

专著

ZHUANZHU

粉煤灰、碱渣改良膨胀土的路用性能试验研究

薛庆鹏 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

FENMEIHUI JIANZHA GAILIANG PENGZHANGTU DE LUYONG XINGNENG SHIYAN YANJIU

粉煤灰、碱渣改良膨胀土的路用性能试验研究

薛庆鹏 著

西北工业大学出版社

西安

【内容简介】 本书采用理论研究、试验和工程实践相结合的方法对粉煤灰、碱渣改良膨胀土的路用性能进行系统研究。全书共分6章,主要内容包括绪论,温湿状态对压实弱膨胀土变形性能的影响,优化设计与敏感性分析,粉煤灰、碱渣改良膨胀土的试验,粉煤灰、碱渣改良膨胀土的力学特性分析,公路路基粉煤灰、碱渣处治膨胀土拌和及路基压实工艺等。

本书结构严谨,内容翔实,通俗易懂,配有大量图表,使读者能够快速而深入地理解膨胀土改良的相关问题。通过试验分析研究,旨在帮助读者掌握新材料粉煤灰、碱渣的改良机理及适用条件,培养读者解决膨胀土改良工程实际问题的基本能力和创新能力。

本书可作为土木工程、道路工程、特殊土路基等专业教师与学生的教学参考书,亦可为相关领域的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉煤灰、碱渣改良膨胀土的路用性能试验研究/
薛庆鹏著. —西安:西北工业大学出版社,2017.9
ISBN 978-7-5612-5648-0

I. ①粉… II. ①薛… III. ①粉煤灰—路基—
性能试验—研究 ②碱渣—路基—性能试验—研究
IV. ①U416.1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 227997 号

策划编辑:季 强
责任编辑:李阿盟

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电 话:(029)88493844, 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:北京京华虎彩印刷有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:7.875

字 数:162千字

版 次:2017年9月第1版 2017年9月第1次印刷

定 价:28.00元

前 言

膨胀土形成于新生代第三纪至第四纪晚更新世,其矿物成分主要是蒙脱石和伊利石。膨胀土是具有膨胀结构,以及多裂隙性、强胀缩性和超固结性的高塑性黏性土。它的主要特征:①由膨胀性黏土矿物组成,多为蒙脱石和伊利石;②膨胀结构;③多裂隙性;④胀缩性;⑤强度衰减性;⑥超固结性等。

膨胀土在世界范围内分布极广,遍及六大洲 40 多个国家和地区。美国、中东、印度、非洲、加拿大和澳大利亚等国家和地区都先后遭遇了膨胀土的危害,造成了严重的经济损失。我国也是膨胀土分布很广的国家,在陕西、云南、贵州、广西、湖北和河南等 20 多个省区都发现有膨胀土。

膨胀土的裂隙性、胀缩性和超固结性,使得膨胀土的工程性质极差,对各类工程建设往往造成多发性、反复性和长期潜在性的地质灾害。在膨胀土地区,无论是路堑还是路堤,都会出现严重的边坡变形。这是由于大气物理风化作用和湿胀干缩效应,使边坡土体崩解,土体抗剪强度降低,而膨胀土的裂隙性和超固结性进一步加剧了土体抗剪强度的衰减,导致边坡的溜塌、滑坡等变形病害现象十分突出,使路基的坚实性和稳定性遭受破坏,造成路基失稳,影响行车安全。因此,膨胀土地区路基工程的稳定性,已成为当前工程地质中一个不可忽视的重要研究课题,许多公路、铁路等工程学科专家都在从不同角度和途径对膨胀土进行试验研究,以解决各种实际工程中遇到的膨胀土问题。

目前,一些专家将工程地质和环境地质结合在一起,利用固体废弃物对特殊土进行改良,使得利用固体废弃物改良特殊土及其对环境影响的研究成为热门话题,其中改良膨胀土的方法常见的有以下几种。比如利用石灰改良膨胀土、粉煤灰改良膨胀土、胶粉改良膨胀土、二灰土改良膨胀土和矿渣复合料改良膨胀土等。这些改良方法是利用工业上的固体废弃物,如粉煤灰、矿渣、胶粉和沙砾石等作为改良材料对膨胀土进行化学改良和物理改良的,这样既可以降低改良成本,又可以解决固体废弃物堆量大、占地多、污染环境等问题,且改良效果十分明显,得到了工程界的普遍重视。但是这些改良方法也存在一些不足之处,如石灰改良膨胀土会污染地下水,粉煤灰改良膨胀土需要的用量比较大,水泥改良膨胀土在改良膨胀性上的作用不强,而利用粉煤灰、碱渣改良膨胀土这方面的研究还鲜有报道,因此本书通过室内试验探讨粉煤灰、碱渣对膨胀土改良的可行性。

本书考虑利用粉煤灰、碱渣对膨胀土的基本物理力学性质、膨胀性等进行改良研究,探讨粉煤灰、碱渣改良膨胀土的可行性。这不仅在治理膨胀土地区的地质灾害、提高公路路基等级、降低工程造价等方面具有十分重要的研究意义,而且也使碱渣获得了充分的利用,变废为宝,具有明显的环境效益和经济效益,其综合利用的前景较为广阔。因此,本研究具有重大的理论技术意义和现实意义。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请有关专家和读者批评指正!

