

Design Method and Strengthening
Technique for Retaining Structure of High
Expansive Soil Slope

.....

膨胀土高边坡支挡 结构设计方法与加固技术

杨果林 胡 敏 申 权 滕 珂 / 著



胀
土
学



科 学 出 版 社

膨胀土高边坡支挡结构 设计方法与加固技术

杨果林 胡 敏 申 权 滕 珂 著



科学出版社

内 容 简 介

膨胀土在我国分布非常广泛,由它引起的工程事故频繁,给国家带来了巨大的经济损失。云桂高速铁路经过大量的膨胀土地区,沿线膨胀土高边坡及其支挡结构成为高速铁路安全的关键点。基于“以柔治胀”的理念,采用多级边坡组合式支挡结构、柔性生态护坡是两种较好的膨胀土高边坡支护措施。

本书共 11 章,包括膨胀土路堑边坡加固与防护措施、膨胀土工程特性试验、膨胀土高边坡稳定性、膨胀土多级边坡支挡结构设计理论、膨胀土多级支挡结构现场试验研究、膨胀土多级支挡结构数值分析、膨胀土路堑边坡柔性生态护坡设计方法、云桂铁路柔性生态护坡试验研究等。

本专著可供从事岩土工程、道路与铁路工程、结构工程的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

膨胀土高边坡支挡结构设计方法与加固技术/杨果林等著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-054238-0

I. ①膨… II. ①杨… III. ①膨胀土-边坡-支挡结构-研究 ②膨胀土-边坡加固-研究 IV. ① TU475

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017) 第 208290 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:邹慧卿
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:27 1/4 插页:2

字数:532 000

定价:189.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

膨胀土在我国分布非常广泛,由它引起的工程事故频繁,这给国家带来了巨大的经济损失。广西、云南两省区是我国膨胀土危害最为严重的地区,尤其是百色地区膨胀土具有极其复杂的特性。膨胀土地区有“逢堑必滑”的特点,沿线膨胀土高边坡及其支护成为高速铁路安全的关键点。基于“以柔治胀”的理念,采用多级边坡组合式支挡结构、柔性生态护坡是两种较好的膨胀土高边坡支护措施。

本专著结合国家自然科学基金项目——“高速铁路膨胀土路堑新型防排水基床结构研究”(51478484)、“高速铁路路基长期动力稳定性评价方法研究”(51278499)、“重载铁路膨胀土路堑基床结构长期动力稳定性研究”(51778641);原铁道部科技研究开发计划重点课题——“云桂铁路膨胀土地段关键技术研究”(2010G016-B);以及中铁十九局集团有限公司委托技术开发项目——“云桂铁路膨胀土高边坡稳定性分析与支挡结构优化”(201500H002)等,以云桂铁路膨胀土高边坡为依托工程,通过膨胀土工程特性试验、模型试验、推剪试验、现场监测、理论分析、数值模拟等相关方法,对云桂铁路沿线膨胀土的膨胀特性、高边坡稳定性分析、多级组合式支挡结构设计理论,以及柔性生态护坡加固技术等开展了系统深入研究。

本书主要研究内容如下。

(1) 开展了云桂铁路膨胀土室内土工试验、化学成分分析、阳离子交换量分析,确定了云桂铁路南(宁)百(色)段膨胀土的膨胀等级,获得了不同膨胀等级膨胀土的物理力学参数。

(2) 利用平衡加压法,在云桂铁路典型弱、中膨胀土路段,分别进行了膨胀土原位侧向膨胀力试验,分析了膨胀土在约束条件下侧膨胀力与含水率增量关系,并和室内模型试验结果进行对比。

