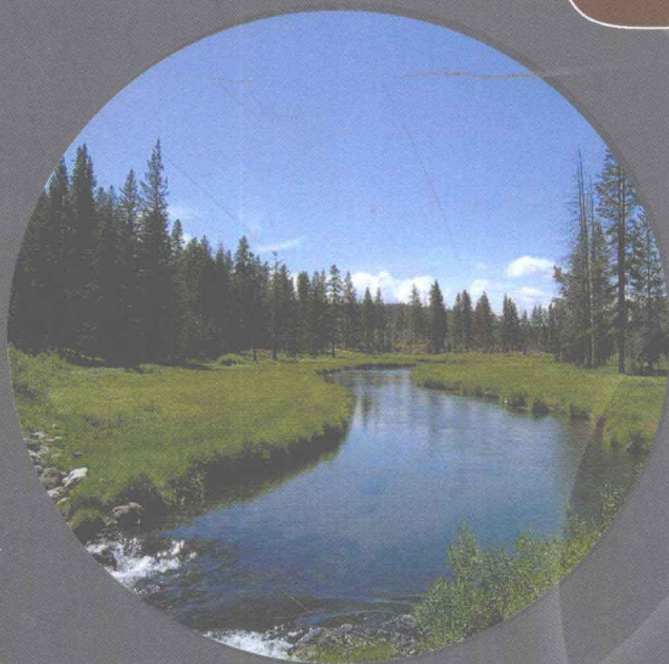




21世纪技术与工程著作系列·地质工程
地质工程江苏省重点学科建设项目

固废改良土及其 环境影响的试验研究

孙树林 著



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·地质工程

地质工程江苏省重点学科建设项目



固废改良土及其环境影响的 试验研究

孙树林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地论述了特殊土及固体废弃物的分类、固体废弃物实验分析评价方法、实验优化设计方法及试验参数敏感性分析方法;着重研究了利用不同掺量固体废弃物(如脱硫灰、铸砂、轮胎胶粉等)改良特殊土(如软土、膨胀土、粉砂土和黏土等)的室内力学试验特征、重金属渗滤特性及其地球物理(视电阻率)特性。

本书可作为高等院校地质、土木、交通、环境、市政等专业教师和研究生参考书,也可供相关领域的科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

固废改良土及其环境影响的试验研究/孙树林著. —北京:科学出版社, 2010

(21 世纪技术与工程著作系列·地质工程;地质工程江苏省重点学科建设项目)

ISBN 978-7-03-028823-3

I. ①固… II. ①孙… III. ①固体废物-废物处理 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 170474 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 9 月第一次印刷 印张:21 1/2

印数:1—1 500 字数:416 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

沉积环境的差异导致一些岩石或土的强度较弱。正是由于这种差异,在工程建设和运行中,强度较弱的特殊土(岩)会造成地质灾害现象。为了避免这些地质灾害的发生,人们采取了多种方法、方式对软土进行处理,特别是近年来人们逐步开始利用固体废弃物对软土进行改良,如用铸造废砂、粉煤灰等掺料来改良软土、粉砂土的工程性质,用做公路路基、填土、固体废弃物填埋场的覆盖层等。

由于在工业制造和人们生活过程中,大量的废弃物,如工业废弃物、城市固体废弃物等不断产生,有关固体废弃物管理已成为世界性的环境话题。随着我国对环境问题的逐步重视,填埋场的不断增加,以及管理费用的增加,废弃材料和工业副产品的利用已成为具有吸引力的,也是可选择的处理废弃物的途径。为了可持续发展,自然资源的高消耗、工业废弃物的大量产生及其所带来的环境污染问题也需要人们去寻找新的解决方法。

在固废循环利用研究方面,虽然我国起步较晚,但近年来人们已逐渐重视废弃材料和工业副产品在建筑材料中的使用,同时也认识到废弃材料和工业副产品的利用可以使环境和生态问题得到部分解决,不仅有助于在水泥、混凝土及其他建筑材料中的应用,也有助于降低水泥和混凝土制造的费用,而且显现出直接的效果,如垃圾填埋费用的减少、能源的节省和环境得到了保护。特别地,这些材料的使用可获得通常使用Portland水泥很难达到的对混凝土等的微结构、力学性质和耐久性改进,也可有效地避免地质灾害的发生。