著 者

2017年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 膨胀土路基的研究现状	1
1.2 膨胀土改良研究现状	8
1.3 膨胀土改良存在的主要问题	14
1.4 本书主要研究内容	15
第 2 章 温湿状态对压实弱膨胀土变形性能的影响	17
2.1 压实膨胀土脱湿收缩机理及过程	17
2.2 温度、湿度对土体收缩变形的影响	20
2.3 温度、湿度对土样膨胀潜势的影响分析	27
2.4 不同温度、湿度下的脱湿速率对收缩变形的影响	34
2.5 温湿状态下不同脱湿方法对压实弱膨胀土变形的影响	39
2.6 相同温度状态下脱湿方法对压实弱膨胀土变形各向异性的影响	46
2.7 本章主要结论	55
第 3 章 优化设计与敏感性分析	57
3.1 试验设计	57
3.2 正交设计的基本概念	59
3.3 无交互作用的正交设计与数据分析	62
3.4 有交互作用的正交设计与数据分析	65
3.5 混合水平的正交试验设计	69
3.6 敏感性分析	72
第 4 章 粉煤灰、碱渣改良膨胀土的试验研究	77
4.1 粉煤灰、碱渣的强度形成机理	77

4.2 改良土的基本物理特性	80
第 5 章 粉煤灰、碱渣改良膨胀土的力学特性分析	96
5.1 击实试验	96
5.2 无侧限抗压强度试验	99
5.3 直剪试验	104
第 6 章 公路路基粉煤灰、碱渣处治膨胀土拌和及路基压实工艺	107
6.1 公路路基粉煤灰、碱渣处治膨胀土拌和工艺	107
6.2 公路膨胀土路基压实工艺	113
参考文献	118

第1章 绪 论

膨胀土在世界范围内分布广泛,全世界有 40 多个国家和地区发现分布有膨胀土,我国也是其中之一。随着我国交通领域的快速发展,在高等级公路建设中,不可避免地需要穿过膨胀土分布地区。膨胀土的存在对我国高等级公路的建设产生了极大的危害,被称为公路建设中的“癌症”。裂隙性、超固结性及膨胀性是膨胀土的三大特征,含水率及上覆压力的变化是造成膨胀土工程特性变化的根本原因。浅层性、渐进性是膨胀土路基及边坡破坏的典型特征,路基表面较小的上覆压力及较大的含水率变化是造成这一破坏特征最主要的原因,在一定的上覆压力及较小含水率变化下,膨胀土的工程特性得到了明显改善,这为将压实弱膨胀土用于路基填筑提供了可能,如何合理地利用膨胀土的这一特性,将膨胀土用于公路建设当中,是当前膨胀土研究的热点与难点。

1.1 膨胀土路基的研究现状

路基受到地质水文和气候等方面的影响较大,采用压实弱膨胀土作为路基填料时,由于受到气候变化的反复影响,膨胀土在应力应变方面产生持续反复的变化,使得路基的强度、变形性能及稳定性逐步降低,从而造成了路基的破坏,因此,要研究压实弱膨胀土用于路基填筑的可行性,必须研究路基环境下的压实膨胀土的工程特性。自 2002 年以来,交通部门多次组织了高校、设计院的相关专家联合对膨胀土地区建设的技術进行研究,取得了丰硕的成果。本节主要从温湿状态、干湿循环等方面进行介绍。

1.1.1 温湿状态下路基压实弱膨胀土的工程性状

1. 路基温湿状态研究现状

大气降雨及蒸发是路基温湿状态改变的重要原因,随着路基深度的变化,大气对不同深度的路基温湿状态的影响明显不同。近年来,越来越多的学者对不同深度的路基及边坡的温湿状态进行了监测,取得了更多的研究成果。

A. asserat de silans 等人在裸土实验场安装了多种传感器,测量土体不同深度的温度及含水率的变化,同时将试验结论与他本人所建立的模型进行比较,结果表明两者的结论比较接近。M. OKane 对加拿大某银矿废弃场上覆土层进行了现场监测,通过各种传感器测定不同

气候变化情况下土基的含水率及温度的变化情况。J. Gasmo, H. Rahard 等人在试验场地安装了张力计、TDR 测压管、雨量计等试验仪器,并通过这些仪器测试土体的含水率吸力地下水位表面径流量和降雨量,研究天然人工降雨条件下渗入到残积土边坡的水分与降雨量的关系及其对边坡稳定性的影响。A. GLi 等人对香港某大型开挖残积土边坡进行原位现场监测,所埋设仪器有含水量探头、张力计、测压计、测斜管、土压力盒和雨量计,通过测定土体含水率、张力及压力的变化来揭示土体边坡的降雨入渗过程,分析了这一过程中边坡的稳定性状态。