(3) 进行了原位推剪试验,获得了原状膨胀土在天然条件以及浸水条件下的抗剪强度,并与室内直剪试验结果进行对比,得出抗剪强度和饱和度之间的关系。

(4) 修正边坡稳定性分析理论。考虑膨胀土吸湿产生膨胀变形的特点,引入变形力,变形力使得单级边坡安全系数降低约 10%,变形力对边坡稳定性的影响不容忽视;研究影响双级、多级膨胀土边坡稳定性的敏感因素,获得影响安全系数因素的主次顺序;采用极限平衡法、极限分析上限法、强度折减法计算得到四级边坡的安全系数很接近,设计并开发了相应的膨胀土边坡稳定性计算程序。

(5) 基于极限分析上限理论,分析了不同服役环境下锚杆加固膨胀土二级边坡和抗滑桩 + 锚杆(索)加固膨胀土多级边坡的稳定性,确定各种服役环境下锚杆

(索)拉力和抗滑桩抗力,获得了边坡安全系数、锚杆(索)拉力随裂隙、孔隙水压力、坡顶超载、土体分层、地震等因素的变化规律,为膨胀土多级边坡组合式支挡结构设计提供理论支撑,设计并开发了锚杆拉力和桩抗力的求解程序。

(6) 基于极限平衡理论,采用水平条分法,推导并求解了地震作用下桩板墙后主动土压力强度非线性分布公式,可用于桩板墙结构的抗震设计。

(7) 提出了两种适用于膨胀土多级边坡组合式支挡结构的设计新方法,即等效荷载+逐级设计法和极限理论整体设计法。对比抗滑桩弯矩的理论值与实测值,验证两种新设计方法的正确性和适用性。桩身弯矩实测值大于不考虑膨胀力的弯矩设计值,说明膨胀土边坡抗滑桩设计必须考虑膨胀力的作用;基于桩后膨胀力的三种分布形式(三角形、倒三角形、矩形分布),推导了其相应的桩身内力表达式,并与实测值进行了对比分析。

(8) 对中-强膨胀土高边坡组合式支挡结构(桩板墙+锚杆/索)进行了现场试验,研究框架梁下、抗滑桩后、板后土压力分布及变化规律,研究桩身内力分布及变化规律,研究锚索拉应力变化规律及坡表面位移变化等,以此评价组合式支挡结构的支挡效果。给出了框架梁下膨胀力的推荐值和桩后膨胀力的建议值;获得了桩后土压力沿桩深度方向变化规律;得到了锚索拉力与大气的变化规律,板后土压力沿深度方向、水平方向的分布规律等。

(9) 采用数值分析软件对膨胀土多级边坡及支挡结构进行模拟分析,研究桩身内力、锚杆(索)拉力、框架梁内力的分布规律;研究降雨对膨胀土边坡及其支挡结构的影响;研究桩长、锚索长度对支挡结构内力的影响;下级抗滑桩弯矩的模拟值、实测值、理论值沿深度方向规律基本一致,说明此数值模拟的正确性和可行性。降雨导致坡面隆起变形,降雨对锚杆拉力、桩身内力、框架梁弯矩影响较明显。

(10) 开展高速铁路膨胀土路堑边坡柔性生态护坡设计,进行了:①换填宽度计算;②加筋层高计算;③整体稳定性验算(包括整体滑移稳定性、整体平移稳定性、承载力验算);④内部稳定性验算。

(11) 基于极限平衡法,提出考虑应力扩散效应的整体滑移稳定性方法,并编制了VB(Visual Basic)计算程序;基于塑性极限分析的上限定理,提出了膨胀土边坡的柔性生态护坡安全系数计算方法。根据正交分析方法给出了各个因素的敏感性顺序,结果显示,对于整体滑移稳定性,内摩擦角和地震系数影响最大,边坡坡率影响最小;对于内部稳定性,膨胀力和内摩擦角影响最大,边坡坡率影响最小。

(12) 在试验段埋设土压力盒、柔性位移计、湿度传感器以及水平土应变计等测试元器件,测试柔性生态护坡在施工期和施工后的基底应力、拉筋应变、变形及边坡含水率等的变化;通过对测试数据的整理分析,掌握柔性生态护坡结构内部应力应变规律,研究柔性生态护坡的加筋机理,同时也对柔性生态护坡的支护效果进行检验。

