2000年)在三相介质中应用混合物理论,建立了非饱和土的三维本构关系模型,同时建立了非饱和土弹-塑性和弹性本构方程,该本构方程直接包含了土-水特征曲线,要求的材料参数最少,但吸力及有效应力的耦合和有效应力的确定对公式影响较大,许多种类的土在试验过程中观察到的固结特征都可以采用该模型描述。Saix C^[15](2000年)介绍了非饱和黏质粉砂固结过程中表现出的热力学耦合作用,在其研究过程中,这种耦合作用(与总竖向应力有关)是通过与固结力学特性(与热有关)有关的温度影响来分析的,同时,他还通过力学固结和热固结两种试验来证明耦合作用对土体固结的影响。Loret, Benjamin^[16](2002年)提出了一种弹塑性模型,该模型可以用来分析非饱和多孔介质的有效应力。Ausilio E^[17](2002年)分析了非饱和土在基质吸力或外荷载增加的情况下的一维固结问题,采用了由Conte和Ausilio提出的简单方程,考虑了由Fredlund和Rahardjo进行的粉砂试验结果,把非饱和土平均固结度与沉降速率联系起来,着重论述了应用太沙基经典理论预测非饱和地基的沉降速率问题。Conte^[18](2004年)利用Dakshanamurthy的公式,分别采用Hankel变换和傅立叶变换对轴对称问题及对平面应变问题,分析非饱和土的固结问题。Conte^[19](2006年)延伸研究了不耦合和耦合非饱和土的固结问题,比较和分析了对轴向对称荷载条件以及平面应变考虑水、气不耦合和耦合对非饱和土的固结特性的影响。

近年来,国内在非饱和土固结理论的研究中取得了很大的进展。岩土工程研究领域非饱和土固结理论是二十世纪九十年代研究的热点问题,陈正汉^[20](1989年,1991年)、杨代泉^[21](1992年)和殷宗泽^[22](1998年)曾先后对非饱和土的固结理论开展了深入的研究,他们各自独立地提出了自己的研究结论,其中,陈正汉和杨代泉的研究结论可涵盖饱和土的固结理论,且都适用于水、气各自连通的非饱和土,推动了非饱和土力学原理的发展,使其可以解决一些工程问题。殷宗泽和孙长龙的理论适用于气封闭的非饱和土。路志平^[23](1987年)采用三轴仪对气封闭状态非饱和土的体变、孔压(孔隙气压=孔隙水压)、强度以及非线性本构关系进行了系统的研究。陈正汉^[24](1991年)运用混合物理论对非饱和土的固结理论进行了深入的研究,建立了非饱和土固结的混合物理论,其非饱和土固结理论是用公理化方法建立的,并以岩土力学的公理化理论体系为基础,是一个完整的理论体系,也是对土力学理论的创新,其理论用全量形式给出是在1989年,不久改用增量形式给出,其一维问题的解析解和增量控制方程组(即数学模型)发表于第7届国际岩土力学中计算机方法与发展会议(1991年5月召开)。1993年,该理论的比

较完整的成果（详细的建模过程、一维问题解析解和二维问题的有限元分析）在《应用数学和力学》中、英文版同时发表，此项工作的研究成果还先后于1992年和1995年报道于国内和国际学术会议上。杨代泉^[25]（1990年）根据水、气各自连通的非饱和土的非线性本构模型建立了包括湿陷、湿胀和热运动的非饱和土的广义固结理论。殷宗泽在简化非饱和土三维固结理论的基础上，建立了非饱和土的二维固结理论。除以上研究成果以外，国内还有很多学者深入研究和探讨非饱和土的固结问题，比较典型的包括：苗天德（1990年）基于突变理论，别具特色的对非饱和土的湿陷问题进行了研究；杨代泉、沈珠江（1992年）系统研究了非饱和土一维、二维固结问题，并针对实际工程问题提出了一些解决方法；沈珠江（1995~1996年）建立了许多有关非饱和土的变形模型；刘祖典和董思远（1992年）研究了湿陷性非饱和土；卢延浩（1996年）探讨了非饱和土三维固结问题；包承纲（1998年）研究了非饱和土饱和度和孔压消散系数在其固结过程中的关系；缪林昌（1999年）将膨胀土的吸力分别以饱和度和含水量代替，开展了很好的研究工作。