詹良通等人在枣阳选取了 11 m 高的典型的膨胀土挖方边坡进行人工降雨模拟试验和原位综合监测。监测仪器包括张力计、热传导吸力探头、含水率探头、土压力盒、测斜管、雨量计、蒸发计以及地表径流量测试计等,组成了一个完整的监测系统。通过对边坡土体中的水分、孔隙水压力、应力状态以及土体变形的监测,来探讨边坡中土、水相互作用机理。姜洪涛等人对沥青、水泥、多孔砖、草地及裸土覆盖下的温度及湿度场进行了长期的监测分析。

陈建斌、李雄威等人对广西南宁水牛坡的膨胀土进行了监测,对缓坡、陡坡与坡面草 3 种类型的膨胀土边坡进行了原位监测,并采用小型气象站、土壤含水率 TDR 系统、重力烘干法、温度传感器、测斜管、沉降板等仪器跟踪监测了不同类型边坡的变形、含水率及温度的变化规律,通过对监测数据的分析后认为,降雨是引起膨胀土边坡破坏的最直接原因,而蒸发效应是灾变发生的重要前提,蒸发是土体裂隙开展的内在原因。陈建斌等人对非饱和土的蒸发效应与影响因素进行了分析研究,并对大气影响下膨胀土边坡的动态响应进行了数值模拟。

杨果林等人对路基在不同气候条件下的含水率、温度及土压力变化进行了试验研究,在含水率变化方面通过六组膨胀土路基室内模型试验,在不同排水边界及压实度条件下,分别模拟了积水、阴天、日照、降雨时路基的含水率变化规律。杨果林采用室内试验的方法模拟了不同路基排水及不同路基边坡条件下,四种不同气候条件下的土压力变化,得出路基大气影响深度范围为 2.5~3 m,土压力的变化主要是由膨胀土路基中含水量变化所引起的土体自重变化与膨胀土在不同气候条件下不同含水量所产生膨胀土压力的变化综合作用结果。

胡明鉴等人对某高速公路膨胀土路基处置 1 年多以后的土体性状进行了后期钻孔取土研究,并进行了试验验证。杨果林利用南友高速公路中膨胀土在不同的排水条件及路基坡度下,进行了多组模拟路基在积水、阴天、降雨及日照四种环境下的温度模拟试验,得出了膨胀土路基中的温度变化规律。郑健龙等人对某路基内部进行了长达 1 年的现场跟踪监测,研究了路基不同部位的温度随时间的变化规律。刘炳成等人对非饱和多孔土壤湿度及温度的动态特征进行了试验,研究了温度对水分迁移的影响。阮志新等人对石灰处治膨胀土填筑路基进行了现场试验研究,通过试验研究得知,土体内竖向应力随填土高度的增加呈线性增长,温度的影响深度约为 2 m,土体表面为 0.5 m,深度范围内随温度变化幅度较大,且土体内存在温度滞后效应,随着深度越大,滞后效应越明显,处治后土体含水率较小,说明了石灰处治膨胀土路基试验路段具有较好的保水性。

2. 大气影响深度的研究现状

大气通过降雨、蒸发及温度等因素变化改变土体内部的温度及含水率,大气影响深度的影响因素较多、较复杂,现行膨胀土地区建筑技术规范采用湿度系数确定大气的影响深度,但由于部分国家或者地区无法提供相关的气候资料,使得这一规范方法在某些地区无法实行,近些年来,有学者对此进行了研究。

赵平采用勘测资料对埃塞俄比亚膨胀土不同深度的含水率进行了分析,并利用相关资料计算了土体的湿度系数,进而计算了大气影响深度。余飞等人对合肥地区膨胀土路基的处治深度问题进行了探讨,得出采用规范方法确定的大气影响深度偏小。

李欣等人对云南鸡街盆地极端干旱状态下的大气影响深度进行了研究,结果表明在极端干旱的情况下无法采用规范中的湿度系数确定大气影响深度。郭伟等人通过对土体含水量和地温随深度的变化幅度以及静力触探锥尖阻力变化规律等方面的分析,确定了本地区大气影响深度,同时还发现地形对大气深度也有一定程度的影响,膨胀土地区边坡破坏规模和形式均与大气影响深度密切相关。

阳云华等人通过对土体的破坏及大气影响深度的研究后发现,土体破坏均位于大气影响深度范围内。李雄威等人对南宁膨胀土边坡进行了监测,从湿、热两个方面分析了大气影响深度,结果表明,采用植被覆盖坡后可以有效减小膨胀土边坡的大气影响深度。

赵艳林等人对大气作用下膨胀土地基的水分迁移与胀缩变形进行了分析,得出地基中含水率变化幅度随深度增加而递减,3.5 m 以下土体的体积含水量基本不变,从而确定了南宁地区膨胀土地基的大气影响深度为 3.5 m。在此基础上,结合已有膨胀土胀缩性指标的干湿循环效应研究成果提出了一种同时考虑干湿循环效应和 1.0 m 深处含水率变化的膨胀土地基胀缩变形计算方法。