本专著是在课题组成员申权、滕珂、杜勇立等的博士学位论文，段君义、张梓振、杨天尧、汪鹏福、林超等的硕士学位论文，以及几个课题研究成果报告的基础上整理而成！

在完成本专著过程中，得到了国家自然科学基金、原铁道部、中铁十九局集团有限公司、云桂铁路广西有限责任公司、中国中铁二院工程集团有限责任公司等的大力支持；得到了中铁十九局集团有限公司何旭总工，云桂铁路广西有限责任公司翟建平，中国中铁二院工程集团有限责任公司冯俊德、薛元、封志军等的通力合作，在此一一表示感谢！

杨果林

2017 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 膨胀土判别和分类	2
1.2 膨胀土结构特征	7
1.3 膨胀土强度特征	7
1.4 膨胀土胀缩性	9
1.5 膨胀土边坡稳定性	13
1.5.1 理论研究	13
1.5.2 极限平衡法	15
1.5.3 数值分析法 (强度折减法)	15
1.5.4 极限分析	17
1.5.5 膨胀土边坡稳定性分析	18
1.6 膨胀土室内试验研究	20
1.6.1 剪切强度试验	20
1.6.2 膨胀力试验	20
1.6.3 室内模型试验	21
1.7 膨胀土边坡加固方法研究	22
1.7.1 锚杆 (索) 框架梁或土钉墙加固	22
1.7.2 抗滑桩加固	22
1.7.3 土工格栅、格宾等加筋土柔性加固	23
1.7.4 其他方法	23
1.8 膨胀土边坡及支挡结构现场试验研究	24
1.9 膨胀土边坡及支挡结构数值分析	25
1.9.1 膨胀土边坡数值分析	25
1.9.2 桩板墙数值模拟	26
1.9.3 锚杆 (索) 框架梁数值模拟	27
1.10 桩板墙及锚杆 (索) 框架梁设计计算	27
1.10.1 抗滑桩理论计算	27
1.10.2 桩间挡板计算理论	28
1.10.3 锚杆 (索) 框架梁理论计算	28
1.11 加筋边坡技术	29

1.12 柔性生态护坡技术	30
第 2 章 膨胀土路堑边坡加固与防护措施	32
2.1 路堑边坡加固机理	32
2.1.1 支挡结构	32
2.1.2 坡面加固措施	32
2.2 加固措施设计方法	33
2.2.1 抗滑桩设计方法	33
2.2.2 抗滑挡土墙设计方法	42
2.3 既有膨胀土路堑边坡病害原因分析及经验教训	44
2.4 膨胀土路堑边坡加固防护措施及工程实例	48
2.4.1 膨胀土加固防护工程措施	49
2.4.2 膨胀土边坡处治典型实例	51
2.5 本章小结	51
第 3 章 云桂铁路膨胀土工程特性试验	53
3.1 膨胀土室内土工试验	53
3.2 膨胀土强度试验	54
3.2.1 室内直剪试验	55
3.2.2 膨胀土原位推剪试验	55
3.2.3 结果分析	65
3.3 侧向膨胀力试验研究	70
3.3.1 侧向膨胀力室内模拟试验研究	71
3.3.2 侧向膨胀力原位试验研究	77
3.3.3 膨胀力取值	86
3.4 本章小结	88
第 4 章 膨胀土高边坡稳定性分析	91
4.1 膨胀土常规物理力学特性试验	92
4.1.1 膨胀土直剪试验	92
4.1.2 膨胀土三轴试验	99
4.1.3 膨胀土膨胀力试验	102
4.2 极限平衡法分析多级边坡稳定性	105
4.2.1 膨胀土单级边坡稳定性分析	105
4.2.2 膨胀土双级边坡稳定性分析	114
4.3 极限分析上限法分析四级边坡稳定性	125
4.3.1 边坡的临界高度	127
4.3.2 外功率	128

