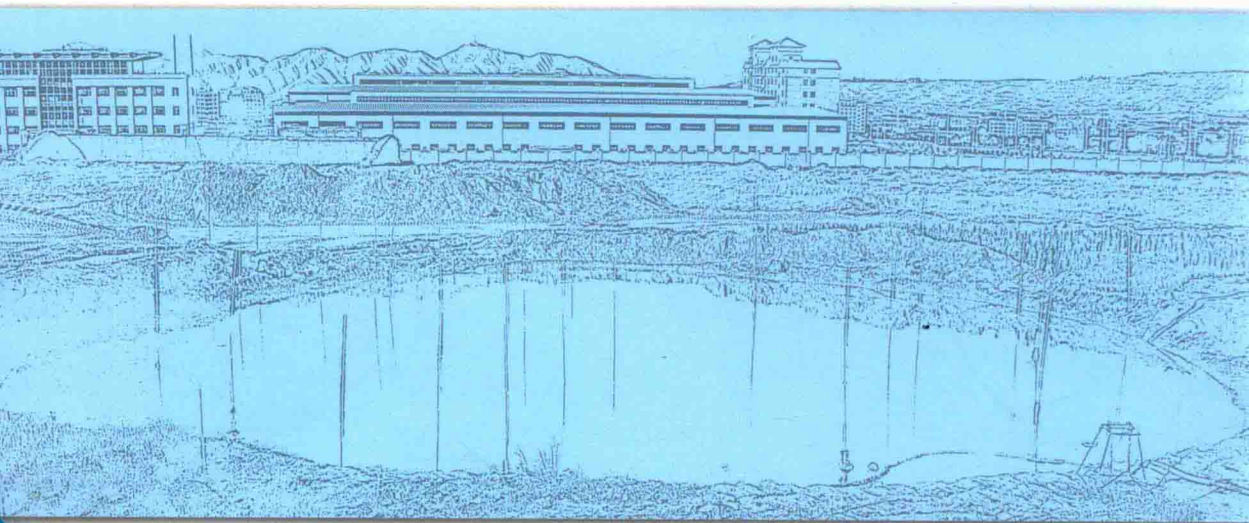


国家自然科学基金(NO. 51509257、11672330),
国防科技项目基金(NO. 2201059)资助

WATER-GAS MIGRATION AND MECHANICAL
DEFORMATION CHARACTERISTICS OF
SELF-WEIGHT COLLAPSE LOESS

自重湿陷性黄土的 水气运移及力学变形特征

姚志华 陈正汉 黄雪峰 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

国家自然科学基金(NO:51509257、11672330),
国防科技项目基金(NO. 2201059)资助出版

Water-gas Migration and Mechanical Deformation Characteristics of
Self-weight Collapse Loess

自重湿陷性黄土的水气运移 及力学变形特征

姚志华 陈正汉 黄雪峰 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书以黄土力学、非饱和土力学及弹塑性损伤理论为基础,依托于黄土地区的大型工程实践,通过现场浸水试验、室内非饱和土试验、理论建模和数值模拟等手段,着力认识自重湿陷性黄土场地的水气运移和力学变形特征。书中详细介绍了自重湿陷性黄土场地的大型浸水试验以及挤密桩处理后的自重湿陷性黄土场地深层浸水试验;通过大量的非饱和土试验,初步掌握非饱和 Q_3 原状黄土及其重塑土的渗水/渗气特性、变形、强度、屈服和水量变化等差异,并从细观角度认识加载过程中非饱和 Q_3 原状黄土的结构演化特征;提出一个非饱和原状黄土弹塑性损伤本构模型并建立考虑结构性的非饱和原状黄土弹塑性损伤流固耦合模型,编写适宜于湿陷性黄土地基的有限元计算程序,对自重湿陷性黄土的大型浸水试验开展多场耦合计算,以期明晰湿陷变形、水气运移、结构损伤等因素的相互耦合机制及其影响机理。研究成果为自重湿陷性黄土地区的工程建设可提供一定参考,也可规范修订提供一定借鉴。

本书可供土建、水利、交通等部门从事科研、设计、施工和勘察等领域的工作者使用,也可作为高等院校岩土工程专业研究生进行黄土力学方面研究的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自重湿陷性黄土的水气运移及力学变形特征 / 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018. 5

ISBN 978-7-114-14685-5

I. ①自… II. ①姚… ②陈… ③黄… III. ①湿陷性黄土—研究 IV. ①P642. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 091188 号

书 名: 自重湿陷性黄土的水气运移及力学变形特征

著 作 者: 姚志华 陈正汉 黄雪峰

责任编辑: 李 喆

责任校对: 刘 芹

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.75

字 数: 425 千

版 次: 2018 年 6 月 第 1 版

印 次: 2018 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14685-5

定 价: 60.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

前 言

黄土覆盖着 10% 的地球陆地表面,是分布较为广泛的区域性特殊土。我国黄土总面积达到了 64 万 km^2 ,约占国土面积的 6.3%,主要集中在黄河流域。一些黄土具有显著的湿陷变形特性,这类黄土也被称为湿陷性黄土。湿陷性黄土在一定压力下受水浸湿时,其结构会迅速破坏并产生显著附加下沉,这也是区别于其他特殊土的重要特征。湿陷性黄土又可分为自重湿陷性黄土和非自重湿陷性黄土,其中自重湿陷性黄土在上覆土自重压力下受水浸湿时会发生显著的附加下沉,这种特殊的力学变形特征给工程建设带来了极大危害,也往往带来较大的经济损失。

随着我国国民经济的迅速发展,中西部黄土地区的建设项目日益增多,规模越来越大,建设场地由低阶地向高阶地发展,遇到的自重湿陷性黄土层厚度也在增大,特别是大厚度自重湿陷性黄土场地。然而,以往人们对于自重湿陷性黄土的诸多关键问题还存在一些疑惑,如:水气运移特征,关键力学响应,湿陷变形规律等,这些问题也是研究人员和工程界关心的重点和难点。本书以典型自重湿陷性黄土为研究对象,通过大型现场原位浸水试验、室内非饱和土试验、理论建模和数值模拟,对其水气运移、力学特征及地基湿陷变形规律等问题展开了较为系统的研究,以期对认识复杂的黄土力学变形问题起到一定的抛砖引玉作用。

