

公路膨胀土地基与基础

Expansive Soil Foundations of Highway

章为民 王年香 著

中国建筑工业出版社

公路膨胀土地基与基础

章为民 王年香 著

中国建筑工程出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

公路膨胀土地基与基础/章为民, 王年香著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 11
ISBN 978-7-112-18524-5

I. ①公… II. ①章…②王… III. ①公路路基-膨胀土地基-研究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 234044 号

本书介绍了国内外公路膨胀土地基与基础研究现状和作者近 10 年的研究成果, 论述了公路膨胀土地基与基础性状和技术对策, 全面系统地反映了我国公路膨胀土地基与基础理论和技术的最新研究成果。全书共分 6 章, 内容主要包括中国公路膨胀土概况与病害处治、膨胀土变形和强度特性试验研究、公路膨胀土地基与基础大型模型试验研究、公路膨胀土地基与基础离心模型试验研究、公路膨胀土地基与基础非饱和土理论分析、公路膨胀土地基与基础现场试验研究。

全书内容丰富, 理论性、先进性、实用性和可操作性强, 可供从事膨胀土公路、铁路、水利及其他土建工程科研、设计、施工、监理、建设的工程与管理技术人员参考, 也可作为高等院校相关专业的教师、研究生学习参考。

责任编辑: 王 梅 辛海丽

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 党 蕾

公路膨胀土地基与基础

章为民 王年香 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

北京红光制版公司制版

北京盈盛恒通印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{3}{4}$ 字数: 392 千字

2015 年 11 月第一版 2015 年 11 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-18524-5

(27702)

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)

前 言

膨胀土是一种富含亲水矿物成分、具有显著的吸水膨胀和失水收缩两种变形特性的非饱和特殊土,分布十分广泛。膨胀土对气候环境变化特别敏感,在干湿循环作用下,体积反复胀缩,强度急剧衰减,土体极易崩析,对各类工程的浅表层轻型结构具有极大的危害。膨胀土地区的公路工程几乎是“逢堑必崩,无堤不塌”,且这种破坏作用往往具有多发性和反复性,长期潜在地威胁着公路工程的安全。

全书共分六章。第一章阐述了膨胀土的判别与分类方法,着重介绍了中国主要省区公路膨胀土概况与病害处治技术。第二章介绍了膨胀土变形和强度特性试验研究所取得的系列成果,揭示了膨胀土的胀缩机理和强度衰减规律以及改良膨胀土的改良效果、时间效应和长期水稳定性,提出了膨胀土膨胀模型。第三章介绍了公路膨胀土地基与基础大型模型试验研究所取得的系列成果,揭示了膨胀土浸水膨胀变形、挡墙膨胀压力、地基和桩基础承载特性的变化规律,提出了膨胀土地基膨胀变形、挡墙膨胀压力和桩基的计算方法。第四章介绍了公路膨胀土地基与基础离心模型试验研究所取得的系列成果,阐述了雨水入渗条件下膨胀土路基边坡的变形和破坏性状,以及桥涵地基的变形和受力性状,分析了膨胀土挡墙土压力的变化规律。第五章介绍了非饱和土简化固结理论与有效应力折减吸力理论在公路膨胀土地基与基础中的应用,阐述了雨水入渗条件下膨胀土边坡裂缝开展和破坏过程,揭示了膨胀土路基稳定、变形与老化的变化规律,提出了非饱和土压力的变化规律。第六章介绍了公路膨胀土地基与基础现场试验研究成果,完善了膨胀土路堤改良和处治的施工工艺和质量标准检测方法,获得了桥台、灌注桩、涵洞、挡土结构等地基基础的受力和变形实测结果。

本书第一章由王年香、章为民编写,第二章由章为民、王芳编写,第三章由王年香、章为民编写,第四章由任国峰、顾行文编写,第五章由陈铁林、米占宽编写,第六章由朱群峰、苏冬林编写,全书由王年香统稿。参与本书研究工作的还有研究团队的许多同志,凝聚了他们的心血与智慧,同时参考和引用了国内外许多专家学者的研究成果和资料,在此表示诚挚的谢意。

本书针对公路膨胀土地基与基础的特点,既突出了理论性和先进性,又有实用性和可操作性,注重理论与实践相结合,以满足有关教学、科研、设计、施工、监理、建设的工程与管理技术人员的需要。

本书得到南京水利科学研究院出版基金的资助,中国建筑工业出版社的王梅、辛海丽两位策划编辑为本书的出版做了大量艰辛、细致的工作,在此作者非常感激,并向支持该书出版的各位领导表示衷心的感谢。

膨胀土的基础理论、试验方法和工程技术发展很快,加之作者水平有限,书中定有不足甚至谬误之处,敬请各位专家和广大读者批评指正。

目 录

第一章 中国公路膨胀土概况与病害处治	1
第一节 概述	1
第二节 膨胀土的判别与分类	3
第三节 广西公路膨胀土概况与病害	11
第四节 云南公路膨胀土概况与病害	19
第五节 河南膨胀土概况	23
第六节 四川公路膨胀土概况	25
第七节 陕西膨胀土概况与病害	32
第八节 湖南公路膨胀土概况与病害	35
第九节 湖北公路膨胀土概况	39
第十节 江苏公路膨胀土概况	41
第十一节 公路膨胀土地基与基础病害处治实例	41
第二章 膨胀土变形和强度特性试验研究	52
第一节 膨胀土胀缩变形特性试验研究	52
第二节 膨胀土强度特性试验研究	59
第三节 膨胀土的胀缩机理与膨胀模型	67
第四节 膨胀土改良试验研究	75
第三章 公路膨胀土地基与基础大型模型试验研究	86
第一节 大型模型试验方法	86
第二节 膨胀土地基浸水膨胀变形规律	90
第三节 膨胀土挡墙膨胀压力规律	100
第四节 膨胀土地基承载变形特性	107
第五节 膨胀土中的桩基础	110
第四章 公路膨胀土地基与基础离心模型试验研究	123
第一节 土工离心模型试验技术	123
第二节 膨胀土路基离心模型试验研究	129
第三节 膨胀土地基桥涵离心模型试验研究	140
第四节 膨胀土挡墙土压力离心模型试验研究	147