本书旨在如何充分利用固体废弃物改良土的特性,通过大量室内试验寻找改良土的最佳固废掺和比,以及为达到改善不良地质条件、保护环境、避免地质灾害和二次污染发生的目的进行探索性的研究。本书第一章讨论了土体和固体废弃物的分类;第二、三章介绍了相关试验优化设计和结果分析的方法;第四章研究了铸造废砂、石灰改良膨胀土的室内试验特征;第五章研究了膨胀土-胶粉(ESR)强度及变形特性;第六章

研究了掺脱硫灰改良路基软土的试验特征;第七章研究了掺灰粉砂土的室内试验特征;第八章介绍了掺灰及二灰击实黏土电阻率室内试验特征;第九章叙述了掺铸造废砂改良土的重金试验特征;第十章介绍了掺脱硫灰改良土的渗滤特性。

本书得到了教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2007]1108)的资助,在此表示衷心的感谢!

本书由河海大学“地质工程江苏省重点学科”及“211 工程”建设经费资助出版。

本书由孙树林负责撰稿和统稿,其所反映的研究成果大部分是由作者及其研究团队共同完成的,其中湛军、李方、李润豪、盘霞、魏永耀、张鑫、曹伟等硕士研究生参与了本书的部分工作,特在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2010 年于南京

目 录

前言

第一章 土及固体废弃物的分类	1
1.1 土的工程分类	1
1.1.1 简述	1
1.1.2 土的分类	1
1.2 特殊土的工程地质特性	4
1.2.1 淤泥类土	4
1.2.2 膨胀土	5
1.2.3 红黏土	7
1.2.4 湿陷性黄土	8
1.3 固体废弃物	11
1.3.1 固体废弃物的定义	11
1.3.2 固体废弃物分类	11
1.3.3 固体废弃物的危害	14
1.3.4 固体废弃物的处理	15
1.3.5 固体废弃物的利用	17
参考文献	19
第二章 固废实验分析评价方法	20
2.1 概述	20
2.2 金属分析方法	20
2.2.1 电感耦合等离子体发射光谱	21
2.2.2 火焰原子吸收	21
2.2.3 石墨炉原子吸收	21
2.2.4 氢化物原子吸收	22
2.2.5 冷蒸气原子吸收	22
2.3 试样制备	22
2.3.1 制备地表水和地下水试样的酸消解法	23
2.3.2 制备废水试样方法	24
2.3.3 制备废弃物试样	26

2.3.4	制备含油、润清脂或含蜡废弃物试样	27
2.3.5	制备沉积物、污泥和土壤试样的一个酸消解方法	29
2.3.6	ICP 测定溶液中所含金属的方法	31
2.3.7	原子吸收光谱法测定溶液中金属元素的方法	38
2.4	质量控制	45
2.4.1	试样消解或制备和原子吸收光谱法测定的质控方法	45
2.4.2	ICP 测定溶液中所含金属的质控方法	48
	参考文献	50
第三章	优化设计与敏感性分析	51
3.1	试验设计	51
3.2	正交设计的基本概念	53
3.2.1	指标、因素与水平	53
3.2.2	正交表	54
3.2.3	正交试验设计的基本方法	54
3.2.4	正交试验结果分析	55
3.3	无交互作用的正交设计与数据分析	56
3.3.1	无交互作用正交设计的基本步骤	56
3.3.2	数据分析方法	57
3.4	有交互作用的正交设计与数据分析	59
3.4.1	对有交互效应问题的正交设计与数据分析	59
3.4.2	数据分析	61
3.5	混合水平的正交试验设计	63
3.5.1	混合水平正交表及其用法	63
3.5.2	拟水平法	64
3.6	均匀设计法	64
3.7	敏感性分析	67
3.7.1	简述	67
3.7.2	敏感性分析的目的和任务	68
3.7.3	敏感性分析的步骤	69
3.7.4	敏感性分析法的分类	70
	参考文献	71
第四章	掺脱硫灰改良路基软土的试验特征	73
4.1	概述	73
4.2	脱硫灰的理化特性	73
4.2.1	脱硫灰的形成	73

