



黄土地区边坡冻融灾害 发生机理研究

许健 栾桂涛 著



科学出版社

非外借

黄土地区边坡冻融灾害 发生机理研究

许 健 栾桂涛 著

国家自然科学基金面上项目（项目批准号：51478385）
国家自然科学基金青年科学基金项目（项目批准号：51208409）

资助

科学出版社

内 容 简 介

本书通过系统总结国内外关于土体冻融损伤、冻融过程土体水分迁移及寒区边坡稳定性的研究成果,围绕黄土地区边坡冻融灾害发生机理问题,依托国家自然科学基金项目的资助开展了以下内容的研究:黄土地区边坡冻融病害调查及现场测试研究、冻结过程黄土水分迁移特征研究、黄土冻融过程抗剪强度劣化机理试验研究、黄土冻融过程渗透特性试验研究、黄土地区边坡冻融模型试验研究、黄土地区边坡冻融稳定性分析及结论与展望。

本书可作为水利、土建、岩土、地质等专业的教师、研究生用书,还可供对寒区工程和黄土力学有兴趣的研究生、科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土地区边坡冻融灾害发生机理研究/许健,栾桂涛著. —北京:科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-054482-7

I. ①黄… II. ①许… ②栾… III. 黄土区-冻融作用-滑坡-发生机制-研究 IV. ①P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 223231 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:陶丽荣

责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华设计部

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 12

字数: 230 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

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

前 言

黄土是一种在特定环境中形成的具有特殊性质的土。在我国,黄土分布区是重要的建设和能源基地,著名的黄土山城——兰州、西宁、宝鸡、天水、延安等位于其中,这里沃野千里、谷稼殷实,滋养了中华民族的祖先,养育了世世代代黄土地人。但是,由于黄土土性复杂、节理裂隙发育,黄土地区沟壑纵横、地形破碎,在自然条件及人类工程活动影响下,容易产生滑坡、崩塌及泥石流等灾害,严重危及各类工程建设及人民生命财产的安全,制约着当地经济的可持续发展。因此,黄土地区边坡的稳定性评价及防护对策历来是工程建设中特别关注的技术课题。对此,已经有很多研究学者开展了比较深入、系统的研究。

但是,由于黄土地区处于季节冻土区,黄土地区边坡受季节冻融作用的影响显著,每年春季发生的冻融灾害非常频繁。20 世纪 80 年代以来,在季节性冻融作用强烈的我国西北黄土高原地区,相继发生了洒勒山、古刘、龙西、黄茨等一系列重大滑坡灾害,造成了巨大的生命财产损失。以甘肃省永靖县盐锅峡镇黑方台黄土滑坡为例,统计该区黄土滑坡发生的时间,每年以 3 月滑坡发生的频率最高,1~3 月发生滑坡数量占到了滑坡总数的 34%,该时间段正是西北地区冬去春来、气温回升、季节性冻土开始消融的季节。2011 年入春以来,随着气温升高,陕西省榆林市横山县韩岔乡韩岔村及子洲县石沟村相继发生黄土滑坡(崩塌),造成直接经济损失 50 余万元;甘肃省东乡县撒尔塔文体广场及永靖县西河镇二房村大房台先后发生黄土滑坡,其中撒尔塔文体广场护坡大面积塌陷滑坡,滑坡体长 100m、宽 70m、高 52m,滑坡土方量达 $20.7 \times 10^4 \text{m}^3$,经济损失 2 亿多元,半个县城受到波及。黄土地区边坡冻融灾害主要表现为浅层冻融滑塌和崩塌,多发生于春季,其危害是十分严重的。主要通过灾害调查对黄土地区边坡冻融灾害发生的原因进行初步的揭示,文献资料很少,机理性研究尚缺乏文献资料。由于机理性研究不足,目前对黄土地区边坡冻融灾害尚不能进行量化分析和预测,灾前难以采取有效措施。因此,考虑到冻融期黄土滑坡危害巨大,对黄土地区边坡冻融灾害问题进行深入研究是必要的。