全书共分为 8 章。第 1 章,概述,主要介绍了关于黄土若干关键问题的研究进展,并提出全书的研究框架和主要内容。

第 2 章,兰州地区自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究。在甘肃省兰州市和平镇一自重湿陷性黄土厚度为 36.5 m 的场地上进行了不设注水孔的大型原位浸水试验,对场地的湿陷变形特征和水分运移规律进行实时综合观测研究。

第 3 章,自重湿陷性黄土场地剩余湿陷量和湿陷性评价的探讨。对灰(素)土挤密处理后的自重湿陷性黄土场地进行深层浸水试验,提出了自重湿陷性黄土场地的湿陷临界深度的概念;通过引入深度修正系数、扩大湿陷系数阈值及湿陷临界深度的方法,计算自重湿陷量和湿陷量,得到了一些自重湿陷性黄土湿陷性评价的新认识。

第 4 章,非饱和 Q_3 黄土的水气运移特征。研制设计一套大尺寸原状黄土试样取样设备,对大尺寸黄土试样展开非饱和和渗透试验研究。同时又以改进的三轴渗气仪为手段,进行了一系列考虑干密度、含水率和各向异性等因素影响的渗气试验,得到了非饱和原状黄土及其重塑土的渗气规律。

第 5 章,非饱和 Q_3 黄土的力学特性。利用非饱和土多功能土工三轴仪、四联直剪仪以及压力板仪等设备,进行了一系列非饱和土力学特性试验,研究和比较了非饱和 Q_3 原状黄土及

其重塑土的变形、强度、水量变化及其差异。

第6章,非饱和原状黄土的细观结构动态演化特征。对非饱和 Q_3 原状黄土进行控制吸力为常数的各向等压加载试验,借助 CT(Computed Tomography) 技术,对加载稳定后的试样进行实时动态扫描,从细观上认识原状黄土的力学变形响应,并建立加载过程中的细观结构演化方程。

第7章,考虑细观结构演化的非饱和原状黄土弹塑性损伤本构模型。以修正 Barcelona 非饱和土弹塑性本构模型为基础,以结构性损伤为切入点,提出了考虑结构性影响的非饱和 Q_3 原状黄土的弹塑性损伤本构模型(Elastoplastic Damage Model, EDM)。模型包括土骨架变形与水量变化两个方面,对加载过程和加载—湿陷过程分别进行描述。

第8章,非饱和原状黄土的弹塑性损伤流固耦合模型及其有限元应用。将建立的 EDM 模型引入到非饱和土流固耦合理论中,结合非饱和原状黄土水气运移规律,建立考虑结构性的非饱和原状黄土弹塑性损伤流固耦合模型(Elastoplastic Damage Seepage-Consolidation Coupled Model, EDSCM)。编写多场耦合有限元程序(Unsaturated Loess Elastoplastic Damage Seepage Consolidation, ULEDSC),对自重湿陷性黄土场地浸水和停水过程进行多场耦合计算,得到不同阶段的水分场、孔压场、位移场以及损伤场等变化特征,以初步揭示自重湿陷黄土地基浸水变形过程中的多场耦合响应。

本书是近些年作者们研究非饱和黄土的一些总结。依托于黄土地区的大型工程实践,着眼于探究自重湿陷性黄土地区工程建设中的一些难点问题,着力于认识自重湿陷性黄土场地的水气运移规律和力学变形特征,以期为自重湿陷性黄土地区的同类工程建设以及《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)的修订提供一定的参考,书中一些观点已被纳入新版规范中,并得到同行专家的认可。但限于作者理论水平和实践经验,书中还有诸多问题需要进一步深入研究和探讨,某些认识和结果难免存在不妥或者不足,敬请同行专家及读者见谅并不吝赐教。

国家自然科学基金青年基金项目(No. 51509257)、国家自然科学基金面上项目(No. 11672330)、国防科技项目基金(No. 2201059)和国家电网公司科学技术项目(No. SGKJJSKF[2008]656)等对本书撰写提供了资助;中国人民解放军陆军勤务学院军事土木工程系(原解放军后勤工程学院)及中国人民解放军空军工程大学机场建筑工程系为本书撰写提供了大力支持,笔者们借此特表示感谢。另外,本书也是在卢再华教授、黄海高级工程师、方祥位教授、朱元青高级工程师、李加贵博士、苗强强博士等人前期大量研究工作基础上的继续深入,在此向他们表示真诚感谢。

姚志华 陈正汉 黄雪峰

2017年9月

目 录

第1章 概述	1
1.1 湿陷性黄土的基本特征	2
1.2 湿陷性评价方法	5
1.3 非饱和黄土的渗水特性	7
1.4 非饱和黄土的渗气特性	10
1.5 非饱和土的本构模型	12
1.6 土的固结耦合理论	16
1.7 主要研究内容	18
第2章 兰州地区自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究	20
2.1 试验概况	21
2.2 湿陷变形分析	29
2.3 湿陷过程中的水分变化分析	34
2.4 场地裂缝发展规律	44
2.5 本章小结	51
第3章 自重湿陷性黄土场地剩余湿陷量和湿陷性评价的探讨	52
3.1 深层浸水试验概况	53
3.2 深层浸水试验结果分析	57
3.3 自重湿陷量的计算值	65
3.4 湿陷量的计算值	70
3.5 剩余湿陷量合理控制的探讨	72
3.6 本章小结	75
第4章 非饱和 Q_3 黄土的水气运移特征	77
4.1 非饱和黄土渗透试验概况	78
4.2 非饱和黄土的入渗特征	83
4.3 非饱和 Q_3 原状黄土的渗透系数	91
4.4 非饱和黄土渗气试验概况	93
4.5 渗气试验结果分析	100
4.6 非饱和 Q_3 原状黄土的渗气系数	112
4.7 本章小结	115
第5章 非饱和 Q_3 黄土的力学特性	116
5.1 试验概况	116

