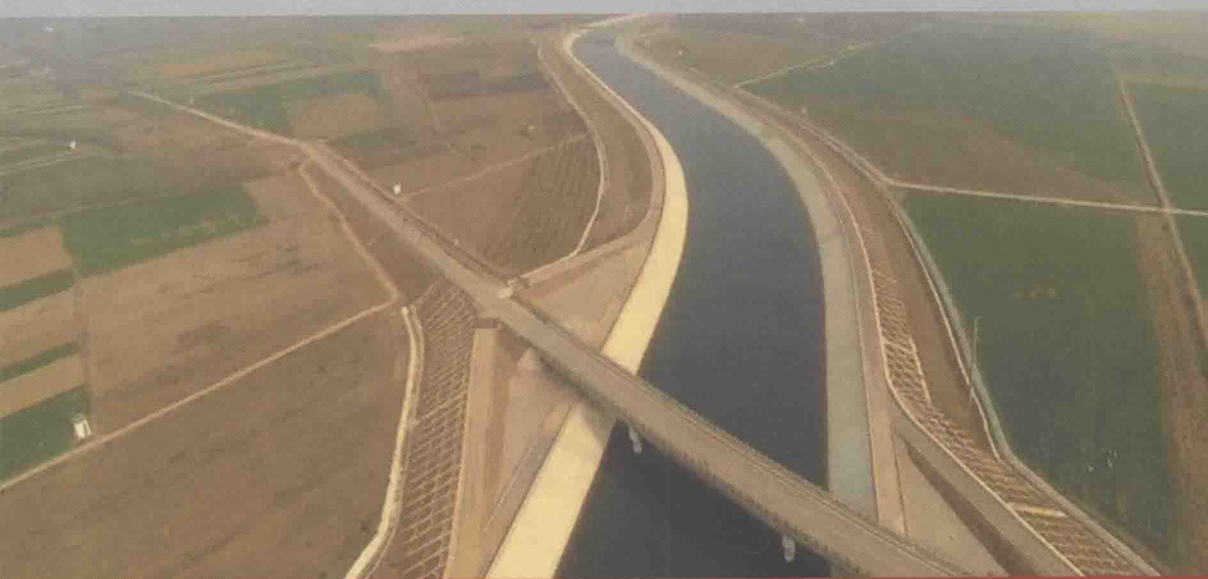


强膨胀土渠坡破坏机理 及处理技术

陈善雄 赵 旻 罗红明 等 著
冷星火 刘祖强



科学出版社

强膨胀土渠坡破坏机理 及处理技术

陈善雄 赵 旻 罗红明 等 著
冷星火 刘祖强

本书工作获得“十二五”国家科技支撑计划课题
(2011 BAB101302)和国家自然科学基金面上项目
(51579236)资助



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书紧密结合南水北调中线工程强膨胀土渠道处理设计面临的技术难题,研究了南水北调中线工程强膨胀土工程特性与地质结构、强膨胀土渠坡滑动破坏和膨胀变形规律及强膨胀土渠坡处理技术,揭示了强膨胀土的工程地质特征及工程特性,阐明了强膨胀土渠坡变形机理与破坏模式及其渠坡变形规律,提出了强膨胀土渠道边坡稳定性分析方法,建立了强膨胀土渠坡变形和渠基回弹与影响因子的关系,提出了换填与抗滑措施相结合的强膨胀土渠道处理技术。

本书可供水利水电、交通土建、地质灾害防治等领域以及高等院校、科研院所从事工程地质、岩土工程勘测设计的科研人员、教学人员、技术人员、研究生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

强膨胀土渠坡破坏机理及处理技术/陈善雄等著. —北京: 科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-046610-5

I. ①强… II. ①陈… III. ①膨胀土—渠道—边坡—维护 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 302758 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 9 月第一次印刷 印张: 35 1/4 插页: 12