第五章 公路膨胀土地基与基础非饱和土理论分析	157
第一节 引言	157
第二节 非饱和土固结理论	158
第三节 非饱和土简化固结理论	164
第四节 非饱和膨胀土土压力计算	170
第五节 非饱和土边坡简化固结理论数值分析	176
第六节 膨胀土路基边坡变形与稳定计算分析	188
第六章 公路膨胀土地基与基础现场试验研究	198
第一节 宁淮路膨胀土路基改良现场试验研究	198
第二节 宁淮路膨胀土地基桥台现场试验研究	204
第三节 南友路膨胀土路堤改良和处治试验研究	216
第四节 南友路膨胀土地基构造物现场试验研究	224
第五节 呼集路膨胀土边坡治理现场试验研究	229
参考文献	235

第一章 中国公路膨胀土概况与病害处治

第一节 概 述

膨胀土是现代工程地质和土力学中出现的较新的专业技术名词,指“土中矿物成分主要由亲水矿物组成,同时具有显著的吸水膨胀和失水收缩两种变形特性的黏性土”。膨胀土是一种具有特殊膨胀结构的黏性土,黏粒含量较多,主要矿物成分为次生黏土矿物蒙脱石和伊利石,外观多呈褐色、棕色、红色、黄色、灰白色和灰绿色,液限、塑限和塑性指数均较大。天然状态下膨胀土一般处于硬塑的非饱和状态,强度很高,土质细腻、有滑感,含钙质结核或铁锰结核,斜交裂隙和光滑面发育,呈碎粒状或鳞片状。遇水则迅速吸水膨胀软化,强度降低,失水收缩开裂。具有较大的往复胀缩性,常给工程建设带来严重灾害。

膨胀土是一种区域性土,通常位于干旱或半干旱地区,在世界上分布十分广泛,世界六大洲中的 40 多个国家都有分布。我国是世界上膨胀土分布最广、面积最大的国家之一,自 20 世纪 50 年代以来,我国各地先后发现膨胀土危害的地区,已达 20 余个省、市、自治区,遍及西南、中南、华东,以及华北、西北和东北的一部分,广泛分布在从黄海之滨到川西平原,从雷州半岛到华北平原之间的狭长地带。根据各地资料和国内历次有关膨胀土会议的文件记载,我国已陆续发现有膨胀土的省区主要有:云南、贵州、四川、陕西、广西、广东、湖北、河南、安徽、江苏、山东、山西、河北、吉林、黑龙江、新疆、湖南、江西、北京、辽宁、甘肃、宁夏及海南等。

膨胀土的工程问题是 1938 年美国垦务局在俄勒冈的一座钢制倒虹吸管基础工程中首先认识并报道的,此后,随着人类活动的不断扩展,越来越多和膨胀土有关的问题进入了工程人员的视野,全球数十个国家相继报道了膨胀土造成危害的相关报告。据 Nelson 和 Miller 以及 Steinberg 等人统计,众多报道过膨胀土工程事故的国家中,以美国、澳大利亚、南非、印度、加拿大、中国和以色列等国尤为突出。美国工程界称膨胀土是“隐藏的灾害”,日本称膨胀土是“难对付的土”、“问题多的土”,我国也曾将膨胀土看作“坏土”。以我国为例,诸多工程中都出现过因膨胀土问题引起的事故。铁路工程中,南昆线、京九线、西南线、石长线、襄渝线等铁路干线都出现过不同程度的膨胀土地基边坡病害,穿越膨胀土的铁路素有“逢堑必崩,无堤不塌”之说。公路工程中,云南楚大路、湖北孝感襄樊高速公路、山东曲荷高速公路等都遇到过膨胀土问题,国道上海—瑞丽、衡阳—昆明、二连浩特—河口等公路都有数百公里里程将穿越膨胀土分布地区。水利工程中,澄碧水库溢洪道进水渠、那板水库北干渠、新疆引额济克工程总干渠、鄂北岗地 11 条主渠道等都出现过多处膨胀土坡滑坡现象;南水北调中线工程,经过膨胀土地区的渠段累计长达 387km,其中强膨胀土段长约 21km,中等膨胀土段长约 126km,弱膨胀土段长约 240km,

挖方渠段长约 180km, 最大挖深达到 49m, 有相当部分填方高度超过 10m, 为保证工程建设的顺利进行, 已投入大量人力、物力、财力对渠道沿线膨胀土进行专门研究并已取得一批成果。工业与民用建筑工程中, 湖北郧县新城、汉中盆地某厂、广东茂名等都出现过房屋、厂房变形开裂甚至倒塌等问题, 据不完全统计, 在膨胀土地区修建的各类工业与民用建筑物因胀缩变形而损坏或破坏的有 1000 万 m^2 。总而言之, 膨胀土给我国的铁路、交通、水利、工民建等工程都带来了严重的灾害, 造成的经济损失也非常巨大。如南昆铁路运营以来, 每年的膨胀土路堤、边坡灾害处治及维修费用达 3000 万元左右; 襄渝铁路由于膨胀土灾害, 每公里造价提高 91.64 万元; 焦枝铁路 212km 的膨胀土路基, 1972~1978 年间, 仅防洪工程费一项就支出 6.5 亿元; 云南楚大高速公路一处 353m 长的膨胀土路堑整治耗资 1000 余万元; 湖北郧县为避丹江口水库淹没而迁城于汉江的二级阶地, 六年后新城由于膨胀土地基的危害, 30 万 m^2 的房屋中有 90% 以上变形开裂, 无法使用; 汉中盆地某厂, 因连续几年发生膨胀土滑坡, 使建筑物变形开裂及倒塌多次。据统计, 我国有 3 亿以上人口生活在膨胀土分布地区, 每年因膨胀土造成的经济损失估计在 150 亿美元以上。在美国, 1998 年据 Steinberg 统计, 膨胀土每年给美国带来的经济损失约 100 亿美元, 比洪水、地震、飓风和龙卷风造成损失总和的两倍还多, 是美国最严重的自然灾害。在苏丹, 1983 年据 Osman M A 以及 Charlie W A 等人统计, 全国 260 万平方公里国土面积中, 三分之一以上区域内分布有膨胀土, 每年为膨胀土灾害所花的费用保守估计超过 16 亿苏丹第纳尔。