4.2.2 脱硫灰与粉煤灰的物理指标对比	74
4.2.3 脱硫灰与粉煤灰的化学成分及性质对比	76
4.3 研究区工程地质条件特征	80
4.3.1 采样区概况	80
4.3.2 区域地质概况	81
4.3.3 工程地质条件	83
4.4 掺脱硫灰软土强度的试验方案	85
4.4.1 试验材料	85
4.4.2 前期准备	85
4.5 试验结果分析	93
4.5.1 击实试验	93
4.5.2 无侧限抗压强度试验	96
4.5.3 回弹试验	100
4.5.4 CBR 试验	101
4.6 脱硫灰改良软土的机理分析	102
4.6.1 软土定义与类型	103
4.6.2 脱硫灰改良软土的机理	105
4.6.3 “脱硫灰-石灰”体系改良软土的机理	107
4.7 结论与展望	109
4.7.1 结论	109
4.7.2 展望	110
参考文献	110
第五章 掺铸造废砂、石灰改良膨胀土的试验特征	112
5.1 概述	112
5.1.1 石灰改良膨胀土的研究现状	112
5.1.2 国内外铸造废砂的研究现状	115
5.1.3 研究中的不足之处	117
5.1.4 本章主要工作及技术路线	117
5.2 采样点膨胀土的工程地质特征	119
5.2.1 膨胀土取样点的工程地质剖面特征	119
5.2.2 膨胀土的判别及分类	121
5.3 试验掺入材料特性及试验方案设计	125
5.3.1 试验掺入材料的性质	125
5.3.2 试验方案设计	127
5.4 改良土物理力学试验的结果及分析	129

5.4.1	基本物理性质	129
5.4.2	力学性质	133
5.5	试验结果分析及改良机理初探	137
5.5.1	有荷膨胀率	137
5.5.2	膨胀总率	139
5.5.3	石灰、铸造废砂改良膨胀土的机理	140
5.6	石灰、铸造废砂改良膨胀土参数敏感性分析	142
5.6.1	敏感性分析方法	142
5.6.2	改良土参数敏感性分析	144
5.7	结论与展望	146
5.7.1	结论	146
5.7.2	展望	146
	参考文献	147
第六章	胶粉 (ESR) -膨胀土的强度及变形特性	149
6.1	概述	149
6.1.1	国内外研究现状	149
6.1.2	研究目标和研究内容	150
6.2	试验材料的物理特性及实验方案	152
6.2.1	膨胀土	152
6.2.2	废弃轮胎胶粉	153
6.2.3	试验方案设计	154
6.2.4	样品制作	155
6.3	膨胀土-胶粉的基本物理特性	155
6.3.1	ESR 相对密度	155
6.3.2	ESR 密度	156
6.3.3	ESR 界限含水量	156
6.3.4	ESR 击实	157
6.4	ESR 强度特性	157
6.4.1	ESR 抗剪强度	157
6.4.2	ESR 无侧限抗压强度	163
6.5	ESR 变形特性	166
6.5.1	无荷膨胀量变形	166
6.5.2	ESR 发生胀缩变形的力学条件分析	167
6.6	ESR 强度参数的敏感性分析	169
6.6.1	正交试验的极差敏感性分析	169

6.6.2 正交试验的方差敏感性分析	170
6.7 结论	171
参考文献	172
第七章 掺脱硫灰、石灰改良粉砂土的试验特征	175
7.1 概述	175
7.2 研究区的工程地质特征	175
7.2.1 土样采集	175
7.2.2 土样的基本物理性质	175
7.3 掺入材料特性及试验方案设计	177
7.3.1 掺入材料特性	177
7.3.2 试验方案设计	178
7.3.3 试样制备	179
7.4 掺灰粉砂土的动三轴试验特征	180
7.4.1 素土样的动三轴试验	180
7.4.2 混合土样的动三轴试验	182
7.5 掺灰粉砂土的强度特征	184
7.5.1 无侧限抗压强度	184
7.5.2 应变控制式三轴的抗剪强度	186
7.6 掺灰粉砂土强度参数敏感性分析	199
7.6.1 掺石灰对脱硫灰改良土强度影响	199
7.6.2 掺脱硫灰对石灰改良土强度的影响	200
7.7 结论与展望	201
7.7.1 结论	201
7.7.2 展望	202
参考文献	202
第八章 掺脱硫灰改良土的重金属渗滤特性	204
8.1 重金属渗滤特性及环境影响的研究现状	204
8.1.1 试验方法	204
8.1.2 浸出试验的影响因素	206
8.2 试验材料特性	208
8.2.1 渗滤剂特性	208
8.2.2 土样工程特性	210
8.2.3 粉煤灰与脱硫灰特性	212
8.3 重金属渗滤试验方案设计	216
8.3.1 浸出试验	216