陈正汉在其增量型固结理论中使用了多孔介质的有效应力公式，该公式不适用于描述具有湿陷性土类的湿陷变形，且仅对线性变形成立，若在其固结理论中引入非饱和土的改进的Alonso弹塑性模型和非线性本构关系，就可得到非饱和土的弹塑性固结模型和非线性固结模型。另外，他还在其本构原理指导下，以混合物理论的场方程为基本框架，建立本构方程为补充方程，方便了模拟施工过程及考虑土的非线性应力—应变关系，建立了在不计水蒸发、气溶解和热效应条件下的非饱和土固结物理数学模型，非饱和土的渗水、渗气、应力、变形耦合效应在该模型种得以体现；此外，陈正汉还借用Laplace变换求得非饱和土的一维固结理论解，同时从控制方程中直接解出了孔隙气压力、孔隙水压力和土的竖向位移增量，并给出了非饱和土的瞬时沉降和固结沉降，定义了综合反映非饱和土基本特性（饱和度、压缩性、渗水性、密度、吸力和渗气性）的固结度和固结系数。陈正汉（2001年）等在建立的非饱和土固结理论中引入了改进的饱和土弹塑性模型（Alonso等人提出）及非饱和土的增量非线性本构模型，得到了非饱和土的弹塑性固结模型和非线性固结模型，并在此基础上设计了计算程序，求解了在分级加载条件下的地基塑性区动态和固结过程，从而使非饱和土固结问题的研究进入了一个新的发展阶段。卢再华^[26]（2001年）研究了非饱和膨胀土的固结模型与弹塑性损伤本构模型，首次给出了在蒸发和多次降雨入渗条件下的非饱和膨胀土坡损伤场变化。杨代泉用水气渗流的Darcy定律、水气连续方程、热量守恒方程、土骨架的平衡方程、吸力状态方程等19个方程求得19个未知量，并求得了与数值解具有一致性简化的解析解；他还就Fredlund关于非饱和土加载瞬时不排气、不排水分析方法中存在的问题进行了研究，提出用土在加载后的体变增量方程、水气连续方程和吸力方程作为封闭方程，从而得到了非饱和土的固结起始条件。沈珠江^[27]（2003年）假设孔隙气的排气率等于常量，提出了非饱和土的简化固结理论，并将此简化固结理论应用于裂隙黏土中雨水入渗过程的数值模拟与分析中，得出了土体有效应力降低、吸力丧失和膨胀回弹的全过程，计算结果合理可靠，但需进一步研究孔隙气排气量的设定问题。陈正汉^[28]（2004年）研制出国内第一台非饱和土固结仪和第一台非饱和土直剪仪，做了三组直剪试验和两组固结试验，对原状黄土的变形、强度和水量变化特性取得了一些初步认识。李顺群^[29]等（2006年）针对 K_0 固结状态的单向加载条件建立了非饱和