4.3.3	内能损耗率	133
4.3.4	稳定性分析	134
4.3.5	程序设计	135
4.3.6	工程算例	136
4.3.7	影响因素分析	137
4.4	FLAC3D 强度折减法分析四级边坡稳定性	140
4.4.1	模型建立	140
4.4.2	考虑变形力的作用	141
4.4.3	结果分析及对比	141
4.5	坡脚圆弧顺接对多级边坡局部稳定性的影响	142
4.6	本章小结	145
第 5 章	不同服役环境下膨胀土多级边坡支挡结构设计理论	147
5.1	锚杆加固膨胀土边坡的稳定性分析及锚杆拉力计算	147
5.1.1	计算模型的建立	147
5.1.2	安全系数	150
5.1.3	锚杆 (索) 拉力的计算	153
5.1.4	安全系数的影响因素分析	155
5.1.5	锚杆拉力的影响因素分析	160
5.1.6	锚杆 + 框架梁共同作用的锚杆拉力计算	163
5.2	考虑孔隙水压力影响的边坡稳定性分析及锚杆拉力计算	165
5.2.1	计算模型的建立	165
5.2.2	安全系数	167
5.2.3	锚杆 (索) 拉力的计算	168
5.3	考虑裂隙影响的边坡稳定性分析及锚杆拉力计算	169
5.3.1	计算模型的建立	170
5.3.2	安全系数	172
5.3.3	锚杆 (索) 拉力的计算	174
5.3.4	影响因素分析	175
5.4	考虑坡顶超载的边坡稳定性分析及锚杆拉力计算	179
5.4.1	计算模型建立	179
5.4.2	安全系数	180
5.4.3	锚杆 (索) 拉力的计算	181
5.4.4	影响因素分析	182
5.5	考虑土体分层的边坡稳定性分析及锚杆拉力计算	184
5.5.1	计算模型建立	184

5.5.2	安全系数	188
5.5.3	锚杆 (索) 拉力的计算	190
5.6	地震作用下抗滑桩的抗力计算	191
5.6.1	计算模型的建立	191
5.6.2	安全系数	197
5.6.3	抗滑桩抗力计算	198
5.6.4	影响因素分析	199
5.7	地震作用下桩板墙后主动土压力分布	201
5.7.1	主动土压力公式推导	202
5.7.2	主动土压力公式与已知公式的比较	208
5.7.3	工程算例	209
5.8	本章小结	210
第 6 章	膨胀土高边坡多级组合式支挡结构设计理论研究	213
6.1	概述	213
6.2	设计新方法	214
6.2.1	方法一: 等效荷载 + 逐级设计法	214
6.2.2	方法二: 极限理论整体设计法	217
6.3	抗滑桩设计计算	218
6.3.1	桩身悬臂段内力计算	218
6.3.2	膨胀力	219
6.3.3	锚固段内力计算	223
6.3.4	抗滑桩内力计算结果	223
6.4	桩间板设计	230
6.5	锚杆 (索) 设计	230
6.6	框架梁设计	231
6.6.1	Winkler 地基梁算法	231
6.6.2	试验段锚索 (杆) 框架梁内力计算结果	234
6.7	坡面排水设计	238
6.8	本章小结	239
第 7 章	云桂铁路膨胀土高边坡多级支挡结构现场试验研究	240
7.1	概述	240
7.2	膨胀土高边坡现场试验方案	240
7.2.1	高边坡工程概况	240
7.2.2	测试目的及内容	242
7.2.3	坡脚抗滑桩处地质情况调查	245