对黄土地区边坡冻融灾害问题的研究,目前主要是通过灾害调查进行,虽然已经揭示出春季黄土地区边坡冻融现象的主要原因与特征,但尚未建立冻融条件与黄土地区边坡冻融灾害的对应量化关系,尚不能回答什么样的冻融条件可导致黄土地区边坡冻融灾害?会导致哪些边坡出现冻融灾害?黄土地区边坡冻融失稳的具体演化规律如何?这需要揭示冻融变化引起的边坡土体的水分场和强度场的

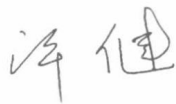
变化及边坡失稳过程,即需要对黄土地区边坡冻融灾害发生机理进行深入、系统研究,以期根据不利的冻融条件对黄土地区边坡稳定性进行科学评价,并规范寒区黄土地区边坡的设计,这对预测边坡冻融灾害、保证广大居民生命财产安全及加快黄土地区城镇化进程等均具有重要意义。基于此,本书主要基于作者国家自然科学基金项目的研究成果,试图以更开阔和全面的视角向读者展示黄土地区边坡冻融灾害问题所涉及的研究领域、研究方法和研究热点,希望能为广大科技人员和研究生提供一个学习和研究黄土地区边坡冻融稳定性问题的基本思路、方法、框架和基础研究资料。

本书的主要内容如下:

第1章主要介绍了与黄土地区边坡冻融稳定性问题相关的研究成果,目的是通过这一章的学习,对土体冻融损伤、冻土水分迁移及寒区边坡稳定性等相关问题的研究现状有一个全面系统的认识。第2章主要针对黄土地区边坡冻融病害调查及黄土冻融过程水热现场测试结果进行分析和总结。第3章主要论述了黄土地区边坡冻融灾害的主要诱因——水分迁移,对水分迁移的概念、特点及影响因素等进行了详细试验研究和理论计算分析。第4章和第5章主要对黄土冻融、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、三轴渗透和剪切试验结果进行全面分析,从微观与表观相结合的角度对黄土冻融过程剪切强度劣化和渗透规律进行阐述。第6章结合季节性冻土区黄土地区边坡冻融特点,对黄土地区边坡冻融稳定性进行了室内大比例尺模型试验研究,并据此对黄土地区边坡冻融过程水热力变化特点进行详细阐述。第7章基于前述黄土冻融过程强度试验数据,对冻融条件下黄土地区边坡稳定性影响因素进行全面计算分析。第8章对本书阐述的研究成果进行了全面总结,并对后续研究工作进行展望。

本书是在作者系统梳理国家自然科学基金研究成果的基础上,构思黄土地区边坡冻融稳定性研究整体框架。以下人员负责收集、整理、撰写相关章节内容:第1章由许健(西安建筑科技大学)和栾桂涛(中国路桥工程有限责任公司)执笔,张辉(西安科技大学)完成部分资料收集工作;其余章节由许健执笔;最后由许健审定、修改、编排和定稿。

由于作者时间、精力、能力及篇幅的限制,疏漏之处敬请读者谅解。



2017年8月于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 土体冻融损伤理论	6
1.2.2 冻土水分迁移	10
1.2.3 寒区边坡稳定性	13
1.2.4 研究现状总结	14
1.3 主要研究内容及研究思路	15
1.3.1 主要研究内容	15
1.3.2 研究思路	17
参考文献	17
第 2 章 黄土地区边坡冻融病害调查及现场测试研究	23
2.1 黄土高原概况	23
2.1.1 黄土高原气候	23
2.1.2 黄土高原地貌	24
2.1.3 黄土高原气象	30
2.2 黄土地区边坡冻融病害现场调研与测试方案	30
2.2.1 调研方案	33
2.2.2 测试方案	34
2.3 黄土地区边坡冻融病害调研结果与分析	35
2.3.1 黄土地区边坡支护结构冻融病害	36
2.3.2 黄土地区边坡表层冻融剥蚀	37
2.3.3 黄土地区边坡冻融层状剥落	38
2.3.4 黄土地区边坡小型冻融崩塌	40
2.4 季节性冻结黄土层水热现场测试结果与分析	40
2.5 本章小结	43
参考文献	44