土的一维弹性本构模型。将这一模型与分层总和法相结合,可以计算基质吸力变化时土的竖向变形。从而可以用于非饱和土地基基础的沉降估算。邓刚、沈珠江、杨代泉等^[30] (2006年)基于孔隙气压力等于大气压力的假定,建议了针对非饱和土的简化固结理论。凌华、殷宗泽等^[31,32] (2007年)先后提出了非饱和土一、二、三维固结方程简化的计算方法。曹雪山、殷宗泽等^[33] (2008年)提出了非饱和土受压变形的简化计算方法,他们的研究对于促进非饱和土固结变形计算走向实用化,具有重要的工程意义。曹雪山、殷宗泽^[34] (2009年)对于较高饱和度的非饱和土,通过将孔隙中水、气看作一种混合介质的简化的固结过程,提出了改进的计算方法;同年,曹雪山、殷宗泽又提出了研究心墙水力劈裂问题的非饱和土固结简化计算的有效应力分析方法。国内研究者对非饱和土力学性质的研究使得黄土高填方沉降问题采用非饱和土固结理论加以解决成为可能。尽管目前还需解决非饱和土,尤其是非饱和黄土许多理论和实践问题,但作为传统土力学的延伸和补充的非饱和土土力学已经得到蓬勃发展,并开始逐渐应用于工程实践。随着近几年计算机和有限元应用技术的快速发展,研究人员将复杂的土工计算问题编制成有限元程序,并通过大量的计算机运算,从而得到土体沉降变形较为准确的数值解。这有利于提高高填方工程的使用性能,有利于人们对高填方地基的沉降变形的准确控制和合理设计,随着科技的进步,高填方系统科技含量也得到了进一步提高。

通过分析国内外非饱和土固结理论的研究现状可以看出,非饱和土固结完整理论的建立困难在于几个方面:

(1) 对于非饱和土而言,土体中所含的气体具有高压缩性,且部分气体溶解于水中,严格的连续条件很难得到满足,不能以土体变形连续作为基本假设;

(2) 非饱和土的渗透系数测量困难,其原因非饱和土的渗透性包括透水性和透气性,其渗透性与含水量和基质吸力关系密切,在非饱和土由湿到干和由干到湿的循环过程中,渗透性不一样的土体,含水量可以相同,即含水量与渗透性不是单值函数关系;

(3) 非饱和土的有效应力原理和有效应力参量的适用范围较窄,且不易确定有效应力公式中含有与基质吸力有关的参量;

(4) Fredlund 称之为第四相的非饱和土的水气接触对非饱和土行为的影响仍不完全清楚,水气接触是一个复杂的物理——化学界面,开展系统的研究具有很大困难。

(5) 非饱和土尚未有公认本构模型。

由于非饱和土的研究还存在诸多困难,近年来,岩土界研究非饱和土,尤其是非饱和黄土高填方系统存在的主要问题如下:

(1) 计算土体沉降变形时没有考虑结构性黄土的土拱效应,且大多情况下仍然采用分层总和法,地基工后差异沉降及施工期沉降的计算误差较大,对实测结果与沉降变形分析不符,满足不了实际工程的需要;

(2) 在土体沉降变形的分析中,将会不可避免的涉及外荷的计算、土体试验参数的选用、土体固结度的计算、土中应力的计算以及土体变形的计算等许多相互影响的环节,且这些环节相互关系不是确定不变的,而是随时间不断地发生变化,所以准确地进行分析存在相当大的困难。

因此,成熟的非饱和黄土固结理论建立将是一个漫长的过程。尽管研究过程中存在诸

多的困难,却丝毫不影响国内外学者对该领域的研究兴趣。

第二节 黄土本构关系模型

由于黄土分布随机和结构非连续性,作为天然地质材料,在力学性能上一般表现出弹塑性、非线性、各向异性、流变性和非均质性,具有十分复杂的应力—应变关系,其应力历史、应力水平和应力路径与其特性直接相关,同时,土的状态、组成、结构等也是其特性的重要影响因素。近年来,不少学者对湿陷性黄土的本构关系模型,在前人的基础上,进行了大量的研究。