5.2	非饱和 Q_3 黄土的直剪试验	118
5.3	非饱和 Q_3 黄土的三轴收缩试验	123
5.4	非饱和 Q_3 黄土的土—水特征曲线	126
5.5	非饱和 Q_3 原状黄土的三轴湿陷试验	134
5.6	非饱和黄土本构模型参数确定	137
5.7	本章小结	142
第 6 章	非饱和 Q_3 原状黄土的细观结构动态演化特征	144
6.1	试验概况	145
6.2	基于 CT 技术的各向等压加载试验	148
6.3	结构性对非饱和黄土屈服特征的影响	154
6.4	各向等压加载过程中的结构损伤演化特征	155
6.5	本章小结	160
第 7 章	考虑细观结构演化的非饱和和原状黄土弹塑性损伤本构模型	162
7.1	非饱和土弹塑性模量矩阵	163
7.2	弹塑性应力—应变关系	166
7.3	弹塑性模量矩阵元素	170
7.4	考虑结构性影响的加载过程中的本构模型	184
7.5	考虑结构性影响的湿陷本构模型	189
7.6	模型参数的确定及模型的初步验证	191
7.7	本章小结	196
第 8 章	非饱和和原状黄土的弹塑性损伤流固耦合模型及其有限元应用	197
8.1	非饱和弹塑性损伤流固耦合模型的控制方程	198
8.2	控制方程二维坐标中的形式及离散化	203
8.3	非饱和和原状黄土弹塑性损伤流固耦合模型有限元程序	214
8.4	程序算例分析	217
8.5	数值模拟结果分析	219
8.6	讨论	236
8.7	本章小结	240
附录		241
参考文献		257

第1章 概 述

黄土覆盖着 10 % 的地球陆地表面^[1],是分布较广的区域性特殊土。我国黄土总面积达到了 64 万 km²,约占国土面积的 6.3%,以黄河流域分布为主,厚度从几十米至 400 多米不等^[2-4]。在一定压力下受水浸湿,结构会迅速破坏并产生显著的附加下沉的黄土,称为湿陷性黄土^[5,6],湿陷变形也是黄土区别于其他土的重要特征。众所周知,黄土的湿陷性给工程建设和使用带来较大的影响,湿陷造成的建筑物破坏事故不胜枚举,往往给国家和人民带来较大的经济损失^[7,8]。

随着国家经济的发展和西部大开发战略的实施,黄土地区陆续建设了一大批国家级重点工程,如宁夏扶贫扬黄灌溉工程、郑西高速铁路、天宝高速公路、宝兰客运专线、兰渝铁路等特大项目。黄土地区的民用建设项目也日益增多,规模越来越大,突出表现在建设场地由低阶地向高阶地发展,湿陷性黄土层厚度增大,特别是工程建设所遇到的自重湿陷性黄土越来越多,而厚度较大的自重湿陷性黄土往往给工程建设带来极大困难。

自重湿陷性黄土是指在上覆土的自重压力下受水浸湿,发生显著附加下沉的湿陷性黄土。汪国烈先生指出^[9],针对我国目前黄土地基处理现状,采用挤密(复合)桩等方法处理深度达到 15m 时,剩余湿陷量仍然达不到《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)^[10](以下简称《黄土规范》)的规定和要求,当桩端持力层很深,采用桩基技术经济性不合理时,这种自重湿陷性黄土场地,可称为大厚度自重湿陷性黄土场地。宝鸡第二电厂场地的自重湿陷性黄土层厚度为 23m;宁夏扶贫扬黄灌溉工程项目的 10 号、11 号及南城拐子泵站场地的自重湿陷性黄土层的厚度分别是 24~25m、30~35m 和 15~20m;兰州西固区张家台 330kV 变电所场地的自重湿陷性黄土层的最大厚度为 29.5m(平均 25m)。以往工程建设很少遇到这一类自重湿陷性黄土场地,工程人员具备的工程经验也不够丰富,因此,在这些地区进行工程建设首先要掌握其湿陷变形特征,这一问题也是科研人员和工程界急需解决的关键科学技术问题,具有较高的学术价值和实用价值。只有掌握自重湿陷性黄土的湿陷变形规律,才能更好地指导工程建设。

了解自重湿陷性黄土场地的湿陷变形规律,不能绕开自重湿陷性黄土地基的力学特征研究,这也是黄土地区工程建设者面临的难点问题。自重湿陷性黄土场地的变形问题与渗水、渗气密切相关,相互联系,因此水气运移规律的研究也是急需解决的关键问题。原状黄土的湿陷伴随着结构的破坏及损伤的产生,建立黄土的本构模型就必须考虑黄土加载和湿陷过程中结构性的演化特征,故而,建立一个考虑结构性的弹塑性本构模型更加符合黄土的力学变形特征。浸水过程中的自重湿陷性黄土地基涉及湿陷变形、水气运移和损伤演化等多场耦合,建立一个适宜于自重湿陷性黄土场地的非饱和流固耦合模型,并开发相应的计算程序显得尤为迫切。以上这些问题的研究和解决无疑为自重湿陷性黄土地区的工程建设提供试验依据和理论指导,也可以丰富和发展黄土力学。

基于此,本书通过原位试验、室内试验、理论建模和数值模拟,结合前人研究成果,寻求以往研究的不足和空白,进而对自重湿陷性黄土水气运移、力学特性及地基湿陷变形规律等关键问题展开研究。

1.1 湿陷性黄土的基本特征

1.1.1 分类和地质特征

《黄土规范》^[10]把我国湿陷性黄土分为7个区,包括陇西地区、陇东—陕北—晋西地区、关中地区、山西—冀北地区、河南地区、冀鲁地区和边缘地区。黄土分类方法有多种,工程地质分类法^[3]是以黄土的地层、年代和成因为分类依据;土力学和水工建筑学^[11]以土的颗粒组成进行分类;《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[12]以黄土的塑性指数为基础进行分类定名;《黄土规范》^[10]则以湿陷系数(δ_s)为主要指标,以0.015为界限进行划分,湿陷系数小于0.015时,为非湿陷性黄土,湿陷系数大于0.015时则划分为湿陷性黄土。

黄土按地层可分为 Q_1 (午城黄土)、 Q_2 (离石黄土)、 Q_3 (马兰黄土)和 Q_4 (黄土状土)黄土。由于各地的地理环境不同,造成黄土的地层特征及物理力学性质差异较大,一般具有肉眼可看到的大孔隙(孔隙比一般为0.8~1.2)、低含水率、灰黄色或黄色、粒度成分均一、以粉砂颗粒为主、垂直节理发育等显著特征^[5]。

1.1.2 湿陷变形机理

黄土的湿陷原因既有内在因素也有外在因素。内因主要与黄土本身的物质成分和结构特征有关,包括颗粒组成、矿物和化学成分的影响;而外因则由水和外部荷载共同作用导致^[13,14]。