7.3 现场试验结果分析	246
7.3.1 旱季土压力监测	246
7.3.2 降雨量统计	257
7.3.3 膨胀力监测	258
7.3.4 桩板墙的变形监测	266
7.3.5 坡面位移监测	271
7.4 本章小结	272
第 8 章 云桂铁路膨胀土高边坡多级支挡结构数值分析	274
8.1 模型建立及网格划分	274
8.2 降雨的模拟	276
8.3 算例验证	280
8.4 桩身内力分析	281
8.5 锚杆(索)框架梁内力分析	284
8.5.1 锚索拉力	284
8.5.2 锚杆拉力	286
8.5.3 框架梁轴力	287
8.5.4 框架梁弯矩	288
8.6 桩长对支挡结构内力的影响	289
8.6.1 上级桩长的影响	289
8.6.2 下级桩长的影响	291
8.7 锚索预应力对支挡结构内力的影响	293
8.8 抗滑桩优化	294
8.9 本章小结	295
第 9 章 膨胀土路堑边坡柔性生态护坡设计方法研究	297
9.1 一般加筋土坡设计方法	297
9.1.1 验算无筋时土坡的稳定性	297
9.1.2 加筋土边坡内部稳定性验算	298
9.1.3 外部稳定性计算	300
9.2 柔性支护在公路的运用	301
9.2.1 公路柔性支护的结构和设计原则	304
9.2.2 公路上柔性支护的加筋设计和内部稳定性验算	304
9.2.3 公路柔性支护的外部稳定性验算	307
9.3 膨胀土路堑边坡柔性生态护坡研究	310
9.3.1 柔性生态护坡的结构和作用机理	310
9.3.2 柔性生态护坡结构设计步骤	312

9.3.3 考虑隔绝降雨影响时护坡体所需厚度	314
9.3.4 加筋层高设计	317
9.3.5 整体滑动时的稳定性分析	319
9.3.6 整体平移时的稳定性分析	350
9.3.7 承载力的验算	353
9.3.8 内部稳定性分析	355
9.3.9 参数敏感性分析	360
9.4 本章小结	361
第 10 章 云桂铁路柔性生态护坡试验研究	363
10.1 工点概况	363
10.2 膨胀土路堑边坡柔性生态护坡现场监测方案	363
10.2.1 监测内容	363
10.2.2 测试元器件的布置、安装及要求	363
10.3 膨胀土路堑边坡柔性生态护坡现场观测结果分析	365
10.3.1 柔性生态护坡坡背含水率监测结果及分析	365
10.3.2 护坡水平应变监测结果及分析	369
10.3.3 格栅应变监测结果及分析	371
10.3.4 竖向土压力监测结果及分析	374
10.4 本章小结	377
第 11 章 柔性生态护坡在膨胀土高边坡的应用研究	378
11.1 双级边坡稳定性分析方法	378
11.1.1 基本假定	378
11.1.2 破坏机构	378
11.1.3 能耗计算	379
11.1.4 外力功率	380
11.1.5 内部能量消耗功率	382
11.1.6 安全系数	383
11.1.7 参数敏感性分析	383
11.2 本章小结	384
参考文献	385
附录 1	393
附录 2	401
附录 3	409

第1章 绪 论

膨胀土含有蒙脱石等矿物,膨胀土吸水时膨胀而水分蒸发时收缩,因此对土木工程结构造成有害的影响。膨胀土一般发现于热带半干旱气候温和的地区和年蒸发量大于降水量的区域。目前已探明,世界上 40 多个国家和地区分布有膨胀土^[1],中国是世界上膨胀土分布最为广泛的国家和地区之一。根据调查统计,在我国膨胀土危害较大的有湖南、湖北、广西、云南等省区,膨胀土对部分铁路和高速公路的边坡、路堤及桥梁基础构筑物产生不同程度的影响和破坏,造成年均数十亿元的损失。

南昆铁路膨胀土问题从 1989 年南昆线补测和定测时即引起原铁道部各设计单位和各专业科研、教学、设计人员的重视与关注。为了寻求膨胀土病害的解决办法,原铁道第二勘察设计院(铁二院,现中国中铁二院工程集团有限责任公司)会同国内有关专家和技术人员组成课题组攻关,选取南宁盆地那桐站附近的弱—中膨胀土和百色盆地林逢站附近中—强膨胀土地段作为试验段^[1]。1993 年 3 月提出了南昆铁路膨胀土路基设计原则。但由于研究成果滞后和当时技术条件以及资金的限制,南昆铁路膨胀土路基设计原则未能完全实施,再加上施工中的缺陷,致使工程开通运营后,膨胀土的路基出现许多病害。与新建云桂铁路处于同一走廊地带的南昆铁路,由南昆铁路百色工务段反馈的路基病害资料显示:仅 2010 年,DK38+050~DK207+750 路段共有路基病害 78 处,其中:路堑病害 11 处;边坡病害 6 处;护坡病害 2 处;挡墙病害 3 处,具体统计结果如表 1-1~表 1-4 所示。