字数: 693 000

定价: 238.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

南水北调工程是迄今为止世界上最大的调水工程，是优化我国水资源配置的重大战略性基础设施。全长约 1 432 km 的南水北调中线工程总干渠有约 387 km 的渠道穿越膨胀土地区。膨胀土因其具有特殊的工程特性，易造成渠坡失稳，对工程的安全运行影响很大，而且其处理难度、处理的工程量和投资也较大，特别是，南水北调中线工程沿线分布的强膨胀土渠段由于具有更强的膨胀潜势，对渠道的危害更为严重，因而，膨胀土，尤其是强膨胀土渠道合理处置成为南水北调中线工程设计面临的关键技术难题。

作者及其研究团队围绕南水北调中线工程强膨胀土渠道边坡变形破坏机理及处理技术，采用现场地质调查、室内试验、现场试验、理论分析与数值模拟相结合的方法开展研究，系统揭示了中线工程沿线强膨胀土工程特性及地质结构特征；查明了强膨胀土滑坡特征及其变形破坏特征，提出了考虑湿胀软化效应的强膨胀土边坡浅表层变形数值模拟方法和考虑裂隙空间分布和裂隙面强度的强膨胀土边坡深层滑动稳定性分析方法，通过综合监测分析获得了强膨胀土渠坡变形和膨胀变形基本规律，揭示了强膨胀土渠坡变形和渠基回弹与影响因子的关系，阐明了不同类型的强膨胀土渠坡变形破坏模式与机理；结合渠道工程的结构特点，创新性提出了抗滑桩 + 坡面梁框架式支护体系结构，发展了抗滑桩 + 坡面梁框架式支护体系结构设计方法，优化了强膨胀土渠道综合处理技术，为不同膨胀性渠段设计、施工、运行管理提供了技术支撑。值此南水北调中线工程通水一周年之际，将南水北调中线工程强膨胀土渠坡破坏机理及处理技术研究的点滴成果汇编成书，希望对中国膨胀土区域工程建设及运营维护有所裨益。

本书由陈善雄、赵旻、冷星火、刘祖强、罗红明编著，参加编著的人员有赵鑫、杨汉良、戴张俊、王磊等。各篇的主要编写者是：第一篇，赵旻、赵鑫、杨汉良；第二篇，陈善雄、罗红明、戴张俊；第三篇，冷星火、王磊；第四篇，刘祖强。全书由陈善雄、赵旻、冷星火、刘祖强、罗红明统稿。

本书是在“十二五”国家科技支撑项目课题“强膨胀土渠道处理技术”研究成果的基础上撰写的，该项目得到了国务院南水北调工程建设委员会办公室、南水北调中线干线工程建设管理局、中国科学院武汉岩土力学研究所、长江勘测规划设计研究有限责任公司、长江岩土工程总公司（武汉）、河海大学、河北省水利水电第二勘测规划设计研究院，以及南水北调中线工程各建管单位、参建施工单位与监理单

位的大力支持，也包含了他们大量的劳动和心血，作者谨表深切的谢意。

由于水平所限，书中难免会有不妥甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 7 月 6 日

目 录

第一篇 强膨胀土工程特性及地质结构

第 1 章 绪论	3
1.1 问题提出	3
1.2 强膨胀土机理及处理技术研究现状	4
1.2.1 膨胀土边坡滑动破坏机理	4
1.2.2 膨胀土边坡稳定性分析方法	6
1.2.3 膨胀土边坡处理技术	9
1.2.4 膨胀土边坡监测技术	10
1.3 研究内容与技术路线	13
1.3.1 课题研究内容	13
1.3.2 技术路线	14
第 2 章 强膨胀土 (岩) 矿化成分	16
2.1 化学成分	16
2.2 矿物成分	19
第 3 章 强膨胀土 (岩) 基本物理力学特性	24
3.1 基本物理特性指标	24
3.2 压缩特性	30
3.3 抗剪强度	32
3.3.1 室内剪切试验	32
3.3.2 现场大剪试验	34
3.3.3 现场大剪试验与室内抗剪试验成果对比分析	43
3.3.4 物理力学参数推荐值的选取	44
3.3.5 反复胀缩条件下的抗剪强度	46
3.3.6 不同含水率条件下的抗剪强度	49
第 4 章 强膨胀土 (岩) 胀缩特性与水理特性	52
4.1 胀缩特性	52
4.1.1 强膨胀土 (岩) 胀缩特性指标统计分析	52
4.1.2 胀缩特性指标与物理性质的关系	57