3. 温湿状态对膨胀土工程特性的影响

温度及湿度是气候的两个主要方面,也是对路基造成影响的主要环境因素。近些年来,部分学者对此进行了研究,研究成果主要集中在由气候变化造成的路基温度及含水率变化对路基膨胀土工程特性的影响方面。

李雄威等人对模拟日照条件下膨胀土湿热耦合性进行了分析,研究了降雨发生后模拟日照条件下的膨胀土土体的含水率及土体裂隙变化规律,并对新开挖边坡的大气影响深度进行了现场监测试验。谢云等人研究了温度对膨胀土强度及变形的影响,推导出了温度影响下的强度计算公式,提出了考虑温度的重塑非饱和膨胀土非线性本构模型。

D. De. Bruyn 等人对饱和 Boom 黏土试样在不同温度及不同围压下的三轴试验结果进行了分析,得出抗剪强度随温度升高而减小。我国学者武文华利用 Romcro 对 Room 土的吸力含水率试验结果引用 Hucckel 提出的热软化计算式,提出非饱和土的热、水力、力学本构模型并进行了数值模拟。Cane Cekerevac 等人对饱和黏土进行了温度控制在 22~90℃ 之间的三

轴试验。分析了温度对抗剪强度、临界状态线和弹性模量的影响,结论表明,土的抗剪强度随温度升高而升高。Tanaka 等人对重塑饱和伊利石黏土进行了不同温度的三轴试验研究,结果表明,土的抗剪强度随温度升高而升高,随温度升高有应变软化的趋势。

李雄威等人以南宁膨胀土为研究对象,采用现场试验方法测定了不同季节的降雨量及降雨量的大小对土体含水率变化的影响,并测定了不同深度处土样的竖向及横向膨胀力变化,研究了“旱涝急转”的过程会造成土体膨胀力的骤然变化,但雨季的持续又会对土体水平向和竖向膨胀力带来不同影响。张天翔等人研究了极端气候事件对膨胀土路基水毁影响。

杨明等人采用基于温度、渗流、应力的耦合模型,以皖西地区实际蒸发量和降雨量作为边界条件,模拟了降雨、蒸发等天气条件的变化对路基工程行为的影响,分析了路基在大气热湿循环作用下的变形规律。E. E. Alonso 等人采用热、湿、力耦合分析了膨胀土路基在不同气候状态下的变形、含水率及温度变化,同时考虑热的扩散效应和热膨胀效应造成的变形,并采用实际的降雨量、温度和相对湿度定义不同的气候特征,采用相对湿度计算地表蒸发,得出径向排水对路堤基础和底基层饱和度影响较大,而对路基的影响有限的结论。

施斌研究了黏性土在不同温度下龟裂的开展,并对相关的开裂机理进行了探讨。唐朝生研究了土体剖面在不同深度处的温度变化规律,并采用数字图像处理技术对不同温度下膨胀土的干缩开裂进行了研究,得出温度对土样出现裂缝的临界含水率影响非常明显。同时唐朝生还采用了数字图像技术对不同温度影响下的黏性土的干燥收缩裂缝的发展规律及其形态学进行了定量分析。王爱军通过设置不同的脱湿环境,研究了不同脱湿环境下膨胀土的变形及强度特性的变化。孔令伟等人对脱湿速率下的膨胀土性状及土水特征曲线进行了研究,河海大学胡瑾在特定温度下对高淳胥河边坡膨胀土进行了上覆压力下的收缩及膨胀试验。

J. TABBAGH, S. M. MILLER 等人对大气影响下的膨胀土强度、变形等方面的基本特征进行了研究,张锐等人对公路膨胀土路基的湿度平衡规律问题进行了研究。翟聚云等人研究了非饱和膨胀土的气态水迁移及气液态水分迁移规律。

1.1.2 干湿循环作用下膨胀土的工程性状

大气反复的降雨及蒸发作用导致了膨胀土路基内部含水率的反复变化,从而完成了膨胀土土体工程性状的变化,学者对此展开了广泛而深入的研究,取得了较多的成果,现从干湿循环对强度及变形影响的两个方面进行总结。

1. 干湿循环对膨胀土强度的影响

慕现杰对干湿循环作用下的膨胀土强度进行了直剪试验和无侧限抗压强度试验,得出随着循环次数的增加,膨胀土的凝聚力减小,而内摩擦角也略有减小的结论。

吕海波等人通过对南宁地区原来状态膨胀土干湿循环试验,得出膨胀土抗剪强度随干湿循环次数增加而衰减,最终趋于稳定的结论,并利用压汞试验测定了膨胀土干湿循环过程中的孔径分布,解释了干湿循环对土的粒间连接产生不可逆的削弱的原因,同时基于不同的次数干