第 3 章 黄土冻结过程水分迁移特征研究	45
3.1 引言	45
3.2 黄土冻结过程水分迁移试验研究	47
3.2.1 试验方案设计	47
3.2.2 温度场分析	50
3.2.3 水分场分析	53
3.3 已冻黄土水分迁移试验研究	57
3.3.1 试验方案设计	57
3.3.2 试验结果分析	58
3.4 冻结过程水分迁移机理分析	60
3.5 黄土冻结过程水分迁移数值计算分析	62
3.5.1 水分场的数值计算方法	62
3.5.2 温度场的数值计算方法	65
3.5.3 相变界面水头的确定	68
3.6 自然气候条件下浅层黄土冬季温度场数值计算分析	75
3.7 自然气候条件下浅层黄土水分场数值计算分析	79
3.8 本章小结	80
参考文献	81
第 4 章 黄土冻融过程抗剪强度劣化机理试验研究	83
4.1 引言	83
4.2 试验材料	84
4.3 试验方案与步骤	85
4.3.1 原状黄土试样制备	85
4.3.2 重塑黄土试样制备	86
4.3.3 冻融循环试验	86
4.3.4 SEM 试验	87
4.3.5 剪切试验	88
4.4 试验结果与分析	89
4.4.1 微观结构分析	89
4.4.2 表面结构特征分析	94
4.4.3 抗剪强度劣化规律分析	98
4.5 强度劣化预测模型	107
4.5.1 多变量最优拟合预测模型	107

4.5.2 神经网络预测模型	109
4.6 本章小结	113
参考文献	114
第5章 黄土冻融过程渗透特性试验研究	116
5.1 引言	116
5.2 试验方案与步骤	117
5.2.1 试样制备	117
5.2.2 冻融循环试验	118
5.2.3 三轴渗透试验	118
5.3 试验结果与分析	119
5.3.1 表观结构特征	119
5.3.2 渗透系数	120
5.4 渗透系数预测模型	127
5.4.1 渗透系数多变量最优拟合预测模型	127
5.4.2 神经网络预测模型	131
5.5 本章小结	135
参考文献	135
第6章 黄土地区边坡冻融模型试验研究	137
6.1 引言	137
6.2 模型试验设计方案	138
6.2.1 试验装置	138
6.2.2 土样配制与压实	138
6.2.3 边坡几何模型	139
6.2.4 监测方案	140
6.3 模型试验结果与分析	144
6.3.1 黄土地区边坡表观特征	144
6.3.2 温度场分析	144
6.3.3 水分场分析	148
6.3.4 位移场分析	150
6.4 黄土地区边坡水热耦合数值计算分析	153
6.4.1 数学模型	153
6.4.2 计算边界条件与参数	154
6.4.3 计算结果分析	156

6.5 本章小结	162
参考文献	163
第7章 黄土地区边坡冻融稳定性分析	164
7.1 引言	164
7.2 冻融剥落稳定性计算分析	164
7.2.1 计算模型	164
7.2.2 计算工况	166
7.2.3 计算力学参数	167
7.2.4 计算结果与分析	168
7.3 边坡冻融稳定性有限元分析	170
7.3.1 有限元强度折减法	170
7.3.2 黄土地区边坡冻融稳定性算例	171
7.3.3 计算结果分析	172
7.4 本章小结	176
参考文献	177
第8章 总结与展望	178
8.1 主要结论	178
8.2 展望	181

第 1 章 绪 论

1.1 选题背景及研究意义

冻土是指含冰且温度在 0℃或 0℃以下的各种岩石和土体,它作为一种特殊的岩土材料,其力学性能对温度的变化异常敏感。中国的冻土面积分布很广, 占国土面积的 70%以上, 是继俄罗斯、加拿大之后的世界第三大冻土国。冻土地区含有丰富的矿藏和森林资源, 因此研究冻土对人类的生产活动、生存环境和可持续发展具有重大的意义。