4.2	渗透特性	60
4.2.1	室内渗透试验	60
4.2.2	现场注水试验	63
4.2.3	室内渗透试验与现场注水试验对比分析	64
4.3	崩解特性	64
4.3.1	强膨胀土崩解类型	64
4.3.2	强膨胀岩崩解类型	68
4.3.3	崩解类型影响因素分析	70
第 5 章	强膨胀土 (岩) 裂隙特征	72
5.1	裂隙成因类型	72
5.1.1	原生裂隙	72
5.1.2	次生裂隙	73
5.1.3	构造裂隙	74
5.2	裂隙要素分析	74
5.3	裂隙发育规律分析	77
5.4	裂隙面抗剪强度	83
5.4.1	室内试验	83
5.4.2	现场大剪试验	84
5.4.3	裂隙面抗剪强度推荐值的选取	85
第 6 章	强膨胀土 (岩) 结构特性	87
6.1	微观结构	87
6.2	宏观结构	93
6.2.1	浙川段强膨胀土宏观结构	94
6.2.2	南阳 1 段强膨胀土宏观结构	94
6.2.3	南阳 2 段强膨胀土宏观结构	95
6.2.4	南阳 3 段强膨胀岩宏观结构	96
6.2.5	鲁山段强膨胀岩宏观结构	97
6.2.6	邯郸段强膨胀岩宏观结构	97
第 7 章	不同膨胀潜势膨胀土 (岩) 工程特性对比分析	99
7.1	化学、矿物成分对比分析	99
7.1.1	膨胀土 (岩) 化学成分	99
7.1.2	膨胀土 (岩) 的矿物成分	102
7.2	物理特性对比分析	104
7.2.1	膨胀土 (岩) 颗粒组成	104
7.2.2	膨胀土 (岩) 基本物理性指标	107

7.3	压缩特性对比分析	111
7.4	抗剪强度对比分析	113
7.4.1	室内力学试验成果的对比与分析	113
7.4.2	现场大剪试验成果对比分析	122
7.4.3	反复胀缩对膨胀土(岩)强度影响的对比分析	122
7.4.4	不同含水率下膨胀土体抗剪强度的对比分析	123
7.5	胀缩特性对比分析	125
7.5.1	膨胀土不同压力下膨胀率对比分析	125
7.5.2	膨胀土(岩)的膨胀力的对比分析	130
7.5.3	膨胀土(岩)无荷膨胀率的对比分析	131
7.5.4	膨胀土(岩)收缩系数的对比分析	131
7.5.5	膨胀土(岩)线缩率的对比分析	132
7.5.6	膨胀土(岩)体缩率的对比分析	132
7.6	水理特性对比分析	133
7.6.1	膨胀土(岩)的渗透特性对比分析	133
7.6.2	膨胀土的崩解特性对比分析	136
7.7	裂隙特征对比分析	137
7.7.1	膨胀土的裂隙发育特征	137
7.7.2	裂隙面强度的分析对比	138
7.8	结构特征对比分析	138
7.8.1	微观特征对比分析	139
7.8.2	宏观特征对比分析	139

第二篇 强膨胀土渠坡滑动破坏和膨胀变形规律

第 8 章	强膨胀土渠坡破坏特征调研与分析	143
8.1	强膨胀土渠坡变形破坏调研	143
8.1.1	渠坡变形破坏调研方法	143
8.1.2	典型强膨胀土渠坡变形破坏调研	144
8.1.3	典型强膨胀岩渠坡变形破坏调研	148
8.2	强膨胀土渠坡破坏特征分析	150
8.2.1	渠坡失稳调查	150
8.2.2	强膨胀土渠坡失稳特征	152
8.2.3	强膨胀岩渠坡失稳特征	152
8.3	中强膨胀土渠坡破坏特征对比分析	153