湿循环试验,提出了黏聚力衰减率与干湿循环次数的S形曲线的关系。另外,吕海波还研究了不同于湿循环次数下膨胀土的抗拉强度与干湿循环次数的关系。

肖杰等人对低应力下干湿循环的慢剪强度进行了研究,得出低应力下膨胀土干湿循环后的稳定强度与土体的残余强度接近。韩华强等人以饱和度和干湿循环次数为控制条件,对膨胀土进行了室内常规直剪试验,干湿循环次数会引起膨胀土长期强度和变形模量的衰减,其中对强度指标中黏聚力的影响要明显大于内摩擦角,膨胀土所具有强烈的强度衰减特性,使得膨胀土的工程性质极差。

杨和平等人研究了不同上覆荷载作用下的干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响。他对传统的CBR试验方法进行改进,从浸水方式、上覆压力及初始含水率等方面分析了现行方法的不合理性,提出了合理的CBR值测定方法,并采用此方法对不同的膨胀土填料用于路基铺筑中的分类进行了研究,提出了膨胀土的分类指标体系;通过对直剪试验的试样制备及试验方法进行符合工程实际的改进,进行了不同干湿循环次数下膨胀土强度衰减特性的研究。

李新明等人针对包边法路基施工中填芯膨胀土的实际工程状态,设计了反应路基填芯膨胀土环境状态的干湿循环过程,对6次干湿循环前后的填芯膨胀土的强度特征进行了系统的分析研究。

李舰等人基于颗粒尺度的热力学理论对干湿循环路径下的膨胀土变形进行了分析,并基于BBM模型建立了适用于吸力循环过程的弹塑性本构模型,并利用该模型对土体的吸力循环行为进行预测。

刘华强等人研究了裂缝对膨胀土抗剪强度的影响,提出了基于干湿循环的膨胀土强度指标计算公式。曾召田通过设置不同干湿循环幅度,研究了不同干湿循环次数下膨胀土强度指标的衰减。

2. 干湿循环对压实膨胀土变形的影响

吴珺华等人研究了干湿循环作用下膨胀土的胀缩性能,得出试样的最终膨胀率和最终收缩率均逐渐减小,膨胀变形减小明显,而收缩变形减小不大。此外,吴珺华还对膨胀土土样的初始开裂进行了分析计算。

赵燕林对膨胀土进行了干湿循环试验,得出干湿循环次数与胀缩性指标可采用指数关系拟合,缩限在干湿循环次数中不发生变化,土体经过3次干湿循环后胀缩性指标逐渐趋于稳定。郑澄锋对干湿循环作用下的边坡变形发展过程进行了数值模拟。

杨和平等人对宁明原状膨胀土进行了上覆荷载条件下的干湿循环试验,研究了不同上覆荷载作用下压实膨胀土的干湿循环次数与膨胀变形指数的关系。Basma对4种不同的重塑膨胀土进行了干湿循环试验,研究了试验前后膨胀土微观结构的变化。这些试验结论表明,膨胀土的膨胀性随着干湿循环次数的增加而不断降低。

Albrechtd等人研究了干湿循环对膨胀土渗透性的影响,发现渗透性随着干湿循环次数的增加而增加,他将这一结果归因于膨胀土内部裂隙数量的增加。吴珺华等人采用大型的直

剪仪分别对未经历和经历干湿循环作用的土样进行了大型剪切试验,试验结果表明干湿循环诱发膨胀土裂隙发育,抗剪强度迅速衰减,是导致膨胀土工程失稳破坏的主要原因。

P. DELAGE 等人通过试验发现,干湿循环过程中所呈现的胀缩变形特性受初始含水率或吸力状态的制约。另外,Alonso 指出在控制吸力的条件下,试验所表现出来的变形分为两个方面,即微观结构变形和宏观结构变形。一般情况下,微观结构变形是可逆的,而宏观结构变形的可逆性与干湿循环过程的变形积累有关。

魏星等人对干湿循环作用下压实膨胀土的胀缩变形进行了模拟,指出干湿循环引起的膨胀土胀缩变形可以分解为由吸力或者含水率改变而同步改变的可逆性分量和一个主要产生于干湿循环初期的不可逆性分量,并给出了两种分量的数学描述。

ALONSOEE、NOWAMOOZH、唐朝生等人采用控制吸力的方法对膨胀土在干湿循环过程中的胀缩变形特性进行了试验研究,但采用控制吸力方法进行干湿循环试验时,试验所需要的时间较长,试验过程复杂,较难开展。Basma 等人 and Tripathy 等人发现在相同的固结压力下在干湿循环达到平衡状态后土的孔隙比保持不变并且与土的初始击实干密度无关。Airo Farulla 等人通过电子显微镜观察聚集体在吸力循环作用下的面积变化过程证实聚集体的体积变形是可逆的。ZEMEUNG 等人对干湿循环作用下原状膨胀土的变形特性进行了试验研究。