由于膨胀土带来的巨大危害, 膨胀土工程问题已成为一个世界性的研究难题, 各国科技人员和工程人员都高度重视膨胀土问题。美国于 1959 年在科罗拉多州召开首次膨胀性黏土全国性学术会议, 自 1959~1977 年, 英国、美国、罗马尼亚、苏联和日本都先后组织力量专门研究膨胀土工程性质, 并相继在正式颁布的土工规范和铁路规范等文件中, 增列了有关膨胀土的条文内容, 由此在国际上形成了一个膨胀土研究的热潮。首届国际膨胀土会议也在此期间于 1965 年在美国召开, 此后每四年召开一次, 一共召开了七次, 此后随着非饱和土力学的兴起和成熟而被国际非饱和土会议代替, 国际工程地质大会、国际土力学及基础工程大会以及许多地区性的国际会议都将膨胀土工程问题列为重要的议题。这一阶段主要是针对工程中出现的膨胀土工程问题研究膨胀土的工程性质。20 世纪 70 年代中后期起, 国际上兴起研究非饱和土特性的热潮, 1993 年, Fredlund D G 和 Rahardjo H 合作发表出版了《非饱和土土力学》一书, 是非饱和土力学研究史上的里程碑, 标志着非饱和土力学基本理论框架的建立。人们开始在非饱和土力学理论的指导下来研究膨胀土问题, 为膨胀土研究提供了一条新的途径。

我国最早遇到膨胀土是在 20 世纪 50 年代初, 最初是在修建成渝铁路工程中遇到成都膨胀黏土的危害, 后来又出现很多膨胀土地区房屋开裂和倒塌事故, 一些用膨胀土筑坝的工程出现了裂缝、漏水以及滑坡等危害, 这些问题当时就引起了我国工程科技人员的注意并对膨胀土展开了研究。当时的研究主要集中于膨胀土的分类判别、试验方法、变形特性以及膨胀土筑坝标准等, 在膨胀量和膨胀力及其影响因素方面有不少成果, 后来还发展到将膨胀力和吸力联系起来。20 世纪 70~80 年代, 我国开展了大规模的膨胀土普查工作, 选择了若干科学研究试验基地, 建立了长期观测网, 积累了丰富的资料, 取得了一批成

果。铁路部门针对我国中西部地区数量众多的新建铁路膨胀土边坡失稳问题,将“裂土的工程性质及其在铁路工程中的应用技术条件研究”项目列为重点科研项目,对裂土(膨胀土)的基本性质、测试方法、判别标准、填筑条件和处理措施等进行了多方面的试验研究。水电部门于1978年修订的《土工试验规程》和铁道部门于1980年制订的《铁路路基工程技术暂行规定》都增列了膨胀土项目,《膨胀土地区建筑技术规范》GBJ 112—87和《膨胀土地区营房建筑技术规范》也在20世纪80年代制定并实施。建工部门于1975年在南宁召开了第一次全国膨胀土会议,随后于1977年在泰安又召开了一次,铁路系统也连续三次组织召开了全国膨胀土(裂土)工程学术会议。20世纪90年代以来,在我国掀起一个膨胀土研究的新热潮,无论在研究广度还是在深度上都是空前的。非饱和土理论被引入到膨胀土研究当中,我国学者在本构关系、吸力、土水特征曲线以及固结理论等方面作出了贡献。1994年,在武汉召开了“中加非饱和土学术研讨会”,截止到2005年4月,我国相继召开了两届全国非饱和土学术研讨会。

由于其不良工程特性导致的工程问题和地质灾害的频繁发生,膨胀土问题一直是岩土工程、地质工程领域中世界性的重大工程问题之一。岩土工程科学工作者们和工程师们从不同的角度、通过不同的途径进行了大量关于膨胀土的成因、分布、物理化学性质等方面的研究和探讨,采用不同的理论和方法来解释和论证膨胀土的工程特性,并针对不同的工程问题提出了各种病害的防治措施。但对膨胀土的认识、分析和处理涉及一系列的理论和工程技术,从研究的深度和工程应用的角度而言,至今仍有许多问题没有解决。例如:非饱和土理论解决工程实际问题还有大量的工作要做,如何准确地评价各种膨胀土的力学性质及公路构造物工程特性,公路构造物与膨胀土地基的相互作用特性,构造物地基与基础的变形、应力状态以及构造物膨胀土地基基础的稳定特性,膨胀土地基设计计算方法与工程处理技术等。