黄土湿陷机理的研究主要有:毛细假说^[15]、溶盐假说^[2]、胶体不足说^[16]、水膜楔入说^[2,3]、欠压密理论^[17]、结构学说^[18]、微结构不平衡吸力成因论^[19]。

毛细假说认为,表面张力存在于相邻土颗粒孔隙中水和空气交界处,当水浸入土中后,表面张力立即消失,黄土发生湿陷。溶盐假说认为,黄土在较低含水率状态时,易溶盐呈现微结晶状态;当黄土浸湿时,易溶盐溶解,从而产生湿陷。胶体不足说认为,湿陷性黄土其粒径小于0.05mm的颗粒含量小于总体颗粒的10%。由于缺少这一部分胶体物质,黄土浸湿时颗粒不能产生膨胀来防止湿陷。水膜楔入说认为,水浸入黄土后,结合水膜变厚,从而分开原有连接的土颗粒,减弱土粒之间的引力,降低了凝聚强度,因而产生湿陷。欠压密理论认为,黄土上覆土层厚度增加而带来的压力增大不足以克服土中形成的加固内聚力,当水侵入黄土后加固内聚力消失,从而产生湿陷。结构学说主要通过对黄土的微观结构的研究来说明湿陷现象。微结构不平衡吸力成因论认为,湿陷过程就是水的楔入导致小孔隙广义吸力的逐渐丧失和大孔隙湿吸力的逐渐增大引起的微结构重建动力与重建阻力间的动态对抗过程。

黄土的湿陷现象较为复杂,用一种假说来解释黄土的湿陷显得较为牵强,每种假说都有其合理和不足的一面,因此黄土湿陷机理的研究仍待继续深入。

1.1.3 湿陷变形特征

黄土的湿陷变形主要由水和力的共同作用而产生。其湿陷变形特征主要有以下几个方面^[20]：①突变性。黄土承受外部荷载时，水和力的共同作用使之产生突变，引起较大的变形。②非连续性。通过微观试验发现，原有土骨架结构破坏和土颗粒之间的胶结作用减弱共同引发湿陷。③不可逆性。湿陷变形是土的天然结构发生破坏引起的，是不可逆的，属于塑性变形。④湿陷变形过程中软硬化效应伴生。一方面，天然结构破坏，原有强度丧失，这是软化效应；另一方面，体积压缩，形成新的结构，产生新的强度，这是硬化效应。⑤敏感性^[21]，即湿陷难易及快慢。由含水率变化引起增湿变形量变化的快慢来反映湿陷敏感性具有更大的合理性。⑥湿陷变形与压缩变形相互转换。土的初始含水率高低决定土体的压缩变形与湿陷变形特点。初始含水率低，在一定压力下的压缩变形小，湿陷变形大；当初始含水率高时，压缩变形大，湿陷变形小。当压力超过黄土的结构强度时，压缩变形大而湿陷变形小。⑦湿陷峰值，湿陷变形随着应力的增加有峰值出现。初始含水率越高的试样，湿陷峰值对应的应力越小。⑧球应力和剪应力都能导致黄土结构的破坏和湿陷，且它们对湿陷体应变和湿陷偏应变有交叉影响。

黄土的湿陷变形特征主要通过室内和现场原位试验而进行，许多研究人员就此展开了许多有益的工作，以下主要通过室内外试验研究进行简要叙述。

1) 室内试验定量研究黄土湿陷性

室内试验研究黄土湿陷变形特征受到研究人员的青睐，一方面由于试验方便快捷、试验周期短，能够定量地得到湿陷变形、湿陷系数等一系列结果；另一方面，室内湿陷试验还可以较好地反映初始含水率、初始干密度、应力状态、压实系数、细粒土含量、结构性、浸湿程度、浸湿历史和矿物成分等因素对黄土湿陷性的影响^[3]，因此，许多学者就此展开了大量的工作。刘明振^[22]、孙建中^[23]、张茂花^[24]等对黄土的增湿、减湿、间歇性浸水、多级湿陷特性进行了大量研究工作，这些研究将狭义湿陷变形发展到广义湿陷变形，狭义的充分浸水饱和后的湿陷变形只是广义湿陷变形的一种特殊情况。

陈正汉等^[20]通过试验研究认为，湿陷性黄土的本构关系还与湿度（含水率和饱和度）的变化有关，湿陷变形的大小和应力状态与含水率密切相关。张苏民等^[25]对黄土减湿和增湿的湿陷性状进行了压缩试验研究，认为湿陷性黄土预先增湿后会使湿陷变形转化为加荷变形，并提出湿陷终止压力的概念。张原丁^[26]进行了不同含水率不同压力下的黄土湿陷性试验研究。认为随着含水率的增加，湿陷量减小，且压力大时，湿陷量减小得多。胡再强^[27]对原状黄土、人工制备结构性黄土进行了不同应力水平下三轴浸水试验研究，揭示了非饱和结构性黄土的湿陷机理、显微结构与黄土湿陷性的关系。

蒲毅彬等^[28]利用 CT 技术 (Computed Tomography)，研究了陇东黄土湿陷过程中细观结构的变化规律；雷胜友等^[29]采用应变式三轴仪，对原状黄土三轴条件下浸水湿陷进行了 CT 扫描研究，分析了湿陷过程中的细观结构；朱元青等^[30]研制了一套可以控制吸力的非饱和土湿陷三轴仪，进行了净围压相同吸力不同和吸力相同净围压不同的双线法三轴湿陷试验，首次实现了应力控制状态下黄土湿陷试验并进行了湿陷过程的动态 CT 扫描；李加贵等^[31]利用 CT-三轴仪对 Q_3 黄土进行了均压浸水试验和侧向卸荷浸水试验，研究 Q_3 原状黄土的浸水湿陷特性。

CT 技术的应用,无疑为认识黄土湿陷变形规律提供了有力工具。

黄土的湿陷从一维发展到三维、从宏观感知到细观认识、从不考虑吸力的湿陷发展到考虑吸力的湿陷等,这些成果不断加深工程人员对黄土湿陷特性的认识。

2) 室外浸水试验研究黄土湿陷变形规律

现场浸水试验耗费较多的人力、物力以及时间,然而通过现场预浸水试验可以更好地把握黄土的湿陷变形规律,因此现场浸水试验也受到研究人员的高度重视。自我国引入预浸水法处理湿陷性黄土后,在认识黄土湿陷变形规律和处理黄土地基方面已经取得了诸多成果。