8.3.2 柱渗试验	219
8.4 重金属渗滤浓度的变化规律分析	221
8.4.1 金属离子渗滤浓度随时间的变化关系	221
8.4.2 渗透系数随时间的变化关系	224
8.4.3 渗滤液 pH 随时间的变化关系	227
8.5 金属浸出能力的影响因素初探	228
8.5.1 pH 与离子渗出能力的关系	228
8.5.2 配比与重金属浸出浓度关系	231
8.5.3 粒径大小及颗粒形状与重金属浸出浓度的关系	235
8.6 结论	236
参考文献	237
第九章 掺铸造废砂改良土重金属浸出规律	239
9.1 概述	239
9.1.1 国内外研究现状	239
9.1.2 研究内容	247
9.2 采土样区工程地质特征	248
9.2.1 粉砂土取土点地质概况	248
9.2.2 淤泥质黏土取土点概况	249
9.2.3 土样物理指标特征	250
9.3 试验材料的性质	250
9.3.1 铸造废砂	250
9.3.2 石灰	252
9.3.3 浸取液	252
9.4 试验方案设计	254
9.4.1 搅拌法	254
9.4.2 柱渗实验	255
9.5 试验结果及分析	257
9.5.1 搅拌试验结果及分析	257
9.5.2 柱渗试验结果及分析	259
9.5.3 搅拌试验与柱渗试验结果比较	271
9.6 重金属离子浸出浓度参数敏感性分析	273
9.6.1 敏感性分析方法	273
9.6.2 浸出液 pH 对重金属离子浸出浓度的影响	273
9.6.3 掺砂量对重金属离子浸出浓度的影响	275
9.6.4 浸出时间对重金属离子浸出浓度的影响	277

9.7 重金属离子浸出模型及预测	278
9.7.1 浸出模型建立	278
9.7.2 应用模型预测	279
9.8 结论与展望	279
9.8.1 结论	279
9.8.2 展望	280
参考文献	281
第十章 掺灰及二灰击实黏土电阻率特征	285
10.1 概述	285
10.1.1 电阻率法研究现状分析	285
10.1.2 研究内容	290
10.2 掺灰土的基本物理特性	291
10.2.1 土样	291
10.2.2 粉煤灰	291
10.2.3 石灰	292
10.3 掺灰土的电阻率实验方案	292
10.3.1 简述	292
10.3.2 试验设计、样品制作和试验步骤	296
10.4 石灰土及二灰土物理性质与电阻率的关系	299
10.4.1 石灰及二灰土物理性质指标特征	299
10.4.2 掺灰土的电阻率特征分析	304
10.4.3 物理性质指标与电阻率的关系	308
10.4.4 掺灰量对于电阻率影响	315
10.5 灰土电阻率计算模型	317
10.5.1 简述	317
10.5.2 灰土模型公式的建立	320
10.5.3 不同掺入比灰土模型的建立	324
10.6 结论	327
参考文献	328

第一章 土及固体废弃物的分类

1.1 土的工程分类

1.1.1 简述

土是自然历史的产物,不同成因和不同堆积年代形成的土在工程性质上存在很大差别。通过对土进行合理的分类,就可以根据不同种类土的工程特点选择相应的试验。当土的性质不能满足工程要求时,就可以选择适合土的工程特点的改良或处理方法。

土的工程分类的标准和方法很多,如我国《土的分类标准》(GBJ145—90)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)和《岩土工程勘察规范》(GB 50002—2001)等。目前国内外工程中广泛应用的主要有:①按成因和形成年代划分的地质成因分类;②按土的成分(粒度成分和矿物成分)及其与水相互作用的关系特征划分的土质分类,其中包括按土的粒度成分和土的塑性特性两种划分方法;③工程建筑分类。

1.1.2 土的分类^[1~3]

1. 根据地质成因分类

土按地质成因可分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土、湖积土、海积土、风积土和冰川沉积土。

2. 按形成年代分类

(1) 第四纪晚更新世(Q_3)及其以前沉积的土层

它一般呈超固结状态,具有较高的结构强度。

(2) 第四纪全新世中近期沉积的土层(Q_4)

它一般结构强度较低。

3. 按颗粒级配和塑性指数分类

(1) 土按颗粒大小分类

土按颗粒大小分类如图 1.1 和图 1.2 所示。

	200	60	20	5	2	0.5	0.25	0.075	0.002/mm
巨粒组		粗粒组						细粒组	
漂石 (块石)	卵石 (小块石)	砾 (角砾)			砂			粉粒	黏粒
		粗	中	细	粗	中	细		