黄义、张引科^[35] (2003) 以混合物理论为基础建立了非饱和土非线性本构方程和场方程,把非饱和土作为 3 种组分构成的饱和混合物来研究,首先根据土力学成果提出了非饱和土混合物的基本假设,推导出适用于非饱和土混合物的熵不等式,然后采用混合物理论处理本构问题的常规方法得出了非饱和土非线性本构方程,最后把非线性本构方程代入混合物组分动量守恒定律,获得了非饱和土各组分运动的非线性场方程,并且给出了非饱和土混合物的能量守恒方程,从而形成了解决非饱和土混合物热力学过程的完备方程组,通过对非饱和土非线性本构方程和场方程的线性化,推导出了非饱和土的线性本构方程和场方程。胡再强、沈珠江、谢定义^[36] (2005 年) 应用充分扰动饱和黏土的稳定孔隙比和稳定状态原理,根据不可逆变形由团块之间滑移和团块破碎机理所引起的概念及土体损伤演化定律,建立了非饱和黄土的屈服函数和损伤函数,得到了非饱和原状结构性黄土的结构性数学模型,且物理意义明确。周凤玺、米海珍等^[37] (2005 年) 分析了黄土湿陷变形的塑性特性,基于广义塑性力学原理建立了湿陷变形的增量本构关系,该模型能够反映湿陷性黄土在不同湿陷作用,即水和力的不同组合作用下的湿陷变形特性,考虑了湿陷体积变形和湿陷剪切变形以及球应力和偏应力对它们的交叉影响。张茂花、谢永利等^[38] (2006 年) 利用割线模量法对比分析了采用双线法和单线法原状 Q_3 黄土增(减)湿情况下的单轴压缩试验结果,研究表明:土样初始含水量与割线模量差的关系曲线类似于指数函数。邵生俊、龙吉勇等^[39] (2006 年) 基于综合结构势的概念,根据黄土的三轴剪切试验结果建立了一个湿陷性黄土结构性参数数学表达式,该表达式能够反映应力状态、含水状态和应变状态的影响,并在剪应力剪应变关系分析中引入结构性参数,从而得到能够考虑结构性的黄土应力应变关系。陈存礼、何军芳、杨鹏^[40] (2007 年) 定义了一个量化结构性参数,该参数为三轴应力条件下同一应变的原状黄土主应力差与扰动饱和黄土主应力差之比,并将结构性参数扰动饱和土本构关系中,从而得到原状黄土本构关系,该本构关系可以描述硬化型和软化型的应力—应变关系,且能够考虑原状黄土结构性的影响。夏旺民、郭增玉^[41] (2007 年) 分析了黄土在加载和增湿作用下的结构破损过程及能量转换过程,并根据连续损伤力学和热力学理论定义了黄土的加载损伤、损伤变量和增湿损伤,同时分析了三者之间关系,最终提出可以考虑增湿和加载作用的黄土弹塑性损伤本构模型的基本构架,该理论框架由加载损伤、塑性和增湿损伤三部分组成,从而提供一种建立黄土的结构性模型的新思路。栾长青、唐益群、林斌^[42] (2008 年) 通过对不同含水量的马兰黄土的单轴压缩试验、固结不排水剪切试验、固结排水试验,在深入了解马兰黄土本身独

特的物理力学性质的基础上,分析了马兰黄土的应力—应变曲线特性及物理意义,提出了马兰黄土的软化本构模型。夏旺民、郭新明、郭增玉、蔡庆娥^[43](2009年)分析了黄土结构在增湿和加载作用下的破损规律,研究了黄土在增湿和加载作用下能量的转换和耗散过程,定义了增湿损伤变量,并分析了增湿损伤的演化过程,该过程可用与含水量或饱和度有关的增湿损伤的等效能量指标来描述,与此同时,提出黄土的加载损伤的能量指标,并通过分析黄土加载过程中的力学和强度指标的劣化及结构破坏过程,建立了黄土的加载损伤演化方程。通过黄土的压缩试验和常规三轴试验,提出椭圆形塑性加载函数,该函数以塑性功为硬化参数,并符合相关流动法则。通过提出的增湿损伤演化方程、加载损伤演化方程和塑性加载函数,基于塑性力学和损伤力学理论建立了黄土弹塑性损伤本构关系,并提出黄土的弹塑性损伤本构模型。王朝阳、许强、倪万魁、刘海松^[44](2010年)以损伤理论为基础,建立了非饱和原状黄土的非线性损伤本构模型,模型可反映原状非饱和黄土独特的力学特性,该模型共包含13个参数,都可以通过试验测定,该模型进一步揭示了非饱和土体中某些应力应变特性的内在规律,从而把非饱和黄土的本构模型研究推到了一个新的水平。钟祖良、刘新荣、方金炳^[45](2010年)进行了一系列非饱和 Q_2 原状黄土室内试验,获得非饱和 Q_2 原状黄土的物理及力学参数,结合应变空间的塑性力学理论,推导出 Q_2 原状黄土的屈服函数和以塑性功为硬化参数的硬化规律,根据伊留辛公设和相关流动法则,建立了应变空间的 Q_2 原状黄土弹塑性本构模型。该本构模型能够反映 Q_2 原状黄土的剪胀性和软化性。