陈亮研究了干湿循环过程中,土体沿不同方向失水导致的膨胀土土体变形特征。查甫生等人研究了膨胀土在干湿循环过程中的变形特征,研究了土体的增湿变形与膨胀时间关系,得出在土样的含水率恢复至起点时,土样的高度比原样高度有所增加。李雄威等人对干湿循环试验过程中采用大环刀样,再转制成小环刀样进行膨胀率及直剪试验,有效地改善了试验制备中的尺寸效应。刘义虎等人对干湿循环作用下水对路基的破坏机理进行了试验研究。

张家俊等人研究了不同干湿循环次数对膨胀土裂隙开展的影响。曾召田等人对膨胀土干湿循环后的孔径分布变化进行了研究,从微观方面分析了土力学中的干湿循环效应,并对干湿循环作用下膨胀土的累积损伤进行了初步研究。姚志华采用 CT 试验的方法研究了干湿循环及三轴浸水过程中的细观结构的变化,得出在浸水过程中,土样的裂隙逐渐闭合,但闭合的程度与应力状态有关。

1.1.3 膨胀土膨胀指标的研究

1. 膨胀土的研究现状

叶为民等人采用恒体积法对高压实高庙子膨润土膨胀力特性进行了研究,秦冰等人进一步通过干密度、初始含水率等对高庙子膨润土膨胀力进行了研究。丁振洲等人研究了三种常见膨胀力的测量方法,并对膨胀力随增湿度、干密度、起始含水率等影响因素的变化进行了研究,采用“等同”试样进行了不同程度脱湿后的膨胀力变化规律试验。章为民研究膨胀力与膨胀变形之间的关系,提出了膨胀土的膨胀模型。KOMINEH 对不同吸力下的膨胀力进行了研

究,得到吸力下膨胀力随时间逐渐增大,而在高吸力作用下,膨胀力时程曲线出现“平台”。

张颖钧发明了三向胀缩特性仪。谢云等人采用此仪器对重塑膨胀土的三向膨胀力进行了研究,结果表明三向膨胀力不等,水平膨胀力小于竖向膨胀力。湿胀干缩使得重塑膨胀土的膨胀力降低,膨胀力与位移呈对数关系,并给出了膨胀力与初始含水率及干密度的关系式。谭波利用自主研制的三向膨胀仪对宁明膨胀土的三向胀缩规律进行试验研究,得出干密度及三向应力状态是影响三向膨胀性能的重要因素。李海涛等人研制了无干扰可控制饱和度的膨胀力测试仪器,克服了传统方法中难以严格控制试样饱和、在反复的压缩和膨胀过程中体积不能保持恒定而导致的试样扰动和测试过程复杂等缺点。杨长青对膨胀土的三向膨胀变形进行了试验研究。

孙发鑫等人对高庙子膨润土、砂混合料的三向膨胀力特性进行了研究,混合料三向膨胀力均随干密度呈指数关系递增,随含砂率呈指数关系递减,建立了高庙子膨润土及其含砂混合料三向膨胀力的经验模型。刘泉声等人对砂、膨润土的膨胀力影响因素进行了研究。LAJUDIE A, SRTDHARAN A 等人针对不同类型的膨胀土,开展了压实状态下膨胀力的室内试验研究工作,获取不同压实膨胀土的膨胀力特征。

周博、李雄威等人研究了膨胀土原位膨胀力的测定方法及规律。杨果林对膨胀土的侧向原位膨胀力进行了研究,得到了膨胀力与含水率的经验公式。李风起研究了膨胀土地基的竖向原位膨胀力,得到了原位膨胀力与相关指标的关系。王亮亮等人采用现场大面积浸水的方式进行了膨胀土原位膨胀力的现场试验,得出了原位膨胀力的变化过程。金畅等人采用声波测试法测得路基的剪切波速,利用改进后的压力-膨胀量曲线法,进行原位地基土的膨胀力试验。

2. 膨胀及收缩变形指标研究现状

李志清等人研究膨胀土浸水、浸盐、浸酸的试验,并利用 Does Response 模型很好地模拟了膨胀土膨胀浸水时的规律,浸盐的膨胀变形降低,浸醋使得膨胀变形升高。

李振等人在经过改造的三轴仪上对安康膨胀土进行了三向增湿变形试验。试验表明:在相同应力比的三轴应力状态下,膨胀土浸水过程中的变形为膨胀变形,应力较大时,轴向变形表现为压缩变形,而径向变形则表现为膨胀变形。土样在增湿剪切过程中以体积膨胀为主,体积变化以侧向变形为主,轴向变形较小,同时进行了有梯度的增湿试验,研究了压力对膨胀土遇水膨胀的抑制作用,测试了试样在浸水前后不同压力下膨胀变形量的变化过程,给出了通过干密度来初步估算膨胀压力的计算模型。

Weston 等人根据不同干密度黑棉土的膨胀变形资料,总结得到膨胀量的计算公式。Lore 等对膨胀土膨胀变形特征进行了研究,提出了三阶段膨胀变形的模型。D. J. Hamberg, D. G. Fredlund 给出了基于一维固结试验结果的膨胀土地基变形预测方法,主要有自由膨胀固结实验法和常体积固结实验法等。这些方法必须考虑现场的应力路径,并且必须考虑取样扰动的影响。M. Gysel 基于一维固结理论认为在弹性范围内,在有侧限的情况下,根据弹性