新建云桂铁路全长 734.5km,如图 1-1 所示,其中膨胀土路基长约 66.2km,南宁—百色段与既有南昆线并行于同一个走廊地带,地质条件基本相同。百色—昆明段途经文山州、红河州地区,绕开既有南昆线,但也存在大量膨胀土。根据工程勘察资料,云桂铁路路基通过膨胀土的长度约为 32km,占全线路基长度的 16%,中膨胀土地段大部分集中在南宁—百色段。

云桂铁路不可避免地受到膨胀土的影响,其中那厘—百色段最为不利。该段膨胀土的母土是下第三系那读组($E_{2\sim 3n}$)黄绿色、灰白色、紫色泥土、钙质泥土或砂质泥土,以及百岗组($E_{2\sim 3b}$)灰绿色砂质泥土和青灰色泥土。该段膨胀土在卸载和化学风化作用下,形成了残积型膨胀土所特有的低密度(孔隙比 0.75~1.78)、高含水率(25%~41%)、高分散性($< 2\mu\text{m}$ 颗粒含量 $> 50\%$)、强收缩(体缩 15%~33%)、自由膨胀率高(40%~100%)、强度低(地基承载力 150~196 kPa,无侧限抗压强度

仅 20~34 kPa, 黏聚力 26 kPa, 内摩擦角 12°) 的特点。

为保障云桂铁路边坡的长期稳定和线路正常运营, 避免云桂铁路出现类似既有南昆铁路边坡病害频发的问题, 本书在既有南昆铁路边坡工程病害调研考察成果基础上, 结合公路膨胀土边坡工程的经验, 进一步深入研究云桂铁路沿线膨胀土的强度和膨胀性, 提出适用于铁路膨胀土路堑边坡的支挡结构设计和相应的稳定性计算方法。这对于治理膨胀土边坡具有重要的理论意义和工程价值。

1.1 膨胀土判别和分类

膨胀土的判别和分类, 一直是工程界关心的问题。能否充当膨胀土判别指标, 主要看它是否符合以下情况: ① 能反映膨胀土的本质; ② 指标的测定简单便捷; ③ 指标数据可靠, 重现性好 [2]。

目前, 国内外对于判别膨胀土的指标并未达成一致。膨胀土的判别指标按测定内容可分为两大类 [3]: 其一, 采用原状土样测定土的天然结构与状态, 其测定方法较多地受条件限制; 另一种则是反映土粒的基本特性, 无须原状土采用扰动土样测试也可以达到要求, 测定条件简单、易行, 因此该方法较为普遍。判别方法主要可分为两类: ① 作图法, 南非 Williams 提出采用塑性指数和小于 0.002mm 胶粒含量作图对膨胀土进行判别分类 [4]; 柯尊敬提出按最大胀缩性指标对膨胀土进行判别分类 [5]; A. 卡萨格兰德首先提出, 李生林 [6] 改进的塑性图判别与分类方法; 谭罗荣提出了以风干含水量为指标的判别方法。Williams 分类方法使用简单, 但是分类结果明显偏高, 且理论依据不明确; 李生林改进的塑性图判别方法, 理论依据明确, 但液限判定标准与《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999) 中液限判定标准不相符, 难以进行分类; 谭罗荣的风干含水率分类法有一定的理论依据, 但风干含水率试验条件设定得不够严谨, 使结果离散性大。② 多指标法, 影响膨胀土膨胀性的因素很多, 单一标准的判别方法难以满足工程需求, 国内外采用的主流判别方法均采用如下多种指标的分级方法。