综上所述:长期以来,众多学者一直致力于湿陷性黄土的本构关系的研究,为湿陷性黄土的研究工作奠定了坚实的基础,但是,由于黄土分布范围较广,不同地区的黄土力学性质差异较大,所表现出的力学行为也各有其特点,现有的本构关系模型已经能够对黄土的单一特定的力学性质进行反映,然而,由于很难将不同性质的黄土的本构关系采用一种模型统一表达,因此,将两种甚至多种本构关系模型综合应用于黄土力学行为的表达是当前黄土本构关系研究方向之一。

第三节 原状黄土土工试验技术

黄土具有很强的结构性,黄土重塑以后与原状黄土的物理及力学性质的差异很大,尽管在一定情况下,采用重塑黄土代替原状黄土进行试验是可行的,但是,这种方法导致的误差仍不能满足精度要求较高的土工试验。高速铁路湿陷性黄土地基沉降变形规律及控制技术的研究所必需的一系列土工试验结果精度要求较高,因此,试验需采用原状土样制作路基的原始地基模型。然而,原状土样的采取、运输、保存及模型的制作均是长期困扰研究者的难题,随着研究的不断深入,不少学者已经采用原状土样进行了一系列的土工试验,并取得了可靠的试验数据。

扈胜霞、周云东、陈正汉^[46](2005年)用新研制的非饱和土直剪仪,进行了控制吸力的非饱和土直剪试验,得到了原状黄土的抗剪强度曲线,分析和探讨了非饱和原状黄土的强度特性。倪万魁、杨泓全、王朝阳^[47](2005年)利用可同步进行CT扫描的三轴仪,对路基原状黄土进行了三轴剪切试验,从CT数和CT图像两方面分析了不同受力过程中黄土细观结构的变化。陈存礼、胡再强^[48](2006年)在不同含水率下对兰州、西安原状