理论和经验公式可以得到竖向的膨胀量计算公式。

程钰等人研究了初始状态对膨胀土变形规律的影响,提出了采用稠度状态作为中间状态量拟合上覆压力与线膨胀率之间的关系。黄斌等人采用邯郸强膨胀土为研究对象,通过室内膨胀试验,研究了膨胀土的线膨胀率与压实度、初始干密度及初始含水率之间的关系,提出了 K_0 状态下,不同上覆荷载作用下的膨胀土线膨胀率计算式。张福涛等人采用宁淮高速公路弱膨胀土进行研究,提出了综合考虑初始含水率、初始干密度及上覆压力的膨胀土变形耦合计算公式。张爱军等人以安康压实膨胀土为研究对象,通过不同初始干密度、初始含水率和上覆压力的一系列的线膨胀率试验,得到了以人工压实膨胀土的膨胀变形随三种因素的变化规律,采用容势含水率比取代初始含水率进行变形的拟合。

李献民等人研究了外部因素对膨胀土土样变形特性的影响,得出初始含水率及初始干密度是影响土样变形最重要因素的结论。鲁洁等人对不同干密度及初始含水率下的膨胀土土样进行了增湿变形试验,研究了原状膨胀土和重塑膨胀土的增湿变形特征,将初始含水率、上覆压力及初始干密度对两种土样的膨胀率影响进行了比较研究。孙即超提出了膨胀土的膨胀模型并反演确定膨胀土的膨胀力。

韦秉旭等人采用侧限有荷膨胀试验,研究了膨胀土有荷膨胀率和上部荷载、自然饱和含水率以及过程含水率之间的关系,据此推导出了计算膨胀土路堤的变形随含水率及上覆荷载变化的本构模型。

李志清系统地研究了不同初始状态下膨胀土的变形规律及致灾机制,并采用 Does Response模型,定量地模拟了胀缩时程规律。常玉兰研究了膨胀土失水收缩时收缩压的变化规律。漆宝瑞研究了膨胀土的膨胀系数、收缩系数的求解方法。马少坤则研究了南宁膨胀土的长期压缩特性。Nelson 认为体积收缩与含水率呈线性关系。

姚海林等人提出采用标准吸湿含水率对膨胀土的膨胀等级进行划分,确定了标准吸湿含水率的试验方法及标准吸湿含水率与蒙脱石含量、塑性指数等的关系。杨明亮进一步讨论了该方法对石灰改良膨胀土的适用性,结果显示该方法对石灰改良膨胀土不适用。罗冲等进行了膨胀土在不同约束状态下的试验,得出不同约束状态对膨胀土的含水率、密度、孔隙比等物理力学性质有显著的影响。

1.2 膨胀土改良研究现状

1.2.1 物理方法改良膨胀土

1. 掺纤维改良膨胀土

由于基体吸水膨胀时,纤维和基体的界面产生切应力,从而限制基体的进一步膨胀,对土体的变形起到约束作用。土中纤维加筋能有效地抑制膨胀土的膨胀,减少膨胀土的膨胀力和

膨胀率,显著提高土体无侧限抗压强度、凝聚力和内摩擦角。纤维对膨胀土收缩性质有明显改良,可显著降低纤维土的收缩性。雷胜友等人进行了麻丝纤维加筋抑制膨胀土的膨胀性试验;胡斌等人通过室内土工试验和数值模拟分析研究纤维类材料改良膨胀土的可行性和效果;李天龙进行了掺聚丙烯纤维改良膨胀土的试验研究。

2. 风化砂改良膨胀土

风化砂改良膨胀土就是将风化砂按照一定的配合比例掺入膨胀土中,经过拌和之后形成改良土样,掺砂改良膨胀土的机理主要如下:

- (1)增大了膨胀土中粗颗粒含量,达到减小膨胀量的效果;
- (2)改变了膨胀土的密实特性,增大了空隙率,减小了膨胀土的膨胀量;
- (3)增大了膨胀土颗粒与颗粒之间的摩擦力,利用颗粒与颗粒之间的摩擦力抵消一部分的膨胀力,达到降低膨胀量的效果;
- (4)增大初始含水率,使膨胀土在施工时处于一个高含水率状态,从而达到降低膨胀量的效果。

杨俊等人对风化砂改良膨胀土进行了较为系统的试验研究,为工程应用提供了试验依据。

1.2.2 化学方法改良膨胀土

1. 石灰改良膨胀土

用石灰改良膨胀土是工程中常用的方法,目前研究较多。石灰是一种无机的胶结材料,其作用机理如下:

(1)离子交换作用。在土中水分子作用下,生石灰迅速消解,产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及少量 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 置换膨胀土颗粒所吸附的 K^+ 、 Na^+ 等离子,使膨胀土的分散性、坍塌性、亲水性和膨胀性降低,塑性指数下降并易稳定成型,形成早期强度。