根据(岩)土体处于冻结状态的持续时间不同, 冻土可分为短时冻土(数小时、数日以至半月)、季节冻土(半月至数月)和多年冻土(数年至数万年以上)3 种类型。其中, 多年冻土是指冻结状态持续多年不融的冻土, 常存在于地下一定深度。多年冻土上部接近地表处, 往往受季节温度的影响, 冬冻夏融, 这部分称为季节冻融层(活动层)。世界范围内的多年冻土面积约 $3427\times10^4\text{km}^2$, 约占全球陆地面积的 23%, 主要分布在俄罗斯、美国的阿拉斯加、加拿大北部及中国的青藏高原等地, 此外尚有部分分布于南美洲和中亚的高山地区。中国的多年冻土面积约 $206.8\times10^4\text{km}^2$, 占中国陆地面积的 21.5%, 仅次于俄罗斯($1000\times10^4\text{km}^2$)和加拿大($390\times10^4\sim490\times10^4\text{km}^2$), 为美国多年冻土面积($140\times10^4\text{km}^2$)的 1.47 倍。中国多年冻土主要分布于中、低纬度, 号称世界第三极的青藏高原地区; 青藏高原多年冻土区面积约 $149\times10^4\text{km}^2$, 占中国多年冻土面积的 70%^[1]。另一种称作季节冻土, 只在地表几米范围内冬季冻结, 夏季消融, 该层也称作季节冻结层。季节冻土是一种含冰晶的特殊土水体系, 分布广阔, 遍及长江流域以北的广大疆域, 包括贺兰山—哀牢山以西的广大地区, 以及此线以东、秦岭—淮河以北地区, 总面积为 $513.7\times10^4\text{km}^2$, 占国土面积的 53%^[2]。中国各类冻土的分布面积统计见表 1-1。

表 1-1 中国各类冻土的分布面积统计

冻土类型	分布面积/($\times10^4\text{km}^2$)	占国土面积的百分数/%	冻土保存时间	冻融特征
多年冻土	206.8	21.5	≥ 2 年	季节融化
季节冻土	513.7	53.5	≥ 0.5 月	季节冻结, 不连续冻结
瞬时冻土	229.1	23.9	< 0.5 月	不连续冻结、夜间冻结

近年来, 由于青藏铁路的修建, 我国冻土的研究主要集中在青藏高原多年冻土区。在青藏铁路建设之前, 相关研究工作主要着眼于多年冻土分布、类型、变化趋势及工程影响^[3,4]。随着青藏铁路建设的需要, 冻土工程措施的研究逐渐成为阶段性研究重点^[5,6], 由于青藏高原多年冻土厚层地下冰和高地温的特点, 工程研究主要针对解决冻土融化的融沉问题。但是, 目前随着西部大开发战略的逐步推进, 以及东北振兴战略的实施, 在占我国国土面积 53% 的广大季节冻土区, 基础工程建设日益繁荣, 如穿越多年冻土和深季节冻土区的中俄输油管线及哈尔滨—大连的高速铁路(哈大客运专线)等重大工程。寒区工程实践证明, 在季节冻土区, 尤其是在深季节冻土区, 季节性冻融作用导致的工程冻害非常显著。例如, 严寒地区路基工程等结构物经受年复一年的周期性冻融循环作用, 冻害对公路路面寿命有着严重的影响^[7,8](图 1-1)。季节性冻融作用导致的病害除了会直接引起路面变形外, 还会对土体强度起到弱化作用^[9]。例如, 1994 年瑞典北部 40% 的公路因融化期路基弱化而面临无法通行的困难; 而整个北欧, 10%~60% 的公路都面临类似的问题。根据瑞典道路部的估计, 用于处理路基弱化的费用占维护费用的 25%。铁路冻害表现如下: 冬季在负温条件下, 土体中水分结晶, 引起土体体积增大, 使路基产生不均匀变形, 破坏轨道的平顺性; 春季融化期, 路基表层土融化, 而下部仍处于冻结状态, 未融化的土层便起到隔水层的作用使水分不能及时排出, 在上部动荷载反复作用和土体自身重力作用下就会形成道路翻浆, 所有这些病害, 对行车安全都是极为不利的^[10]。在我国, 不论是西北还是东北的季节冻土地区, 铁路的冻害都比较普遍。以青藏铁路西宁—格尔木段为例, 根据 2000 年的统计, 冻起高度大于 50mm 的严重冻害有百余处; 在东北地区, 沈阳铁路局原通辽分局管辖范围内的铁路在 1984~2000 年季节性冻土病害共有 803 处, 累计长度 77.6km, 每年影响时间达 2 个月之久。可以说, 冻胀及由此而产生的其他病害造成的线路养护维修工作量十分繁重, 并给安全行车带来了严重危害, 造成了巨大的经济损失。