8.3.1	中膨胀土渠坡破坏特征	153
8.3.2	强膨胀土渠坡地质结构	153
8.3.3	中强膨胀土渠坡破坏特征的差异性	154
第 9 章	裂隙性强膨胀土膨胀模型	156
9.1	膨胀土胀缩规律及其指标测定	156
9.1.1	自由膨胀率	156
9.1.2	膨胀变形规律与线膨胀率	157
9.1.3	收缩特性与指标分析	159
9.2	强膨胀土 K_0 应力状态膨胀模型	160
9.2.1	试验方案	160
9.2.2	膨胀率特征及变化规律	160
9.2.3	强膨胀土 K_0 膨胀模型构建	162
9.3	裂隙强膨胀土非线性回归膨胀模型	166
9.3.1	裂隙特征与定量概化方式	166
9.3.2	裂隙膨胀土湿胀影响因素分析	167
9.3.3	不同裂隙率膨胀土膨胀模型与敏感性分析	171
9.3.4	裂隙强膨胀土非线性回归膨胀模型	175
9.4	裂隙膨胀土 BP 网络膨胀模型	177
9.4.1	BP 神经网络算法	177
9.4.2	BP 网络的 Matlab 实现方法	179
9.4.3	强膨胀土 BP 网络膨胀预测模型	180
9.4.4	网络模型预测结果分析	182
第 10 章	降雨诱发强膨胀土渠坡浅层滑动破坏模型试验	186
10.1	模型试验设计	186
10.1.1	几何尺寸	186
10.1.2	物理模拟	188
10.1.3	边界条件	188
10.2	试验方法与过程控制	189
10.2.1	土体填筑与质量控制	189
10.2.2	监测元器件与布设方案	191
10.2.3	试验方法与过程控制	196
10.3	边坡物理状态变化特征	200
10.3.1	裂隙特征与表面形态	200
10.3.2	径流与汇水现象	202
10.4	边坡渗流场变化特征	203

10.4.1	不同时刻边坡渗流分布特征	203
10.4.2	边坡土体含水率时程变化规律	204
10.4.3	边坡土体含水率空间分布与变化规律	205
10.5	边坡湿胀变形特征与演化规律	208
10.5.1	边坡吸湿变形时程变化规律	208
10.5.2	边坡吸湿变形空间分布特征	210
10.5.3	边坡脱湿过程中裂隙演化规律	213
10.5.4	变形场与渗流场的相关关系	215
10.6	边坡应力场变化规律	218
第 11 章	考虑湿胀软化效应的膨胀土边坡变形破坏分析方法	221
11.1	边坡湿胀软化的解耦—等效分析方法	221
11.2	边坡渗流机理与定解分析	223
11.3	膨胀土吸湿强度软化特性	225
11.4	膨胀土湿胀效应的热等效模拟	228
11.5	数值实现中的关键问题	231
第 12 章	膨胀土边坡渗流—变形—应力与稳定性数值模拟	236
12.1	数值模拟方案	236
12.1.1	渗流场计算方案	236
12.1.2	应力应变场计算方案	238
12.2	降雨过程中渗流场的演化规律	240
12.2.1	均质边坡瞬态渗流场	240
12.2.2	降雨过程中渗流场的演化规律	242
12.2.3	边坡渗流特性影响因素分析	244
12.3	边坡表面变形与发展规律	248
12.3.1	边坡表面水平变形特征	248
12.3.2	边坡表面竖向变形特征	249
12.3.3	边坡表面变形发展规律	250
12.4	边坡剪应力分布演化特征	253
12.5	边坡塑性应变演化规律	254
12.6	膨胀土浅层边坡破坏模式	255
12.7	膨胀土边坡变形失稳控制因素分析	256
12.7.1	土体膨胀性	256
12.7.2	土体抗剪强度	259
12.7.3	初始孔隙水压力	261
12.7.4	降雨强度与历时	264