自 20 世纪 60 年代以来,国内学者已在陕、甘、宁、青、豫、晋等省(自治区)做了大量的现场浸水试验,《黄土规范》^[10]和文献[32]系统地总结了浸水试验方法。《黄土规范》^[10]指出:对于甲、乙类重要建筑,为了较准确地判定场地湿陷类型,应采用现场试坑浸水试验,并提出试验要求。近年来,随着工程场地黄土层厚度的增大,试坑尺寸和浸水历时也逐渐增加。

汪国烈等^[33]在兰州市东岗镇黄河南岸Ⅱ级阶地上,进行了 7 个浸水试验,对该地区自重湿陷性黄土的湿陷变形特征有了初步的认识。涂光祉等^[34,35]针对在陕西省焦化厂和渭北张桥湿陷性黄土场地进行了浸水试验,探讨了关中地区的湿陷性黄土的湿陷变化规律。李大展等^[36]在陕西蒲城电厂进行了直径为 40m 的浸水试验,研究了 Q_2 黄土场地的湿陷变形特性。该场地实测总湿陷量仅有 6.5cm,室内外试验湿陷量的对比差异性较大,被判定为非自重湿陷性黄土地基。罗宇生^[37]在宝鸡第二发电厂进行了自重湿陷性黄土厚 23m 的浸水试验,所测自重湿陷量较小,得到的自重湿陷变形规律与既有成果相似。

钱鸿缙等^[38]在河津地区布置了三个浸水试验坑,通过原位试验结果判定了该场地的湿陷类型。黄雪峰^[39,40]在宁夏固原一自重湿陷性黄土厚度大于 35m 的场地上,进行了面积为 110m × 70m 的大型现场浸水试验,揭示了大厚度自重湿陷性黄土的湿陷变形具有与中小厚度(小于 15m)自重湿陷性黄土的湿陷变形不同的特征。之后,黄雪峰等^[41,42]又针对兰州兰工坪高边坡进行了现场浸水试验,研究了水分入渗规律以及入渗对原状黄土高边坡土压力的影响,并对水分在高边坡中的入渗形态有了新的认识。

许多研究人员也在现场浸水试验确定黄土的湿陷变形规律方面做了许多类似的工作,如:李辉山等^[43]对兰州连城铝厂车间进行了浸水处理;杨庆义^[44]对晋东某国家重点大型工程进行了现场浸水试验。此外,还有一些工程人员,如:曾保刚等^[45]、任海波^[46]、马侃彦等^[47]、陈克峰^[48]、陈雯龙^[49]也针对预浸水处理黄土湿陷问题进行了系列研究,并取得了一些有益成果。然而,以往现场浸水试验研究中,Ⅰ类和Ⅱ类地区的自重湿陷性黄土地基上的现场浸水试验中水分运移和地基湿陷变形规律尚不清楚,这还需要学术界和工程界的共同努力,使之更加完善。

1.1.4 非饱和黄土的力学特征

以往土的力学特性研究主要集中在饱和土,这方面的试验和理论较为成熟。随着非饱和土与特殊土力学等热点问题的兴起,关于非饱和土力学特性的研究才逐渐展开,但总体发展速度较为缓慢,主要原因在于非饱和土试验测试技术的发展滞后。只有非饱和土试验测试技术和设备的不断发展,才能为认清非饱和土的力学特性提供有力工具,进而促进非饱和土力学与特殊土力学理论的进一步提升。



非饱和土与特殊土的测试技术和试验装备均取得了较大的进展,陈正汉^[50]在非饱和土试验仪器开发方面做了很多工作,先后研制出了非饱和土 CT-三轴仪^[51]、非饱和土固结仪和直剪仪^[52]、升级的压力板仪^[53]、多功能土工三轴仪^[54]、湿陷—湿胀三轴仪^[55]等先进非饱和土试验设备,为非饱和黄土的土—水特征曲线、强度、变形(包括湿陷变形)等深入研究提供了有力保障。

许多研究人员在非饱和黄土的力学特性这一领域中取得了诸多成果。骆亚生^[56]通过改进扭剪仪,研究了陕西杨凌非饱和黄土的动力特性,尤其是非饱和黄土在动荷载作用下的孔隙压力变化规律。陈正汉等^[57]以重塑非饱和黄土为研究对象,较为系统地研究了重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和含水率的变化特性。邢义川等^[58]以改进的真三轴仪为手段,对陕西杨凌非饱和黄土进行了试验研究,提出了非饱和土中任一点的有效应力表达式及三维应力状态下有效应力参数的确定方法。方祥位等^[59]研究了净平均压力和剪应力对重塑非饱和黄土的土—水特征曲线的影响,建立了含水率—吸力—净平均应力—偏应力形式的广义土—水特征曲线方程。李保雄等^[60]根据室内和原位测试结果,研究了不同沉积时代与含水状态下黄土抗剪强度的水敏感性特征及应力变形关系。刘海松等^[61]将非饱和黄土的结构强度研究与黄土湿陷性结合起来,提出了一些湿陷系数与黄土结构强度之间关系的有益结论。此外,张炜等^[62]、胡再强^[27]、郭敏霞等^[63]也先后在这一领域展开了大量试验研究,并取得了诸多有益的试验成果。

非饱和 Q_3 原状黄土具有天然的结构性,而重塑黄土不具有这一特性。由于结构性的原因导致 Q_3 原状黄土及其重塑土的力学特性存在较大的差异,目前这方面的研究工作还较少。弄清 Q_3 原状黄土及其重塑土的力学特性差异,也是进一步掌握 Q_3 黄土本构模型的基础,因此,有必要研究结构性对非饱和黄土力学特征的影响,这一领域亟待进一步深入研究。