(a) 土体强度失效塌陷



(b) 护坡石板隆起

图 1-1 季节冻土区公路路基路面冻融病害



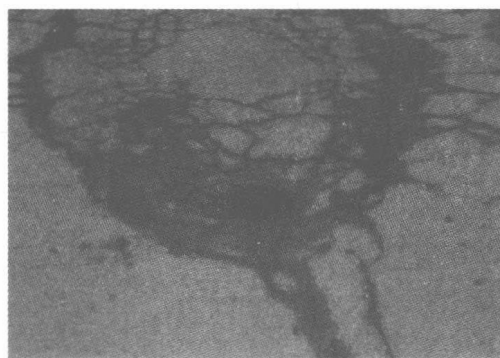
(c) 冻胀拔起通信电缆



(d) 春季雨后行车引起翻浆



(e) 道路翻浆 (一)



(f) 道路翻浆 (二)

图 1-1 (续)

我国黄土分布很广, 面积约有 $63 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国总面积的 6.6%, 是世界上黄土面积分布较广的国家之一。我国黄土集中分布于长城以南、汾渭盆地北缘以北、吕梁山西麓以西、陇西盆地西缘以东的黄河中游黄土高原地区, 这是中国黄土的主体堆积区。这里黄土厚度大、地层完整, 黄土分布面积占全国黄土总面积的 70% 以上^[11~14]。其中较大一部分地区属于季节性冻土区, 冬季气温下降土体冻结, 春融季节气温迅速回升季节性冻土融化。周期性冻融条件下浅层季节冻结黄土层物理力学性能变化很大, 因此每年春融季节黄土高原边坡、路基、岸坡出现溜方、滑塌、剥落等工程冻融病害频发^[15~18]。这也使得黄土地区除面临标志性的水敏性问题挑战外, 反复冻融循环作用也导致一系列季节冻土工程问题, 其中黄土地区边坡冻融灾害问题一直是困扰岩土工程师的难题 (图 1-2)。

黄土结构松散, 力学性能较差, 而且具有很强的水敏性。许多黄土边地区坡体处于临界平衡状态, 在一定的诱发作用下极易产生黄土滑坡。由于黄土地区处于季节性冻土区, 黄土地区边坡受季节冻融作用的影响显著, 其中每年 3~7 月发生的冻融灾害更是非常频繁 (图 1-3)。20 世纪 80 年代以来, 在季节性冻融作用强