第 13 章 考虑裂隙空间分布和裂隙面强度的强膨胀土边坡深层滑动稳定性分析	267
13.1 强膨胀土中裂隙与充填物特性及其力学特性	267
13.1.1 含夹层三轴试样制样装置	267
13.1.2 含夹层三轴试样制样方法	268
13.1.3 含裂隙充填物的膨胀土三轴试验方案	269
13.1.4 含裂隙充填物的膨胀土力学特性	270
13.2 考虑裂隙的极限平衡分析方法	275
13.3 滑坡实例分析	277
13.3.1 滑坡模型概化	277
13.3.2 稳定分析结果讨论	278
第 14 章 强膨胀土渠坡滑动破坏机理	283
14.1 强膨胀土渠坡滑动破坏过程分析	283
14.1.1 典型滑坡概况及地质条件	283
14.1.2 滑坡过程及形态	284
14.1.3 滑坡揭露内部特征及分析	285
14.1.4 膨胀土渠坡变形破坏过程	289
14.2 强膨胀土渠坡滑动破坏模式	290
14.2.1 浅层强膨胀土 (岩) 渠坡滑动破坏模式	290
14.2.2 深层强膨胀土渠坡滑动破坏模式	290
14.3 强膨胀土渠坡滑动机理	291
14.3.1 强膨胀土浅层滑坡机理	291
14.3.2 强膨胀土深层滑坡机理	291
14.4 中强膨胀土渠道滑坡机理对比分析	292
14.4.1 中膨胀土渠道滑坡机理	292
14.4.2 中强膨胀土 (岩) 渠道滑坡机理的差异性	293

第三篇 强膨胀土渠坡处理技术

第 15 章 强膨胀土渠坡处治技术	297
15.1 膨胀土渠坡处治技术的发展	297
15.2 强膨胀土渠坡浅表层破坏处治技术	299
15.2.1 防渗截排措施	300
15.2.2 换填保护措施	300

15.3 强膨胀土渠坡深层破坏处治技术	302
15.3.1 削坡减载	302
15.3.2 抗滑支挡措施	302
第 16 章 强膨胀土渠坡处治技术设计	303
16.1 强膨胀土渠坡处治技术设计原则	303
16.2 强膨胀土渠坡坡比拟定	303
16.3 强膨胀土渠坡渗控与截排水设计	306
16.3.1 设计原则	306
16.3.2 强膨胀土渠道过水断面渗控设计	307
16.3.3 强膨胀土渠坡截排水设计	321
16.4 强膨胀土渠坡换填保护方案设计	325
16.4.1 换填保护材料选择	325
16.4.2 保护层换填厚度	334
16.4.3 保护层换填范围	340
16.5 强膨胀土渠坡支挡设计	347
16.5.1 支挡结构的设计要点	347
16.5.2 强膨胀土渠坡稳定计算	348
16.5.3 抗滑桩支挡设计	352
16.5.4 框架组合支挡结构设计	363
16.5.5 微型桩支挡结构设计	370
16.6 强膨胀土渠坡处治方案优选	374
第 17 章 强膨胀土渠坡处治技术施工	380
17.1 防渗截排措施施工	380
17.1.1 防渗措施施工	380
17.1.2 排水垫层	388
17.1.3 排水盲沟	389
17.1.4 透水软管	391
17.1.5 PVC 排水管	392
17.1.6 逆止阀	394
17.1.7 施工要点	395
17.2 水泥改性土换填层施工	396
17.3 微型桩施工	397
17.3.1 注浆钢管桩	397