第二节 膨胀土的判别与分类

一、膨胀土的判别方法

工程中,把膨胀土误认为非膨胀土,等于给工程建筑物埋下祸根,为建筑物产生病害埋下隐患;反之,如果把非膨胀土错划为膨胀土,则需要采取措施进行处理,必将加大工程投资。前者造成重大工程事故,后者造成不必要的人、财、物的极大浪费,都会造成巨大损失。膨胀土判别的目的是正确合理划分膨胀土与非膨胀土的界限,将膨胀土与非膨胀土区别开。膨胀土的判别标准国内外尚不统一,各行业亦不统一,一般采用现场定性和室内试验指标相结合的判别方法。

(一) 膨胀土胀缩性评判指标

研究表明,膨胀土的矿物成分、交换阳离子成分和微观结构特性是造成膨胀土胀缩的必要条件。但测定这些指标需要特殊的试验方法和设备,对试验技术人员的要求也很高,所以不适用于工程上对膨胀土的判别和分类。工程上通常用直接或间接反映膨胀特性的指标来进行评判。直接反映胀缩性的指标有自由膨胀率、胀缩总率等,间接反映胀缩性的包

括界限含水率、塑性指数、黏粒含量等。这些指标与膨胀土的胀缩潜势都有一定的相关性。

(1) 自由膨胀率：反映黏性土在无结构力影响下的膨胀情况，其值取决于土的物质组成，但不能反映土的天然结构。该指标可初步评价黏性土的膨胀性。

(2) 胀缩总率：采用原状土进行试验，可以反映膨胀土的黏土矿物组成和结构特征。在一定条件下，它是膨胀土比较稳定的属性指标，同时也是在工程中有实用价值的重要指标。

(3) 界限含水率：反映土粒与水相互作用的灵敏指标之一，在一定程度上反映了土的亲水性能。它与土的颗粒组成、黏土矿物成分、阳离子交换性能、土的分散度和比表面积，以及水溶液的性质等有着十分密切的关系。对于工程具有实用意义的通常有液限、塑限和缩限三个定量指标。一般来说，膨胀土是具有高塑性、高收缩性的黏性土，液限愈高，缩限愈低，则土的胀缩潜势就愈大。

(4) 塑性指数：土的胀缩性能是由于土粒与水作用所形成的结合水变化的结果。影响土的膨胀与收缩性能的主要是浓差渗透吸附结合水，而浓差渗透吸附结合水的数量大致可近似地用塑性指数来表示，其变化幅度主要取决于液限的高低。

(5) 粒度成分：反映膨胀土物质组成的基本特性指标，土中的黏粒与胶粒成分的含量愈高，一般表明蒙脱石成分较多，分散性较好，比表面积大，亲水性强，膨胀性愈大。所以，采用土中黏粒和胶粒含量指标，也可以用来区分膨胀土与非膨胀土。

(二) 现有判别方法总结

1. 现有规范、规定、条例中采用的方法

(1) 《广西膨胀土地区工业与民用建筑勘察、设计、施工和维护条例》(1985 试行)中，根据成因类型把广西膨胀土主要分为三类，再按岩性对每一类又分为两个亚类，采用液限和自由膨胀率两个判别指标对六类膨胀土分别给出下限值(见表 1-1)。

《广西膨胀土地区工业与民用建筑勘察、设计、施工和维护条例》

各类膨胀土判别指标界限值

表 1-1

土类 指标	I ₁	I ₂	II ₁	II ₂	III ₁	III ₂
液限 (%)	>46	>29	>63	>63	>45	>46
自由膨胀率 (%)	>47	>41	>27	>45	>34	>41

(2) 《膨胀土地区建筑技术规范》GBJ 112—87 中，对膨胀土采用综合判别法，即将具有膨胀土工程地质特征且自由膨胀率 $\delta_{ef} \geq 40\%$ 的土，判定为膨胀土。

(3) 《云南省膨胀土地区建筑技术规定》(1989 试行)与《膨胀土地区建筑技术规范》相似，选取自由膨胀率作为判别的唯一指标，不同的是，依据土的种类把膨胀土分为两大类，分别给出它们下限值：

I 类：黏土 $\delta_{ef} \geq 40\%$

II 类：亚黏土、红黏土 $\delta_{ef} \geq 35\%$

(4) 交通部《公路土工试验规程》JTJ 051—93 中采用塑性图进行判别，膨胀土为高

液限黏土 (CHE), 分布范围为 $w_L > 50\%$, A 线以上 $I_p = 0.73(w_L - 20)$ 。

(5) 《膨胀土地区营房建筑技术规范》GJB 2129—1994 对膨胀土的判别的方法是根据判别指标, 结合工程地质、环境地质特征综合判定。把膨胀土分为两大类, 以自由膨胀率为主要判别指标, 最大体缩率作为补充指标, 规范对膨胀土的判别规定如下:

I 类: 黏土的判别: 1) 自由膨胀率大于或等于 40% , 并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一的黏土, 应判定为膨胀土; 2) 自由膨胀率小于 40% , 大于 35% , 并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一, 同时最大体缩率大于或等于 8% 的黏土, 应判定为膨胀土。

II 类: 红黏土、粉质黏土的判别: 1) 自由膨胀率大于或等于 35% , 并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一的红黏土、粉质黏土, 应判定为膨胀土; 2) 自由膨胀率小于 35% , 大于 30% , 并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一, 同时最大体缩率大于或等于 8% 的红黏土、粉质黏土, 应判定为膨胀土。

(6) 建筑、水电等系统提出的临界判别值为: 自由膨胀率 $\geq 40\%$, 液限 $\geq 40\%$ 。

(7) 铁路系统提出的临界判别值为: 自由膨胀率 $\geq 30\%$, 液限 $\geq 40\%$ 。

2. 国内外的其他判别方法

国内外提出了膨胀土的许多判别标准, 可以归纳为两类:

(1) 反映土体天然结构和状态的指标: ①压实性指标 $K_d = \frac{e_L - e}{e_L - e_P} > 1.0$ (e_L, e_P, e 分别为液限、塑限和实际状态的孔隙比); ②膨胀性指标 $K_e = \frac{e_L - e}{1 + e} > 0.4$ ($e_L = w_L G_s / G_w$, G_s, G_w 分别为土、水的相对密度, e 为实际状态的孔隙比); ③吸水性指标 $K_w = \frac{w_L - w_s}{w_s} > 0.4$ (w_L, w_s 分别为液限和饱和状态的含水率)。

(2) 反映土的物质组成成分与水的相互作用的指标: ①自由膨胀率 $\delta_{ef} > 40\%$; ②液限 $w_L > 40\%$; ③塑性指数 $I_p > 18$; ④活动性指数 $K_A = I_p / A > 1.25$ (A 为粒径小于 $2\mu m$ 颗粒的百分含量)。

前一类指标要求采用原状土样确定, 后一类指标反映土粒的基本特性, 用扰动土即可测定, 测定方法简便、易行。除此之外, 还有按膨胀力、膨胀率、胀缩总率和胀缩总量等指标进行评判的。

(三) 建议采用的判别指标

1. 自由膨胀率 δ_{ef}

选用自由膨胀率 δ_{ef} 作为判别首要指标, 主要是据于以下几点考虑:

(1) δ_{ef} 能反映膨胀土的膨胀特性: 不同黏土矿物成分的土粒具有不同的亲水性能, 其膨胀性也有显著的差异。当膨胀土的结构相似时, 土中黏土矿物成分蒙脱石含量愈多, 自由膨胀率愈大; 若高岭石含量愈多, 自由膨胀率愈小。而石英即便是碾成粉末, 其亲水性能也很弱, 因此膨胀性也不明显。

(2) δ_{ef} 试验简单, 便于操作: 自由膨胀率试验要求的试验仪器简单, 一般的土工实验室都具备, 该试验操作也非常简单, 一般试验人员均可操作, 这就为用该指标进行膨胀土判别广泛推广应用奠定了基础。

(3) δ_{ef} 使用多年,积累了丰富的经验:在现有的规范、规定和条例中都采用了自由膨胀率作为膨胀土的判别指标,已积累了近几十年的经验,可以说用该指标进行膨胀土判别已深入人心,广为接受。

但是必须指出的是,自由膨胀率只是土粒膨胀特性的量度指标,反映了黏土颗粒的矿物成分,由于试验时破坏了土的天然结构,因此不能反映土体的结构特性。此外,对以收缩变形为主的膨胀土也不适用。所以,在工程实际中最好采用自由膨胀率和其他能弥补其缺陷的指标相配合的综合判别和分类方法,建议采用最大体缩率(又称最大胀缩总率) δ'_v 作为膨胀土判别的补充指标。

2. 最大体缩率 δ'_v

选用最大体缩率 δ'_v 作为判别补充指标,主要是据于以下几点考虑:

(1) δ'_v 能准确地评定土的胀缩性:最大体缩率 δ'_v 是指原状土从胀限到缩限时的体积收缩率。由于测试过程中土的结构没有被扰动, δ'_v 能全面反映土的成分和结构的影响;在一定的含水率下,同一土的吸水能力是一定的,它在任意胀前起始含水率,浸水到膨胀稳定后的胀后含水率和孔隙比都为一定值,即不受土的天然湿度密度的影响,所以 δ'_v 具备准确评定膨胀土胀缩性的两个基本条件。

(2) δ'_v 能表征天然状态下胀缩性红黏土的胀缩特性:自由膨胀率 δ_{ef} 作为膨胀土的评判指标最大的缺陷是没能顾及胀缩性红黏土的特性。胀缩性红黏土在天然状态下以收缩变形为主,主要造成收缩破坏,且破坏程度随土的收缩性的增大而增大。因此,要准确评定胀缩性红黏土的胀缩性,必须充分考虑其天然状态下的胀缩特性,即要求所选定的判别和分类指标应当能衡量土的收缩性能。 δ'_v 这一原状土的收缩性指标符合这一要求。

(3) δ'_v 反映了地基土在自然条件下可能达到的最不利工作状态:在距地表一定深度处的膨胀土地基,其含水率在某种气候条件下从胀限变化至缩限是可能的,此时属最不利工作状态。所以,在胀限到缩限的含水率变化范围内,由原状土测定的 δ'_v 是符合地基土的实际工作状态的。因而在实际工程中,将它作为补充指标,可以有效地弥补用自由膨胀率来判别胀缩性红黏土造成的漏判情况。

(4) δ'_v 可直接用于工程设计:最大体缩率 δ'_v ,除了可以用作膨胀土判别指标,并对其胀缩潜势分级,还可作为地基胀缩性变形计算的参数,从而达到判别、分类和计算使用同一指标的目的,与使用多项指标相比,可节省野外勘探取土和室内试验的工作量。

(5) δ'_v 的测试方法,一般的勘察设计单位都能掌握:按定义,最大体缩率 δ'_v 可用天然状态土样,先进行三向膨胀至稳定后,再进行收缩试验直接测得。 δ'_v 的直接测定值固然准确,但由于其试验复杂且所需时间较长,一般难以在生产部门中推广。为促进这一问题的解决,根据理论推导可行公式:

$$\delta'_v = \frac{100}{100 + \delta_p} (\delta_p + \delta_s) \quad (1-1)$$

用式(1-1)计算只需用同一土样切取两个湿密状态相同的试样,一个进行三向膨胀试验测得的体积膨胀率 δ_p ,一个进行收缩试验测得体积收缩率 δ_s ,与直接测定法确定相比;试验简便省时,而且两者测出的结果,误差 $<5\%$ 。由于三向膨胀试验不属于一般的常规试验,设想用单项膨胀试验测得的 δ_p 值代替三向试验测得的 δ_p 值。该设想的出发点主要