(2)碳酸化作用。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在土中不断和空气中 CO_2 反应生成 CaCO_3 和 MgCO_3 坚硬的固体颗粒,具有较高的强度和水稳定性, CaCO_3 对土体的胶结作用使得土体形成石灰稳定土。

(3)凝胶反应。离子交换反应后期,随龄期增长,膨胀土中的硅胶、铝胶与石灰进一步反应形成含水硅酸钙、铝酸钙。这两种凝胶能够在水环境下发生硬化,在膨胀土的黏粒外围形成稳定的保护膜,具有很强的黏结力,形成网状结构,使灰土强度增长,并保持长期的稳定。同时保护膜还能起到隔离水分的作用,使膨胀土获得水稳定性。

(4)结晶作用。石灰掺入膨胀土中后,溶解度很小,除了离子交换和碳酸化作用外,绝大部分以氢氧化钙结晶水的形式析出,进一步提高了膨胀土的强度和水稳定性。

2. 水泥土改良膨胀土

掺加一定比例的水泥对膨胀土进行改性是目前处理膨胀土的主要方法之一。水泥的掺入

改变了膨胀土的结构和化学成分,从而改良了膨胀土的物理力学性质。水泥与膨胀土的离子交换及团粒化作用、硬凝反应及碳酸反应,使土体粒间连接力增强,抗压强度增大,可以有效地改良土的膨胀性。研究表明,水泥掺量比为8%是最佳掺量,此时改良土的自由膨胀率和塑性指数达到最佳,且具良好的水稳性。

3. 二灰土改良膨胀土

二灰土是由石灰、粉煤灰与土混合而成的。石灰和粉煤灰混合治理膨胀土,石灰和粉煤灰各自发挥成分的特长。石灰和膨胀土的胶凝反应进行较慢,早期强度不高,而粉煤灰含有大量活性 SiO_2 和 Al_2O_3 ,在石灰存在的情况下,水化生成胶凝性物质胶结膨胀土颗粒,形成网状连接,使膨胀土的早期强度提高,后期强度稳步增长。

4. 固化剂改良膨胀土

(1)FH 系列固化剂改良膨胀土。FH 系列固化剂的加固机理是将固化剂中的水分调节剂与水分子形成氢键筋带作用,或其他化学键,对水有较强的吸附作用,有利于土壤的稳定固化。固化剂中含有微晶核,通过晶格配备,可在土颗粒空隙中生成针状结晶体,填充土体缝隙,并形成骨架结构。固化剂中高分子材料通过交联形成三维网状结构,提高土体的抗压、抗渗等性能。通过固化剂中的固化成分与土颗粒的化合、凝结等反应,使多余水分被排除,剩余水分参与固化反应使土壤得以稳定固化。与原土、石灰土、水泥土相比,FH 系列改性土的抗剪强度更高,整体性更好,塑性变形允许值更大。

(2)ISS 离子土壤固化剂改良膨胀土。ISS 是美国研发的一种电离子土壤固化剂,是一种复合的化学配方,其中含有活性成分的磺化油,无毒、无腐蚀性、无污染。磺化油是一种交换树脂,也是一种电解质,能溶于水,在水中离解出带正电荷的阳离子 $[\text{X}]^{n+}$ 和带负电荷的阴离子 $[\text{Y}]^{n-}$,阳离子与土壤胶体表面的阳离子 $[\text{M}]^{n+}$ 产生交换作用,将这些原本吸附在土壤颗粒表面、亲水性极高的阳离子赶走,代之以亲水性较低、黏结力较强的铝离子及其水合物,从而达到将土壤改性的目的。加入 ISS 后,通过电化原理改变黏土颗粒双电层结构,能永久地将土壤的亲水性变为疏水性,土体膨胀潜势显著降低,抗剪强度和抗压缩能力大幅度提高。

(3)HEC 固化剂改良膨胀土。HEC 是一种高强耐水固体粉末状水化类固化剂,属无机水硬性胶凝材料。贺立军通过不同条件下的膨胀性试验、剪切试验、无侧限抗压强度试验等对 HEC 改良膨胀土的工程性质进行了试验研究。研究表明;HEC 固化土的物理力学性质得到大幅度提高,膨胀土膨胀潜势基本消失;HEC 可极大地提高土体的强度,且随着固化剂含量的增加,其抗剪强度逐渐增大,无侧限抗压强度也逐渐提高;HEC 固化土耐崩解性好,相同成型试件条件下,HEC 加固土的密实程度得到明显改善和提高。

(4)NCS 固化剂改良膨胀土。NCS 固化剂(New Type of Composite Stabilizer for Cohesive Soil)是一种新型复合黏性土固化材料的简称,由石灰、水泥等合成添加剂改性而成。NCS 加入填料中除具有石灰、水泥对土的改性作用处,还进一步使土粒和 NCS 发生一系列物