图 1.1 粒组划分

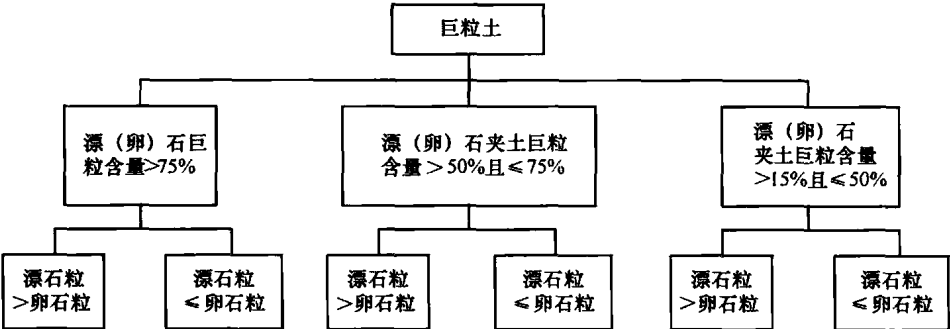


图 1.2 巨粒土划分

(2) 碎石土的分类

碎石土的分类如表 1.1 所示。

表 1.1 碎石土的分类

土 的 名 称	颗 粒 形 状	颗 粒 级 配
漂石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200mm 的颗粒超过全重 50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 20mm 的颗粒超过全重 50%
碎石	棱角形为主	
圆砾	圆形及亚圆形为主	粒径大于 2mm 的颗粒超过全重 50%
角砾	棱角形为主	

(3) 砂土的分类

砂土的分类如表 1.2 所示。

表 1.2 砂土的分类

土 的 名 称	颗 粒 级 配
砾砂	粒径大于 2mm 的颗粒含量占全重 25%~50%
粗砂	粒径大于 0.5mm 的颗粒含量超过全重 50%
中砂	粒径大于 0.25mm 的颗粒含量超过全重 50%
细砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重 85%
粉砂	粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重 50%

砾类土划分如图 1.3 所示。

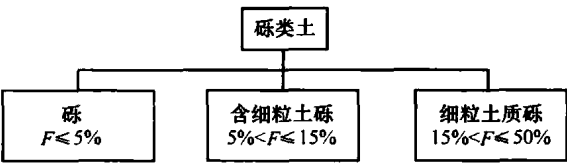


图 1.3 砾类土划分

砂类土划分如图 1.4 所示。

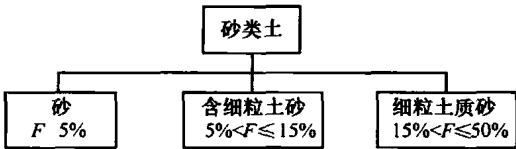


图 1.4 砂类土划分

(4) 粉土的分类

粉土的分类如表 1.3 所示。

表 1.3 粉土的分类

土 的 名 称	颗 粒 级 配
砂质粉土	粒径小于 0.005mm 的颗粒含量不超过全重 10%
黏质粉土	粒径小于 0.005mm 的颗粒含量超过全重 10%

(5) 黏性土的分类

黏性土的分类如表 1.4 所示。

表 1.4 根据塑性指数(I_p)黏性土的分类

土 的 名 称	塑 性 指 数
粉质黏土	$10 < I_p \leq 17$
黏土	$I_p > 17$

细粒土的划分如图 1.5 所示。

4. 按工程特性分类

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中将土分为湿陷性土、红黏土、软土(包括淤泥和淤泥质土)、混合土、填土、多年冻土、膨胀土、盐渍土、污染土等 10 种类型。

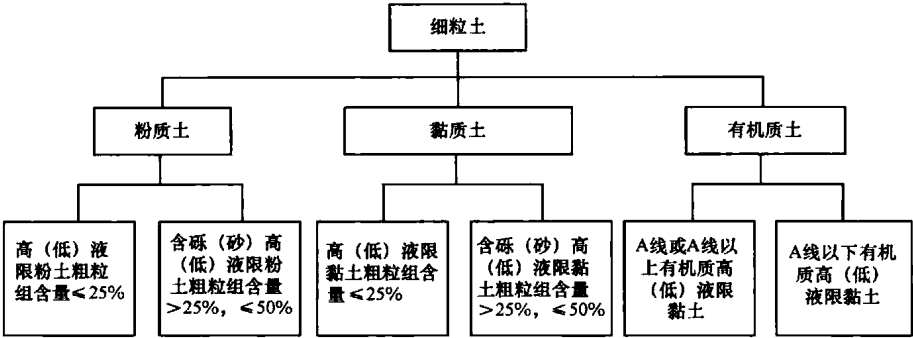


图 1.5 细粒土划分

5. 按有机质含量分类

土根据有机质含量分类如表 1.5 所示。

表 1.5 土根据有机质含量分类

分类名称	有机物含量(Q)
无机土	$Q<5\%$
有机质土	$5\%\leq Q\leq 10\%$
泥炭质土	$10\%<Q\leq 60\%$
泥炭	$Q>60\%$