黄土进行压缩试验探讨了结构性参数随压力及含水率变化的规律性。陈存礼、高鹏、何军芳^[49]（2007年）对不同含水率的西安原状黄土及相同干密度的扰动饱和黄土进行动三轴试验，探讨了动荷作用过程中不同固结围压及含水率下结构性参数变化特性。李永乐、张红芬、余小光、侯进凯、杨利乐^[50]（2008年）利用特制的非饱和土三轴仪器，对不同含水量条件下原状非饱和黄土的强度和土—水特征曲线进行了试验研究。孙萍、彭建兵等^[51]（2009年）通过单轴拉伸试验，分析了地裂缝发育区原状黄土的拉张破裂特性。朱元青、陈正汉^[52]（2009年）为了揭示原状 Q_3 黄土在加载和湿陷过程中的细观结构变化，将湿陷三轴仪与医用 CT 机相配套，进行了一系列控制吸力的 CT—三轴湿陷试验，不仅得到了加载过程和湿陷过程中的宏观反应曲线，而且得到了相对应的 CT 扫描图像。李华明、蒋关鲁、吴丽君^[53]（2009年）为揭示黄土地基在列车振动荷载长期作用下的沉降变形，通过对原状黄土试样的循环三轴试验，模拟实际列车荷载瞬时加载状态，采用不等向长持时加载，得出了在不同围压条件下黄土的动强度特性和循环应力—累积应变关系。王志杰、骆亚生、王瑞瑞、杨利国、谭东岳^[54]（2010年）以不同含水率与不同应力状态下兰州、洛川、杨凌地区原状黄土为研究对象，进行动扭剪三轴试验，测定了黄土的动剪切模量与阻尼比的变化规律。陈存礼、褚峰、李雷雷、曹泽民^[55]（2011年）用非饱和土固结仪对不同初始含水率的西安原状黄土进行常含水率压缩试验。翁效林、王玮、刘保健^[56]（2011年）为揭示湿陷性黄土地区过湿拓宽路基变形破坏机理及强夯法处治效应，研制了离心场土工构造物变形测试系统，升级传感器电测手段，以浸水入渗条件下高速公路拓宽工程为研究载体，建立与实际应力相符的离心试验模型，通过试验得出了浸水增湿后拓宽路基的沉降变形特征和拓宽地基强夯处治效果。姚建平、蔡德钧、闫宏业、史存林^[57]（2011年）在湿陷性黄土铁路路基试验段，运用大型原位浸水试验，研究路基浸水后柱锤冲扩桩和挤密桩地基的浸水规律以及地基土湿陷对路基沉降的影响。除此之外，国内很多知名学者都曾采用原状黄土进行过不同土工试验，并取得成功，这些试验的成功为后续研究者提供了宝贵的经验。

综上所述，国内在采用原状黄土进行土工试验技术方面的研究已经取得了很大的突破，所进行的试验业已涉及大多土工试验。但是，分析发现，现今采用原状黄土进行的土工试验，所采用的土样尺寸一般较小，不能进行大型的土工试验（大模型土工离心试验等），同时，由于模型率较小，使得模型边界条件不易处理，常有试验结果失真的现象发生，这给类似地基沉降变形规律的宏观分析带来障碍。另外，采用的土样运输及保存方法也不能满足试验周期的要求，取得土样或在运输途中发生损坏，或在存放过程中含水量发生较大变化，这无疑对结构性强、对水高敏感性的湿陷性黄土的物理及力学性质影响很大，使得试验数据可靠性较低。研究采取、运输及保存大尺寸原状黄土土样进行大型土工离心试验技术已迫在眉睫，这些技术的发展与研究将提高研究中所涉及得土工试验数据的可靠性，给研究成果的科学性提供强有力的保障。

第四节 离心模型试验研究

本书研究方法中的关键部分在于采用原状黄土制作模型进行大型土工离心试验研究。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

本理论等方面良好作用,60年代初,郑人龙就翻译了很多苏联的文献。然而,在20世纪80年代初,国内学者才真正着手土工离心模拟试验,在清华大学黄文熙教授的大力倡导下,土工离心模型试验工程应用研究在南京水利科学研究院及其他单位率先开展,但当时大都是采用改装光弹离心机开展试验的。之后,中国水利水电科学研究院、河海大学、长江科学院、上海铁道学院、清华大学逐步建造了自己的离心机,并进行了大量的土工模型试验,取得了显著的研究成果。我国已对小浪底斜墙及斜心墙堆石坝(坝高154m)、西北口混凝土面板堆石坝(坝高95m)、瀑布沟心墙堆石坝(坝高188m)、天生桥一级混凝土面板堆石坝(坝高178m)、三峡风化料深水高土石围堰(高80m)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、郝荣福等^[58](2003年)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、陈胜立、沈珠江等^[59](2003年)依托黄骅港北防波堤工程,开展斜坡式防波堤体系和土工织物加筋软黏土地基固结过程离心模型试验,并进行了大量的有限元数值模拟,分析了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,得出很多重要结论,这些结论有力验证了数值模拟方法及离心试验的合理性。胡再强、沈珠江、谢定义等^[60](2004年)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、张嘎、张建民^[61](2006年)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、柳飞^[62](2007年)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^[63](2007年)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、姚令侃^[64](2007年)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、吴宏伟^[65](2007年)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、黄强兵^[66](2007年)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^[67](2009年)为研究压实黄土土—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—水特征曲线的变化规律。郭永建、尚新鸿^[68](2010年)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,利用离心模型试验完成了不同工况分析。