是基于胀缩性红黏土的特性考虑的。如前所述,胀缩性红黏土的天然含水率接近胀限,饱和度高达 95%以上,吸水量一般在 5%以内,膨胀量较小,无荷膨胀率多数小于 1%,不超过 2%。由此可以推测,单项膨胀试验和三向膨胀试验所测得的值应很接近。此推测正确与否及对其他成因类型的膨胀土是否适用,有待于试验结果和实践的验证。

3. 判别指标下限值的确定

(1) 自由膨胀率下限值的确定

1) 对于黏土采用《膨胀土地区建筑技术规范》中规定的下限值: $\delta_{ef} \geq 40\%$, 但为了减少漏判的可能,对自由膨胀率介于 35%与 40%之间的,如果满足最大体缩率 $\delta_v' \geq 8\%$ 的条件,也判定为膨胀土。

2) 对于胀缩性较低的粉质黏土和以收缩变性为主的胀缩性红黏土,在上条规定的基础上,进一步降低标准。当 $\delta_{ef} \geq 35\%$,判定为膨胀土;同样,为了减少漏判的可能,对于自由膨胀率介于 30%与 35%的情况,如果满足最大体缩率 $\delta_v' \geq 8\%$ 的条件,也判定为膨胀土。

(2) 最大体缩率下限值的确定

根据对全国膨胀土主要省区和胀缩性红黏土地区进行的一些调查和试验成果(见表 1-2、表 1-3),凡确因胀缩性红黏土原因而发生破坏的建筑物,其下地基土的最大体缩率都大于 8%。因此,建议采用以 $\delta_v' \geq 8\%$ 作为补充指标的下限。

全国膨胀土主要省区 $\delta_v' = 8\%$ 与 δ_{ef} 对应值

表 1-2

省(区)	广西	云南	四川	湖北	河南	河北	陕西	山东	安徽	江苏
与 $\delta_v' = 8\%$ 相对应的 $\delta_{ef}(\%)$	40	46	48	44	52	48	41	52	46	40

广西、云南、贵州红黏土地区 $\delta_{sm} = 8\%$ 与 δ_{ef} 对应值

表 1-3

省(区)	广西	云南	贵州	综合
与 $\delta_v' = 8\%$ 相对应的 $\delta_{ef}(\%)$	37	32	30	37

值得指出的是,采用上述指标进行判别时要结合工程地质和环境地质条件来综合评判。工程地质和环境地质条件主要根据膨胀土野外鉴别方法来确定。

(四) 建议的判别方法

膨胀土的判别应在工程地质调查的基础上,采用自由膨胀率和最大体缩率指标进行综合判别。

1. 黏土的判别

(1) 自由膨胀率大于或等于 40%,并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一的黏土,应判定为膨胀土;

(2) 自由膨胀率小于 40%,大于 35%,并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一,同时最大体缩率大于或等于 8%的黏土,应判定为膨胀土。

2. 红黏土、粉质黏土的判别

(1) 自由膨胀率大于或等于 35%,并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征之一的红黏土、粉质黏土,应判定为膨胀土;

(2) 自由膨胀率小于 35%,大于 30%,并具有膨胀土工程地质特征或环境地质特征

之一，同时最大体缩率大于或等于8%的红黏土、粉质黏土，应判定为膨胀土。

二、膨胀土的分类方法

(一) 现有分类方法总结

1. 现有规范、规定、条例中采用的方法

现有规范、规定、条例一般采用自由膨胀率、胀缩总率、膨胀率、地基分级变形量、小于0.002mm黏粒含量等指标对膨胀土胀缩等级进行分类（见表1-4）。

膨胀土胀缩等级的分类方法

表 1-4

规范、规定、条例	分类指标	强膨胀土	中膨胀土	弱膨胀土
《广西膨胀土地区工业与民用建筑勘察、设计、施工和维护条例》 (1985 试行)	胀缩总率 e_{ps} (%)	>4.5	$2.5\sim4.5$	$1.0\sim2.5$
	膨胀率 e_{p50} (%)	>0.5	$0.0\sim0.7$	$0.0\sim0.7$
	注：1. 指标值为同一土质单元的平均值，确定等级时要两个指标值同时符合表中的规定。如两个指标值中，一个符合较低的等级，另一个符合较高的等级，则判属较低的一个级别； 2. e_{ps} 为线收缩率 e_{sl} 与膨胀率 e_{p50} 之和。 e_{p50} 为 50kPa 压力下的膨胀率。计算膨胀率时，以压缩稳定后的高度作为初始高度			
《膨胀土地区建筑技术规范》 GBJ 112—87	自由膨胀率 δ_{ef} (%)	≥ 90	$65\sim90$	$40\sim65$
	地基分级变形量 s_c (mm)	≥ 70	$35\sim70$	$15\sim35$
《公路路基设计规范》 JTJ 013—95	$<0.002\text{mm}$ 黏粒含量 (%)	>50	$35\sim50$	<35
	自由膨胀率 δ_{ef} (%)	>90	$65\sim90$	$40\sim65$
	膨胀总率 e_{ps} (%)	>4	$2\sim4$	$0.7\sim2$
《云南省膨胀土地区建筑技术规定》(1989 试行)	自由膨胀率 δ_{ef} (%)	黏土	≥ 90	$60\sim90$
		粉质黏土、红黏土		$55\sim80$
	注：当土的 δ_{ef} 低于各类土的下限值 5% 以内，但野外调查具有显著特征仍应判为膨胀土			
《膨胀土地区营房建筑技术规范》GJB 2129—1994	自由膨胀率 δ_{ef} (%)	黏土	≥ 90	$65\sim90$
		粉质黏土、红黏土		≥ 55