烈的我国西北黄土高原地区，相继发生了洒勒山、古刘、龙西、黄茨等一系列重大滑坡灾害，造成了巨大的生命财产损失。其中，仅 2011 年入春以来，随着气温升高，陕西省榆林市横山县韩岔乡韩岔村及子洲县石沟村相继发生黄土滑坡（崩塌），造成直接经济损失 50 余万元；甘肃省东乡县撒尔塔文体广场及永靖县西河镇二房村大房台先后发生黄土滑坡，其中撒尔塔文体广场护坡大面积塌陷滑坡，滑坡体长 100m、宽 70m、高 52m，滑坡土方量达 $20.7 \times 10^4 \text{m}^3$ ，经济损失 2 亿多元，半个县城受到波及。此外，一项针对我国陕西省北部黄土地区地质灾害特征及主要影响因素的地质调查表明：1984~2004 年，陕西省北部黄土地区的地质灾害共有 1679 处，其中与边坡失稳有关的滑坡、崩塌和潜在不稳定斜坡占隐患总数量的 80% 以上，造成严重的地质灾害和经济损失^[19]（图 1-4），而冬春季冻融作用是诱发陕北黄土地区边坡滑坡与崩塌的一个重要因素。

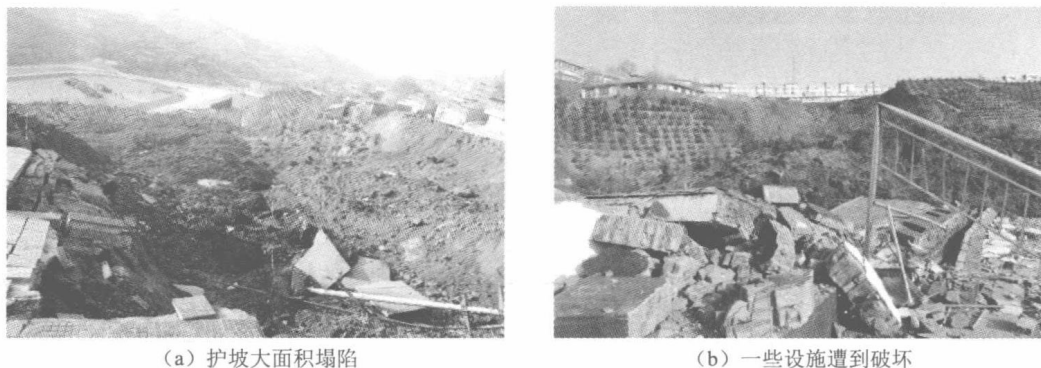


图 1-2 季节性冻融作用诱发的甘肃东乡县黄土滑坡

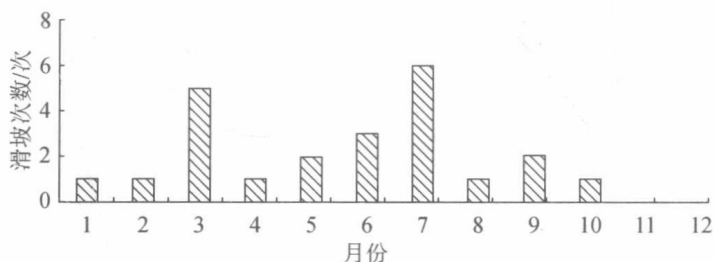


图 1-3 甘肃永靖县盐锅峡镇黑方台塬边黄土滑坡次数与月份关系

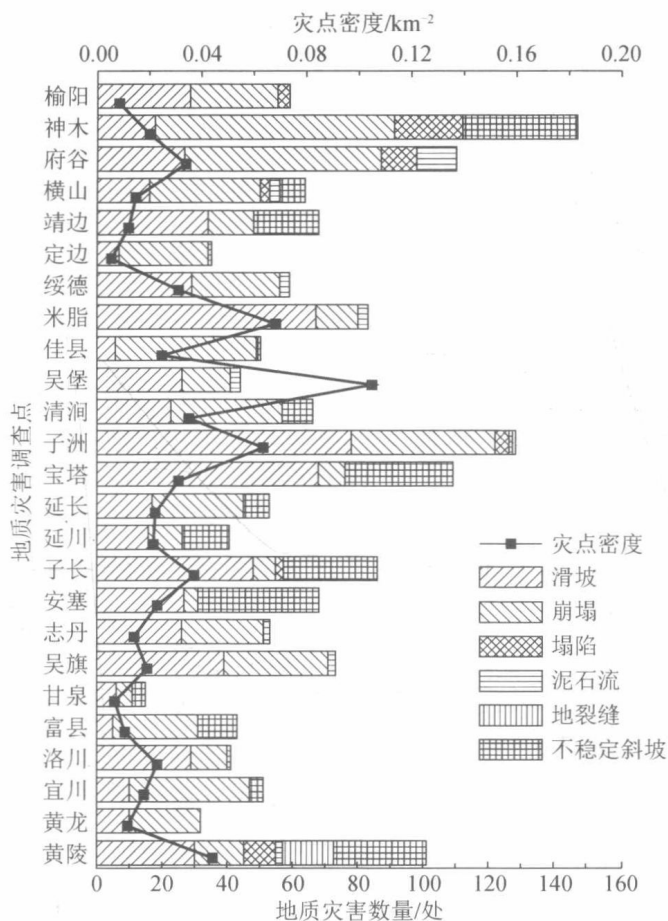


图 1-4 陕北黄土高原区地质灾害点分布情况

总结大量学者的研究成果,诱发黄土高原区滑坡的主要因素为降雨、人类活动、冻融作用,前人针对人类活动及降雨等诱发条件开展了大量工作,而冻融作用对黄土地区边坡稳定性的影响及其破坏机理研究较少,研究程度也显薄弱。目前主要通过灾害调查^[20~22]对黄土地区边坡冻融灾害发生的原因进行初步的揭示,文献资料很少,其中机理性研究尚缺乏文献资料。由于机理性研究的不足,目前对黄土地区边坡冻融灾害尚不能进行量化分析和预测,灾前难以采取有效措施。因此,考虑到冻融期黄土滑坡危害巨大,对黄土地区边坡冻融灾害发生机理问题进行深入研究是必要的。