1.2 湿陷性评价方法

正确认识和评价黄土的湿陷性,能有效地避免工程事故的发生,该问题也在世界各国得到了认可。由于黄土分布和特征的差异,世界各国的评价方法也存在着差异。罗马尼亚采用 300kPa 压力下浸水相对湿陷量、1.0m × 1.0m 荷载板下土体在饱和与天然状态下的沉降量比值以及沉降差等来判定黄土的湿陷性;美国先后提出用干重度、液限含水率、湿陷比、湿陷势来评价黄土的湿陷性;苏联采用相对湿陷系数 δ_{mp} 计算可能湿陷量;阿根廷以双线法为基础来评价黄土的湿陷性;我国总结所取得的成果和实践经验,先后制定了 1966 年、1978 年、1990 年、2004 年版《湿陷性黄土地区建筑规范》,新版规范也即将出版^[64],其根据湿陷系数和自重湿陷系数计算相应的湿陷量和自重湿陷量来划分场地的湿陷性,进而判断地基的湿陷等级。

1.2.1 黄土湿陷性的测定

黄土的湿陷性是在一定应力(即上覆土的饱和自重应力或上覆土的饱和自重应力与附加应力)作用下受水浸湿后,结构迅速破坏,发生显著附加下沉的特性。由于受荷载条件的不同,湿陷变形又可分为自重湿陷变形(仅在上覆土的饱和自重应力作用下)和外荷湿陷变形(在土的饱和自重应力与附加应力共同作用下)。黄土可根据湿陷性分为自重湿陷性黄土和非自重湿陷性黄土。黄土有无湿陷性,可按室内压缩试验在一定压力下测定的湿陷系数 δ_s 来

判定。 δ_s 的表达式为:

$$\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \quad (1.1)$$

式中: h_p ——保持天然湿度和结构的土样,加压至一定压力时,下沉稳定后的高度(mm);

h'_p ——上述加压稳定后土样,在浸水(饱和)作用下下沉稳定后的高度(mm);

h_0 ——土样的原始高度(mm)。

当 $\delta_s < 0.015$ 时,应定为非湿陷性黄土; $\delta_s \geq 0.015$ 时,应定为湿陷性黄土。《黄土规范》^[10]规定,测定湿陷系数的压力自基础底面下算起(初勘时自地面下 1.5m 起算);深度小于 10m,压力为 200kPa,基底压力大于 300kPa 时,用实际压力;对压缩性大的新近堆积土,基底下 5m 用 100 ~ 150kPa 压力;基底下 5 ~ 10m 以至到非湿陷性土层顶面,压力为 200kPa,若基底压力大于 200kPa,以上覆土饱和和自重压力为试验压力。

在上覆土饱和和自重压力下,有些黄土会产生附加下沉,下沉的大小可用自重湿陷性系数 δ_{zs} 表示,按下式计算:

$$\delta_{zs} = \frac{h_z - h'_z}{h_0} \quad (1.2)$$

式中: h_z ——保持天然湿度和结构的土样,加压至该试样上覆土的饱和和自重压力时,下沉稳定后的高度(mm),计算饱和和自重压力时,饱和度取 85%;

h'_z ——上述加压稳定后土样,在浸水(饱和)作用下,附加下沉稳定后的高度(mm);

h_0 ——土样的原始高度(mm)。

通过室内压缩试验获得湿陷性系数和自重湿陷性系数,通常采用单线法和双线法,单线法复杂,双线法相对简单。单线法物理意义更为明确,符合实际工况,对试验结果进行修正时,以单线法为准修正饱和和试样各级压力下的稳定高度;双线法试样中天然湿度试样在最后一级压力下的下沉稳定高度通常不一致,需要进一步修正。然而,室内压缩试验加载方式、边界条件与现场存在较大差异,这也是室内外试验结果不一致的重要原因。

1.2.2 黄土场地的湿陷类型和等级

由于湿陷性黄土的特殊性,关于湿陷性评价的方法不能完全符合实际,研究人员应不断追求探索新的方法。根据大量的试验资料和工程实践可知,西部黄土湿陷性高,计算自重湿陷量一般较大,却低于实际的室外现场试验实测值;中部地区自重湿陷量实测值与室内试验相当;而东部地区自重湿陷量往往较小,但高于实际的室外现场试验实测值。因此,通过计算自重湿陷量来划分场地湿陷类型,也常常给工程人员带来诸多困扰。

《黄土规范》^[10]规定,对自重湿陷黄土自重湿陷量的计算值 Δ_{zs} 可按式计算:

$$\Delta_{zs} = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad (1.3)$$

式中: δ_{zsi} ——第 i 层土的自重湿陷系数;

h_i ——第 i 层土的厚度(cm);

β_0 ——因地区而异的土质修正系数,对陇西地区可取 1.50,对陇东、陕北、晋西地区可取 1.20,对关中地区可取 0.90,对其他地区可取 0.50。



自重湿陷量 Δ_{zs} 的累计计算,自天然地面(当挖、填方的厚度和面积较大时,自设计地面)算起,至其下全部湿陷性黄土层的底面为止,其中 $\delta_{zs} < 0.015$ 的土层不累计。自重湿陷性黄土场地的湿陷类型,按实测自重湿陷量或自重湿陷量的计算值(以下简称自重湿陷量)判定。实测自重湿陷量应根据现场试坑浸水试验确定,当实测或计算自重湿陷量 $\leq 70\text{mm}$ 时,应定为非自重湿陷性黄土场地;当实测或计算自重湿陷量 $> 70\text{mm}$ 时,应定为自重湿陷性黄土场地。

受水浸湿饱和至下沉稳定为止的湿陷量的计算值 Δ_s ,可按下式计算:

$$\Delta_s = \sum_{i=1}^n \beta \delta_{si} h_i \quad (1.4)$$

式中: δ_{si} ——第 i 层土的湿陷系数;

h_i ——第 i 层土的厚度(mm);

β ——考虑地基土的侧向挤出和浸水概率等因素的修正系数,基底下 $0 \sim 5\text{m}$ (或压缩层)深度内可取 1.5 , $5 \sim 10\text{m}$ 深度可取 1.0 , 10m 以下取工程所在地区的 β_0 值。

需要注意, 10m 以下湿陷系数 δ_s 取自重湿陷系数 δ_{zs} ,目的是为了了解决 10m 以下饱和自重压力与 300kPa 测定的 δ_s 不一致的矛盾。系数 β 是根据各地实测湿陷量与计算湿陷量的比值确定的。主要是因室内外试验方法不同而引起的,因为室内试验有侧限,起到约束作用,没有侧向挤出,而野外荷载试验及大面积浸水试验是在半无限地基上进行,侧向挤出较明显。