17.3.2 伞型锚	400
17.4 抗滑桩施工	400
17.4.1 成孔方法及施工机械	400
17.4.2 施工工艺	401
17.4.3 施工要点	407
17.4.4 施工中常见问题的原因及处理措施	408
17.5 坡面梁施工	409
17.5.1 施工工艺	409
17.5.2 施工技术要求	412
第 18 章 强膨胀土渠坡处治典型案例	416
18.1 浅挖强膨胀土渠坡处治实例	416
18.1.1 工程地质	416
18.1.2 处理措施	418
18.2 深挖强膨胀土渠坡处治实例	418
18.2.1 工程地质	418
18.2.2 处理措施	421
18.3 处理效果	423
18.3.1 坡面防护	423
18.3.2 抗滑桩支护效果	426
18.3.3 坡面梁钢筋应力分析	439
 第四篇 强膨胀土渠坡变形监测 	
第 19 章 渠坡变形监测设计	443
19.1 监测布置	443
19.1.1 监测布置原则及要求	443
19.1.2 监测项目及精度指标	444
19.1.3 强膨胀土段渠坡监测布置 —— 浙川段	445
19.1.4 强膨胀岩渠基段监测布置 —— 南阳 3 段	449
19.1.5 强膨胀岩渠坡段监测布置 —— 鲁山段	451
19.2 监测仪器设备埋设技术	455
19.2.1 监测网和监测点观测墩	455
19.2.2 垂直位移监测点	460
19.2.3 测斜管钻孔及埋设	460

19.2.4	倾斜传感器	461
19.2.5	电磁沉降环	462
19.2.6	水分传感器	462
19.2.7	水势传感器	462
19.2.8	温度传感器	463
19.2.9	自动观测站建造	463
19.3	观测	464
19.3.1	监测网和监测点观测	464
19.3.2	钻孔测斜管观测	465
19.3.3	电磁沉降环观测	465
19.3.4	各类传感器观测	465
19.3.5	观测周期	466
第 20 章	渠坡自动化综合监测系统	467
20.1	系统设计	467
20.1.1	系统设计原则和目标	467
20.1.2	系统关键技术	468
20.1.3	系统传感器布设	468
20.1.4	系统结构	469
20.2	传感采集层	470
20.2.1	各类传感器及其指标	470
20.2.2	智能数据采集仪	472
20.2.3	供电系统	476
20.2.4	防雷系统	477
20.3	数据传输层	477
20.3.1	GPRS 模块应用配置	477
20.3.2	GPRS 模块和智能数据采集仪组网	478
20.3.3	GPRS 模块和监测系统计算机通信	478
20.4	系统应用层	479
20.4.1	管理平台软件	479
20.4.2	远程 PC 客户端	485
20.4.3	Web 网页	485
第 21 章	渠坡变形特征分析	487
21.1	强膨胀土渠坡段变形特征分析——浙川段	487

21.1.1	渠坡变形原因量分析	488
21.1.2	表层土体变形	489
21.1.3	深部土体位移	490
21.2	强膨胀岩渠基段变形特征分析 —— 南阳 3 段	493
21.2.1	变形原因量分析	493
21.2.2	表层土体变形分析与预警	495
21.2.3	深部土体位移	497
21.2.4	渠基回弹规律分析	508
21.3	强膨胀岩渠坡段变形特征分析 —— 鲁山段	515
21.3.1	变形原因量分析	515
21.3.2	表层土体变形	517
21.3.3	深部土体位移	518
第 22 章	渠坡变形影响因子分析及变形模型	520
22.1	变形影响因子灰关联分析	520
22.1.1	灰关联度分析方法	521
22.1.2	渠坡位移及其影响因子关联分析	525
22.1.3	大气降雨与土体含水率滞后时间和影响深度分析	530
22.2	渠坡变形和渠基回弹模型	534
22.2.1	统计模型基本方法	534
22.2.2	强膨胀土渠顶垂直位移模型	534
22.2.3	强膨胀岩渠基回弹模型	538
参考文献		541
索引		547
彩图		

第一篇 强膨胀土工程特性及地质结构