1) 《膨胀土地区建筑技术规范》[3]

国家标准《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013) 提出了按自由膨胀率大小和地基变形量划分膨胀土膨胀潜势的方法, 见表 1-1。

表 1-1 《膨胀土地区建筑技术规范》膨胀土胀缩等级标准

级别	指标	
	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	地基变形量 S_e/mm
强膨胀土	$\delta_{ef} \geq 90$	$S_e \geq 70$
中膨胀土	$65 \leq \delta_{ef} < 90$	$35 \leq S_e < 70$
弱膨胀土	$40 \leq \delta_{ef} < 65$	$15 \leq S_e < 35$

2) 美国垦务局标准 [7]

美国垦务局 W.G.Holt 提出的分类方法见表 1-2。将膨胀等级分极强、强、中、弱四级, 评判指标为: 胶粒含量 ($<0.001m$)、塑性指数 I_p 、缩限 ω_s 、膨胀体变 δ_p 。

表 1-2 美国膨胀土胀缩等级标准

膨胀程度	指标			
	$<0.001m$ 胶粒含量/%	塑性指数 I_p /%	缩限 ω_s /%	膨胀体变 δ_p /%
极强膨胀土	>28	>35	<11	>30
强膨胀土	$20\sim31$	$25\sim41$	$7\sim12$	$20\sim30$
中膨胀土	$13\sim23$	$15\sim28$	$10\sim16$	$10\sim20$
弱膨胀土	<15	<15	>15	<10

3) 印度标准 [8]

在印度标准中, 膨胀土膨胀程度与危险程度相结合, 共分四个等级: 即低的与无问题的、中等的与中等危险的、高的与危险的、非常高的与非常危险的。对膨胀土分类采用膨胀势、膨胀率、差分自由膨胀率、收缩指数、液限、塑性指数、胶粒含量等多种指标。

4) 澳大利亚标准 [9]

澳大利亚标准采用膨胀量和线收缩率两项指标将膨胀土分为极强、强、中、弱四个等级, 见表 1-3。

表 1-3 澳大利亚膨胀土的分类标准

膨胀量/%	线收缩率/%	膨胀等级
>30	>17.5	极强
$16\sim30$	$12.5\sim17.5$	强
$8\sim15$	$8\sim12.5$	中
<7.5	$5\sim8$	弱

5) 柯尊敬标准 [10]

柯尊敬提出按照最大线缩率、最大体缩率和最大膨胀率将膨胀土胀缩等级分为极强、强、中、弱四级, 见表 1-4。

表 1-4 柯尊敬膨胀土胀缩等级标准

级别	指标		
	最大线缩率/%	最大体缩率/%	最大膨胀率/%
极强膨胀土	>11	>30	>10
强膨胀土	$8\sim11$	$23\sim30$	$7\sim10$
中膨胀土	$5\sim8$	$16\sim23$	$4\sim7$
弱膨胀土	$2\sim5$	$8\sim16$	$2\sim4$

6) 膨胀潜势标准 [11]

膨胀潜势标准根据液限和塑性指数，将膨胀土膨胀等级分为高、中、低三级，见表 1-5。

表 1-5 膨胀土膨胀潜势标准

级别	指标	
	液限/%	塑性指数/%
高	> 60	> 35
中	50~60	25~35
低	< 50	< 25

7) 杨世基标准 [12]

杨世基根据液限、塑性指数、膨胀总率、吸力、CBR 膨胀量，将膨胀土分为强、中、弱三级，见表 1-6。

表 1-6 杨世基膨胀土胀缩等级标准

级别	指标				
	液限/%	塑性指数/%	膨胀总率/%	吸力/kPa	CBR 膨胀量/%
强	> 60	> 35	> 4	> 440	> 3
中	50~60	25~35	2~4	160~440	2~3
弱	40~50	18~25	0.7~2	100~160	1~2

8) 陈善雄标准 [13]