湿陷性黄土地基的湿陷等级,应根据基底下各土地层累计的总湿陷量和计算自然自重湿陷量的大小等因素加以判定。湿陷性黄土地基的湿陷等级越高,地基浸水后可能产生的湿陷量越大,对建筑物的危害性也越大,因此设计措施的要求也越高。为此,新版《黄土规范》^[64]在进行湿陷量计算时,增加了一个浸水概率系数,一定程度上解决了湿陷量计算值和实测值不匹配的现象。对特殊要求的建筑物,应在原位进行试坑浸水试验,用实测自重湿陷量来判定湿陷类型。建筑实践证明,按实测自重湿陷量划分场地湿陷类型,比按计算自重湿陷量划分准确可靠^[65]。然而,为获得实测值却需要花费很大的人力、物力、财力。

在黄土湿陷性评价方面,新版《黄土规范》^[64]对湿陷系数、自重湿陷系数及湿陷起始压力的测定,以及实测或计算自重湿陷量、总湿陷量的计算、建筑场地和地基的评价等方面均做了详细而严密的规定。但在规范的使用上,各地的具体状况不同,而且针对隧道、公路、地铁等湿陷性评价仍需要进一步补充与完善。

1.3 非饱和黄土的渗水特性

在以往的研究中,饱和土的渗透系数研究已比较成熟,岩土、公路和水利等各类规范对其做了详细的介绍;而非饱和土由于基质吸力的存在,不能用常规的饱和土试验方法确定其渗透系数,使得非饱和土渗透系数的研究存在一定的难度,这也是研究非饱和土渗透特性及渗流特征难度较大的主要原因之一^[66]。非饱和土渗透系数一般采用试验直接测定和间接计算获得。

1.3.1 试验直接测定非饱和土渗透系数

获取非饱和土渗透系数需进行现场原位试验或室内试验。两种试验方法各有所长,现场试验与实际工况吻合较好,因而受到广泛青睐,然而该方法现场边界条件复杂且试验设备要求

高,也是研究人员回避的一个问题。室内试验结果较为可靠、方法简单,因此,许多研究人员通过该途径来测定非饱和土的渗透系数。

现场和室内试验研究方法主要基于稳态法^[67]、瞬态剖面法^[68]、零通量平面法^[69]等。采用较为广泛的应属稳态法和瞬态剖面法。徐永福等^[70](2005年)采用稳态法,对黏土的非饱和土渗透系数进行了测定,试验结果较为理想。Cui等^[71]应用瞬态法对3个不同含水率条件下的膨润土加砂混合材料的非饱和土渗透系数进行了测定。

室内试验还有一些试验方法也广为采用,如:长柱法^[72]、水平土柱实验法^[73]和蒸发试验法^[74]等。王文焰等^[75]、陈正汉等^[76]、张建丰^[77]、马娟娟等^[78],采用水平土柱试验方法,利用 γ 射线透射获得含水率,系统地研究了非饱和黄土的水分运移参数。Mbonimpa等^[79]、苗强强等^[80]利用垂直和水平土柱进行非饱和土渗水系数的测定。

戴经梁等^[81]通过室内一维土柱入渗试验,得到不同压实度下黄土的积水入渗规律;高永宝等^[82]用水—气运动联合测试仪对一定含水率不同干密度的黄土做了大量的试验,研究了干密度对渗水系数的影响;刘奉银等^[83]使用自研的非饱和土水气联合测定仪,提出了3种渗水稳定时间判定方法及3种渗水驱动势的计算方法。这些有益的工作无疑对非饱和土渗透系数的研究起到了一定的推动作用。

1.3.2 理论公式计算获得非饱和土渗透系数

直接测量非饱和土渗透系数通常较为困难,因此许多研究人员试图从非饱和土的渗透系数与体积含水率之间的关系,通过土—水特征曲线或者分形理论把非饱和土的渗透系数转化为基质吸力的函数,或者建立非饱和土的渗透系数与分形函数的联系,从而较为简单地研究非饱和土的渗透系数^[84]。

Van Genuchten^[85]、Khaleel^[86]和Wagner^[87]等人直接将非饱和土渗透系数与土—水特征曲线联系起来,建立经验公式,直接应用这些公式计算非饱和土的渗透系数。Gardner^[88]应用稳态法进行非饱和土的入渗试验,提出了非饱和土渗透系数与吸力之间的计算公式,即:

$$K = K_{\text{sat}} \cdot \exp(\alpha\psi) \quad (1.5)$$

Arbhabhirama等^[89]建立了非饱和土渗透系数 k_w 与饱和土渗透系数 k_s 及基质吸力 ψ 的函数关系式如下:

$$k_w = \frac{k_s}{\left[1 + \left(\frac{s}{s_0}\right)\right]^a} \quad (1.6)$$

Shouse等^[90]和Leong E C等^[91]根据试验建立了与式(1.6)相似的非饱和渗透系数计算公式,分别如式(1.7)和式(1.8)所示。

$$K(h) = \frac{K_{\text{sat}}}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_c}\right)^n\right]} \quad (1.7)$$

$$k_w = \frac{k_s}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{s}{A}\right)^B\right]\right\}^C} \quad (1.8)$$



Zhuang 等^[92]将单参数 Brooks 和 Corey 模型^[93]代入 Miyazaki^[94]基于 NSMC 概念 (Non-Similar Media Concept) 提出的饱和土渗透系数计算模型中,从而得到一个非饱和土渗透系数 $K_{us}(\theta)$ 的计算方法,即:

$$K_{us}(\theta) = K_s \left[\frac{(\tau \rho_s / \rho_{ub})^{1/3} - 1}{(\tau \rho_s / \rho_b)^{1/3} - 1} \right]^2 \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b} \quad (1.9)$$

刘海宁等^[95]根据土—水特征曲线与渗透函数的关系,推导出 Mualem 渗透方程的具体形式,即:

$$k = k_s \cdot \sqrt{\frac{\theta_w}{\theta_s}} \cdot \left(\frac{\theta_w - \theta_{umax}}{\theta_{umin} - \theta_{umax}} \right)^2 \quad (1.10)$$

Li 等^[96]自研了一套能够用湿润锋运动计算非饱和土渗水系数的仪器,根据湿润锋运动速度、某一段土样含水率变化和吸力变化数值来确定出非饱和土的渗水系数,并提出相应的计算方法,即:

$$k_{ave} = \frac{[\theta(h_B, t_1) + \theta(h_B, t_2) - 2\theta_i] \gamma_w v^2 (t_2 - t_1)}{2[\psi(h_B, t_1) - \psi(h_B, t_2) - \gamma_w v (t_2 - t_1)]} \quad (1.11)$$