1.2 特殊土的工程地质特性^[1]

具有一定分布区域或工程意义上具有特殊成分、状态和结构特征的土称为特殊性土。特殊土的种类甚多,常见的有淤泥类土、膨胀土、红黏土、湿陷性黄土类土等。

1.2.1 淤泥类土

1. 形成条件和成分结构

淤泥类土是指在水流缓慢、不通畅、缺氧和饱水条件下的环境中沉积,且在有微生物参与作用的条件下,含较多的有机质及疏松软弱的粉质黏性土。

淤泥类土从粒度划分主要为粉质黏土和粉质砂土,且含大量黏土矿物和部分石英、长石、云母,其有机质含量较多(5%~15%),呈灰、灰蓝、灰绿和灰黑等暗淡的颜色,污染手指并有臭味,常为蜂窝状、疏松多孔,定向排列明显、层理较发育,常具薄层状构造。

我国淤泥类土有沿海沉积淤泥类土、内陆和山区湖盆地及山前谷地沉积地淤泥类土等。其中,沿海沉积的淤泥类土,分布较稳定,厚度较大,土质较疏松软弱,成因上有潟湖相沉积、溺湖相沉积、滨海相沉积和三角洲相沉积等;分布在内陆平原区地淤泥类土的成因有湖泊、河漫滩和牛轭湖等。

2. 工程地质性质

淤泥类土的工程地质性质主要有高孔隙比(1.0~2.0)、饱水(饱和度一般>90%)、天然含水率(50%~70%)大于液限(一般为40%~60%)。未扰动时,处于软塑状态,一经扰动,结构破坏,处于流动状态,其透水性极弱,且垂直方向地渗透系数较水平方向小些;高压缩性(a_{1-2} 一般为0.7~1.5MPa)随天然含水率的增大而增大;抗剪强度很低,且与加荷速度和排水固结条件有关,在不排水条件下,三轴快剪值 $\varphi \approx 0$;直剪值 $\varphi = 2^\circ \sim 5^\circ$,黏聚力 $c = 0.02\text{MPa}$;在排水条件下,抗剪强度随固结程度提高而增大,固结快剪值 $\varphi = 10^\circ \sim 15^\circ$,黏聚力 $c = 0.02\text{MPa}$;有较显著的触变性和蠕变性。

1.2.2 膨胀土

1. 膨胀土的定义

膨胀土是一种富含亲水性黏土矿物,并且随含水量增减,体积发生显著胀缩变形的高塑性黏土。其黏土矿物主要是蒙脱石和伊利石,二者吸水后强烈膨胀,失水后收缩,长期反复多次胀缩,强度衰减,可能导致建筑物开裂、下沉、失稳破坏。

2. 膨胀土的性质

膨胀土一般分布在盆地内岗、山前丘陵地带和二、三级阶地上。膨胀土在全世界均有分布,我国是世界上膨胀土分布面积较大的国家之一,20多个省、自治区、直辖市都有分布。与其他地区相比,我国亚热带气候区的广西、云南等地的膨胀土胀缩性强烈。膨润土的形成时代自第三纪的上新世(N_2)开始到上更新世(Q_3),多为上更新统地层,其大多数是上更新世及以前的残坡积、冲积、洪积物,也有晚第三纪至第四纪的湖泊沉积及其风化层。

从岩性上看,膨胀土以黏土为主,具有黄、红、灰、白等色,土中含有较多的黏土,黏土占总数的98%,黏土矿物多为蒙脱石、伊利石和高岭石。蒙脱石含量越多,膨胀性越强烈。其结构致密,呈坚硬至硬塑状态,强度较高,内聚力较大;裂隙发育,竖向、斜交和水平三种均有,可见光滑镜面和擦痕;富含铁、锰结核和钙质结核;化学成分为 SiO_2 (45%~66%)、 Al_2O_3 (13%~31%)、 Fe_2O_3 (3%~15%)、硅铝率(K)为3~5。