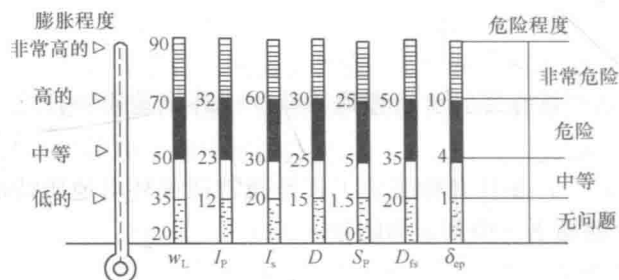


图 1-1 印度的判别分类标准

I_s —收缩指数； D —胶粒含量； S_p —膨胀势；

δ_{ep} —膨胀率； D_{fs} —差分自由膨胀率

2. 国内外的其他分类方法

(1) 印度对膨胀土分类，其判别与分类方法如图 1-1 所示，采用液限、塑性指数、收缩指数、胶粒含量、膨胀势、膨胀率、差分自由膨胀率等多种指标将膨胀土的膨胀程度和危险程度分成了四个等级，即非常高的与非常危险的、高的与危险的、中等的与中等危险的、低的与无问题的。

(2) 威廉姆斯 (Wileiams) 图法: 南非威廉姆斯提出联合使用塑性指数及小于 $2\mu\text{m}$ 颗粒的成分含量作图对膨胀土进行判别分类, 分为很高、高、中等、低等四个等级 (如图 1-2 所示)。

(3) 根据塑性图分类: 塑性图系由卡萨格兰首先提出, 后来李生林教授作了深入的研究, 它是以塑性指数为纵轴, 以液限为横轴的直角坐标, 如图 1-3 所示。因此, 运用塑性图联合使用塑性指数与液限来判别膨胀土, 不仅能反映直接影响胀缩性能的物质组成成分, 而且也能在一定程度上反映控制形成胀缩性能的浓差渗透吸附结合水的发育程度。

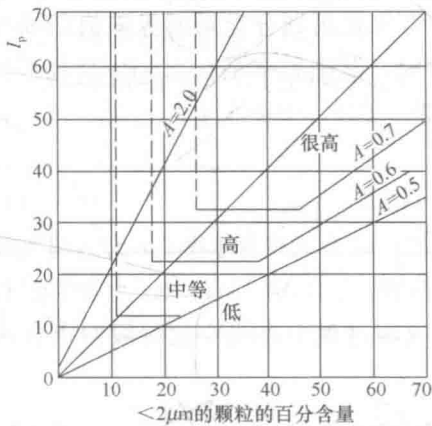


图 1-2 威廉姆斯的判别与分类标准

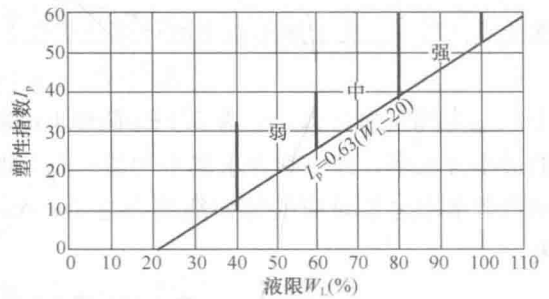


图 1-3 膨胀土在塑性图上的分类

(4) 美国对膨胀土分类, 美国垦务局荷尔兹 (Holtz W G) 提出了如表 1-5 的分类法。在加利福尼亚中部河谷的费里思特一克思、圣路易斯等渠道的膨胀土都采用此法估算膨胀体变。表 1-5 中按膨胀体变百分数 δ_p 分类标准与我国按体缩率 δ_v 分类比较接近。

美国膨胀土的分类标准

表 1-5

指标 \ 级别	特强膨胀土	强膨胀土	中膨胀土	弱膨胀土
$<0.001\text{mm}$ 胶粒含量 (%)	>28	20~31	13~23	<15
塑性指数 (I_p)	>35	25~41	15~28	<18
缩限 w_s (%)	<11	7~12	10~16	>15
膨胀体变 δ_p (%)	>30	20~30	10~20	<10

(5) 最大胀缩性指标分类法

主张这种分类的研究者柯尊敬认为, 一个适合的胀缩性评价指标必须全面反映土的粒度成分和矿物化学成分, 以及宏观与微观结构特征的影响, 同时能消除土的湿度和密度状态的影响, 即不随土的湿度和密度状态的变化而变化。而且, 还要适应胀缩土各向异性的特点。因此, 推荐用直接指标, 即最大线缩率 δ'_{sv} 、最大体缩率 δ'_v 、最大膨胀率 δ'_{ep} 等指标作为分类的标准, 如表 1-6 所示。这里的最大线缩率与最大体缩率是天然状态的土样膨胀后的收缩率与体缩率, 最大膨胀率是天然状态土样在一定条件下风干后的膨胀率。

最大胀缩性指标分类法

表 1-6

指标 \ 等级	特强膨胀土	强膨胀土	中膨胀土	弱膨胀土
最大线缩率 δ'_{sv} (%)	>11	8~11	5~8	2~5
最大体缩率 δ'_v (%)	>30	23~30	16~23	8~16
最大膨胀率 δ'_{ep} (%)	>10	7~10	4~7	2~4

(6) 自由膨胀率与胀缩总率分类法

根据室内直接测得胀缩性指标，综合国内有关专家提出划分类别的界限值归纳如表 1-7。表中对于地基土按线胀缩总率 (δ_{es}) 进行评价时，其膨胀率是在 50kPa 荷载下获得的，因此，膨胀等级划分标准也不一，即强膨胀土 $\delta_{es}>5\%$ ，中膨胀土 $\delta_{es}=5\%\sim2\%$ ，弱膨胀土 $\delta_{es}<2\%$ 。关于胀缩总率的计算公式如下：

$$\delta_{es} = \delta_{ep} + \lambda_s(w - w_{min})$$

(1-2)