Salloom^[97]利用土—水特征曲线中 VG 模型^[85]、Brooks 和 Corey 模型^[93]与 Mualem^[98]和 Burdine^[99]孔隙大小分布模型互相组合,研究了裂隙黏质壤土的非饱和土渗透系数。Assouline 等^[100]提出了一个双参数土—水特征曲线,通过试验得到了非饱和土渗透系数计算公式,即:

$$K_r(S_e) = \sqrt{S_e} \left[\frac{\xi^{-\frac{1}{\eta}} \eta^{-1} \gamma(\eta^{-1}, \xi a) - |\psi^{-1}| e^{-\xi a} + |\psi_L^{-1}|}{\xi^{-\frac{1}{\eta}} \eta^{-1} \Gamma(\eta^{-1}) + |\psi_L^{-1}|} \right]^2 \quad (1.12)$$

从试验数据拟合结果来看,要优于 Brooks、Corey 模型和 VG 计算模型,但该模型形式极为复杂,推广应用较为困难。

还有一些研究人员,如:Dexter^[101]、Poulsen^[102]、Eching^[103]、Li^[104]和 Fujimaki^[105]等均在这一领域展开了诸多有益工作。利用土—水特征曲线研究非饱和土的渗透系数已经较为成熟,是较为流行的间接计算非饱和土渗透系数的有效方法。

分形理论也是计算非饱和土渗透系数的常用方法,Rieu 等^[106]建立一个基于分形理论的非饱和土渗透系数计算公式(1.13),很好地预测了非饱和沙土的渗透系数。

$$k_w = \frac{\rho_w g}{12\mu} (\beta_r \sum_{i=1}^{n-1} P_j^2 G^j) \quad (1.13)$$

Crawford 等^[107]在 Rieu 等的模型中^[106]引入了一个分形维数,得到另外一个基于分形理论的非饱和土渗透系数计算公式,即:

$$k_w = \theta_w^{(R-1)} \left[3 + 2 \left(\frac{\rho_m}{d_s} \right) D_m \right] \left[\frac{1}{D_m} - 3 \right] \quad (1.14)$$

Xu 等^[108]利用土体孔隙的分形模型研究了非饱和土的渗透系数计算公式,即:

$$k_r = \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{3D-11} \quad (1.15)$$

并与 VG 模型的土—水特征曲线预测数据进行了对比,证实了该模型的可靠性。还有一些研究人员,如:Millington 等^[109]、Marshall 等^[110]、Toledo 等^[111]、孙大松等^[112]、张学礼^[113]等基于分形理论研究了非饱和土渗透系数的分形模型。然而分形理论还处于半经验状态,导致该种算

法具有一定的不确定性,这还需要研究人员今后的努力,使其较为成熟。此外,除以上两种预测办法外,还有人用统计模型来预测非饱和土的渗透系数,如: Fredlund^[114]、Asus^[115]、叶为民^[116]等在该领域做了一定的尝试。然而,这些理论公式是否适宜于多孔隙、竖向节理发育的原状黄土,还需要进一步深入探讨。

1.4 非饱和黄土的渗气特性

渗气系数表示气体在土中运移的能力,也是土结构和水分运移规律的客观反映。渗气系数在固体废物填埋、饱和土和非饱和土渗流等多方面、多领域中得到了广泛应用。渗气特性是土结构孔隙分布特征一项重要判断依据,气体在土中运移首先占据较大孔隙和孔洞。渗气系数可以反映土结构及其变化、孔隙尺寸、饱和土渗水系数等^[117]。

Corey^[118]认为饱和度降低到85%左右或更低时,气相变成连续的,非饱和土中空气流动从该点开始。Mayas^[119]通过试验得到当饱和度大于90%左右时,气相变成封闭的,空气流动变成通过孔隙水扩散的过程。压实方法同样影响实测透气性系数^[67],同一密度动力压实透气性系数要比静力压实的高。在接近最优含水率时,透气性系数急剧降低。在最优含水率以上,气相变成封闭的,同时空气通过水扩散而发生流动。

渗气系数受众多因素制约,许多学者在这一领域做了很多工作。Juca等^[120]、Sanchez-Giron等^[121]、Moldrup等^[122]、Samingan等^[123]、Kamiya等^[124]、Dexter等^[125,126]分别研究了饱和度、含水率、充气孔隙度、基质吸力、干湿循环过程、有机碳含量等因素对渗气系数的影响。Moon等^[127]认为,最小渗气系数与最优含水率存在一一对应关系。

1.4.1 试验实测渗气系数

室内试验获取渗气系数,可以采取不同的试验方法。Li等^[128]采用变水头方法取得了沥青的渗气系数;Springer等^[129]采用常水头试验方法获得渗气系数。常水头法操作方便,方法简单易行,而变水头法在渗气系数测定上不经常使用,主要由于其操作较为复杂。

Stonestrom等^[130]认为,渗气系数不仅与饱和度有关,而且与饱和度历史状况有关。同样的饱和度增湿和干燥土样,增湿土样的渗气系数要大于干燥土样。王永胜等^[131]讨论了干重度与含水率各单因素在较大范围内变化时非饱和土渗气系数的变化规律,分析了干重度较小时渗气系数出现的逆反现象的原因,并认为Darcy定律与Fick定律同时能够描述非饱和土中气体的渗流运动,但Darcy定律更方便。

陈正汉等^[76]对陕西关中压实黄土进行渗气试验,得到平均渗气系数与孔隙率之间的关系如下:

$$\lg \bar{k}_a = 3.2234 + 15.3755 \lg n \quad (1.16)$$

同时也证实了非饱和压实土的渗气规律完全可用达西定律描述,土的密度对渗气性有显著影响,而湿度对渗气性的影响不大。

Olson等^[132]用室内、室外试验以及模型计算等三种方法测得非饱和原状土的渗气系数,且三种方法结论差异很小;分析了含水率以及原状土各向异性对渗气系数的影响。Bouazza等^[133]自研设备对土工合成黏土进行了渗气试验,并采用利用气体流量计计算气体体积的试验方法,试验主要侧重含水率对渗气规律的影响,同时也发现预水化养护过程也对渗气系数造