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。

第五节 地基变形预测方法

地基变形预测,始终是岩土工程研究的热点。地基变形过程包含了影响其变化的各种确定性因素和随机因素的信息,因此,在地基变形预测方法的研究过程中遇到很多困难,尽管如此,国内外学者对地基变形预测的研究从未间断,而且取得了丰硕的成果。

涂许杭、王志亮等^[69] (2005年)针对传统的指数曲线预测模型存在的不足,对其进行了分析与改进,提出了更具有一般性的威布尔曲线模型。张仪萍、王士金等^[70] (2005年)为了研究沉降模型中参数的时变特性,提出了多层递阶时间序列模型,该模型能较好地反映参数的时变特性,取得较精确的沉降预测结果。李菊凤、宁立波等^[71] (2005年)将神经网络理论引入软基沉降预测领域,借助自控领域信号处理的思想,应用改进后的径向基函数神经网络的映射模式进行软基沉降的短期预测。黄亚东、张土乔等^[72] (2005年)提出了基于支持向量机(SVM)模型对公路软基沉降进行预测的一种新方法,将建立的SVM模型应用于公路软基沉降预测能够更准确地反映实际沉降过程。王东耀、折学森等^[73] (2006年)运用模糊相似优先的概念,构造了高速公路软基最终沉降预测模型,实现了软基最终沉降预测,为预测软土地基路基沉降提供了一种新的方法。李永树、肖林萍等^[74] (2006年)为了合理确定非层状地下空间环境条件下地面沉降预测模型中的预测参数,基于地下空间围岩破坏机理及地面沉降规律,分析了预测参数与地下空间形状之间的内在联系,探讨了预测参数的变化规律,并导出了预测参数的计算公式。刘加才、赵维炳等^[75] (2006年)根据等应变竖向排水井地基固结理论,提出了沉降曲线的近似计算方法,通过实测沉降资料与近似理论曲线的拟合,获得竖向排水井地基的最终沉降量和平均固结度,从而预估其工后沉降量。王志亮、黄景忠等^[76] (2006年)提出了带软土流变项的新型增长曲线模型,该模型能合理地反映出土颗粒骨架的蠕变过程,且能较准确地给出不同时刻的次压缩量,具有一定的工程参考价值。王志亮、黄景忠等^[77] (2006年)系统介绍了Asaoka法的基础知识,并基于抛物插值法和直线最小二乘拟合法,编制了该法预测地基最终沉降的程序。王伟、卢廷浩等^[78] (2007年)结合软基沉降机理,提出将软基沉降全过程用Weibull模型预测的方法,该预测模型不但参数意义明确,还可以反映加载速度等因素的影响,同时克服了其他两种成长模型最终沉降与反弯点处沉降值相对不变的缺点。陈斌、陈晓东等(2007年)提出了一种预测公路复合地基工后沉降的新方法,对粉喷桩复合路基的沉降量进行准确预测。张丽华、蔡美峰等^[79] (2007年)通过分析了改进泊松模型的适用性和特点,建立了改进泊松-复合小波神经网络修正模型,结合实际工程数据分析和预测了CFG桩复合地基全过程沉降规律,并对比分析了改进的泊松模型的优缺点。王丽琴、靳宝成等(2008年)提出一种新的分析预测模型——似固结模型,研究表明:该模型对