式中， δ_{es} 为线胀缩总率； δ_{ep} 为 50kPa 荷载下的膨胀率； w 为天然含水率； w_{min} 为建筑场地的最小含水率，即旱季含水率平均值； λ_s 为收缩系数， $\lambda_s = \Delta\delta_s / \Delta w$ ； $\Delta\delta_s$ 为收缩过程中与两点含水率之差对应的竖向线缩率之差； Δw 为收缩过程中直线变化阶段两点含水率之差。

自由膨胀率与胀缩总率分类法

表 1-7

指标 \ 类别	无荷载下体胀缩总率 (%)	无荷载下线胀缩总率 (%)	线胀缩率 (%)	缩限含水率状态下的体缩率 (%)	自由膨胀率 (%)
强膨胀土	>18	>8	>4	>23	>80
中膨胀土	12~18	6~8	2~4	16~23	50~80
弱膨胀土	8~12	4~6	0.7~2	8~16	30~50

(7) 多元线性函数判别法

采用数学法进行主因子分析与逐步回归分析，提出综合指标的分类：

$$Z = 0.29w_L + 0.32w_s + 0.38\delta_{ef} + 0.12d_L - 0.33w_0 + 10.9e_0$$

(1-3)

式中， w_L 为液限 (%)； δ_{ef} 为自由膨胀率 (%)； w_0 为天然含水率 (%)； w_s 为缩限含水率 (%)； d_L 为土中小于 0.002mm 颗粒含量百分数； e_0 为天然状态孔隙比。分类的临界值如表 1-8 所示。

多元线性函数判别法

表 1-8

类别	强膨胀土	中膨胀土	弱膨胀土
综合指标 Z	≥ 36	26~36	22~26

(8) 胀缩性与表征胀缩性指标分类法

这里将这些指标综合归纳于表 1-9。表中所列指标对土的膨胀性和强度特性都有重要的影响，特别是比表面积能反映土体的主要黏土矿物，比表面积增大，颗粒表面自由能亦增加，颗粒与介质溶液之间作用更强，使颗粒间水化膜厚度增大，从而降低了土体强度。应该指出，该分类法的比表面积与阳离子交换量的临界值与南阳各类膨胀土的界限值非常

吻合。

胀缩性与表征胀缩性的指标分类法

表 1-9

指标 类别	<0.005mm 黏粒含量 (%)	液限 w_L (%)	塑性指数 I_P	比表面积 (m^2/g)	阳离子交换量 ($me/100g$)	零荷载线胀缩 总率 (%)
强膨胀土	>50	>48	>25	>300	>40	>8
中膨胀土	35~50	40~48	18~25	150~300	30~40	6~8
弱膨胀土	<35	<40	<18	<150	<30	4~6

(二) 建议分类方法

综合上面的分析，建议的分类方法如表 1-10 所示。

建议的膨胀土分类方法

表 1-10

土的种类 \ 级别	强膨胀土	中膨胀土	弱膨胀土
黏土	$\delta_{ef} \geq 90\%$	$65\% \leq \delta_{ef} < 90\%$	$40\% \leq \delta_{ef} < 65\%$ 或 $35\% \leq \delta_{ef} < 65\%$ 且 $\delta'_v \geq 8\%$
粉质黏土、红黏土		$\delta_{ef} \geq 55\%$	$35\% \leq \delta_{ef} < 55\%$ 或 $30\% \leq \delta_{ef} < 55\%$ 且 $\delta'_v \geq 8\%$

第三节 广西公路膨胀土概况与病害

一、广西膨胀土分布

广西膨胀土具有种类多与分布广的特点，主要分布于南宁盆地、宁明盆地、百色盆地和桂中岩溶平原等全区 7 个市、27 个县，按成因、地层和土（岩）性可分为三大类、六个亚类：Ⅰ类第三系湖相半成岩及其风化物，其中黏土质岩及其风化形成的黏土为Ⅰ₁亚类，粉砂质黏土岩及其风化形成的亚黏土为Ⅰ₂亚类。Ⅱ类碳酸盐岩风化形成的残坡积黏土，其中以红为基色的为Ⅱ₁亚类，以黄为基色的为Ⅱ₂亚类。Ⅲ类第四系河流冲积黏土，其中以红或黄为基色的为Ⅲ₁亚类，以白或灰为基色的为Ⅲ₂亚类。

南宁盆地位于广西西南部，大致呈北东向，略呈北东至南西西的纺锤形，周围有低山丘陵环绕，盆地内地势基本平坦，邕江自西向东穿越盆地腹部，两岸发育有六级阶地。盆地内膨胀土分布的地区主要有南宁、武鸣、邕宁、横县等，上述三种成因均有出现。宁明盆地位于广西西南部，为东西向构造断陷盆地，明江自东向西流过，两岸发育有二级阶地。膨胀土主要分布在宁明、上思、大新、扶绥、崇左、凭祥等，为第三系始新统湖相沉积泥岩的风化残积—坡积土。百色盆地位于广西西部，呈北西—南东向长条形分布，右江横贯整个盆地。盆地内分布有膨胀土的地区主要有百色、平果、田东、田阳等，成因类型为第三系泥岩风化后形成。桂中岩溶平原的膨胀土分布于贵港（贵县）、柳州和桂林三个区域，由碳酸盐岩风化残积物演化而来，以胀缩性红黏土形式存在。在这些区域内膨胀土广泛分布于岩溶准平原、洼地、谷地，主要地区有贵港、平南、桂平、柳州、来宾、武宣、桂林等。