陈善雄对国内外 11 种膨胀土判别与分类方法的评判指标综合统计分析认为：液限、塑性指数、自由膨胀率、小于 0.005mm 颗粒含量、胀缩总率等 5 个指标具有普通性和较高的可靠性。分类方法如表 1-7 所示。

表 1-7 陈善雄膨胀土膨胀潜势等级判定标准

指标	膨胀潜势等级		
	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土
液限/%	40~50	50~70	> 70
塑性指数/%	18~25	25~35	> 35
自由膨胀率/%	40~65	65~90	> 90
< 0.005m 颗粒含量/%	< 35	35~50	> 50
胀缩总率/%	0.7~2.0	2.0~4.0	> 4.0

9) 铁路标准 [14,15]

铁路标准选择了反映膨胀土胀缩性本质的自由膨胀率、蒙脱石含量和阳离子交换量作为膨胀性分级的判别指标。铁路标准采用的指标能够反映膨胀土膨胀的

本质,对膨胀土判别分类较为合理,但蒙脱石和阳离子交换量测试条件苛刻,分类方法如表 1-8 所示。

表 1-8 膨胀潜势分级及试样试验值

分级指标	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土	试样 1	试样 2
自由膨胀率/%	40~60	60~90	> 90	79	42
蒙脱石含量 M /%	7~17	17~27	> 27	17.1	7.2
阳离子交换量 CEC(NH_4^+)/(mmol/kg)	170~260	260~360	> 360		
有 2 项分级指标符合时,即判定膨胀土为该膨胀等级,参照标准可知试样 1 属于中等膨胀土,式样 2 属于弱膨胀土					

10)《公路路基设计规范》标准^[16]

姚海林等^[17]提出以标准吸湿含水率为核心,辅以自由膨胀率和塑性指数进行判别与分类。其中标准吸湿含水率能很好反映膨胀土矿物组成特性,塑性指数能很好地反映粒度组成、分散特性和阳离子与黏土矿物的互相作用。

这一判定方法被纳入《公路工程地质勘察规范》(JTJ C20—2011),如表 1-9 所示。

表 1-9 《公路工程地质勘察规范》(JTJ C20—2011) 膨胀土胀缩等级标准

级别	非膨胀土	弱膨胀土	中膨胀土	强膨胀土
自由膨胀率 F_s /%	$F_s < 40$	$40 \leq F_s < 60$	$60 \leq F_s < 90$	$F_s \geq 90$
标准吸湿含水率 ω_f /%	$\omega_f < 2.5$	$2.5 \leq \omega_f$	$4.8 \leq \omega_f < 6.8$	$\omega_f \geq 6.8$
塑性指数 I_p /%	$I_p < 15$	$15 \leq I_p < 28$	$28 \leq I_p < 40$	$I_p \geq 40$

文献 [18], [19] 选取我国典型膨胀土分布地区的膨胀土进行对比试验,对以标准吸湿含水率为主控指标的膨胀土判别分类指标和标准进行验证。结果表明,该判别方法较其他常用的标准准确性高,避免了膨胀土的漏判和误判,验证了公路膨胀土判别分类指标和标准的广泛适用性。

段海澎等^[20]就新公路膨胀土判别与分类方法对皖中膨胀土的适用性进行研究,结果表明:标准吸湿含水率作为膨胀土判别与分类指标适用于皖中地区;但是,《公路工程地质勘察规范》推荐的分级评判标准具有一定的局限性,三种指标得到的膨胀土胀缩等级并不相同。

采用多指标法判别膨胀土胀缩等级的方法,简单易行,直观明确,已被工程设计单位广泛采用。但是,影响膨胀土胀缩的因素是多种多样的,多指标法在选取指标时受指标测定条件和指标数量限制而无法全面地反映膨胀土特性,且这些判定方法给予的推荐胀缩等级也来源于经验,有一定的局限性和片面性。因此采用多指标法时,各指标实测值常会落入不同的膨胀等级界限,有时会导致误判,且不同方