此项研究内容成果可实现根据不利的冻融条件对黄土地区边坡的稳定性进行科学评价,并有利于规范寒区黄土地区边坡的设计,对预测边坡冻融灾害、保证广大居民生命财产安全以及加快黄土地区城镇化进程等具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

冻土学作为一门独立的学科早在 19 世纪初期就已经形成;然而,世界上第一部冻土力学专著——《冻土力学基础》在 20 世纪 30 年代才于苏联问世。第二次世界大战期间,北美人为追求多年冻土区的金矿及迫于亚北极地区军事工程建设的需要,对冻土进行了研究,且美军军事部门成立了专门的研究机构。1963 年,在美国召开的第一届国际冻土大会标志着冻土学的研究进入快速发展阶段,并在 1973 年的第二届国际冻土大会上确立每 5 年召开一次大会,以便各国学者交流关于冻土的研究成果。1949 年后,为满足东北及青藏高原冻土区矿藏调查、林业开发、铁路和公路建设,以及工业与民用建筑等各项生产建设的需要,中国才开展了冻土调查及资料收集工作,并在西部地区设立冻土研究机构。1949 年后的 20 多年内,中国冻土学的研究有了较大进步,并于 1978 年参加了在加拿大埃德蒙顿市举行的第三届国际冻土大会,与其他 13 个国家的冻土学者在区域冻土、冻土现象、冻土热学方面进行学术交流。20 世纪 80~90 年代,中国冻土研究工作人员持续在中国冻土分布填图、冻土工程、冻土勘察、冻土溶质迁移及成冰冻胀机理等冻土相关领域内进行深入研究,取得了骄人成绩,并在国内举行相关冻土研究大会,且积极参与国际冻土研究会议。目前中国是国际冻土研究领域内不可或缺的一员。

1.2.1 土体冻融损伤理论

冻土的物理力学性能较未冻土优异,如冻结法施工正是利用冻土高强度及低透水性的优点,此优异性得益于土体低温冻结时固态冰较强的胶结力。冻融土较冻土及普通土(未遭受低温冻结过程的土体)有较大区别,依赖于复杂多变的外界环境。当外界处于低温($<0^{\circ}\text{C}$)状态时,土体发生冻结,出现冻胀现象,且固态冰将土颗粒牢牢地胶结在一起,其物理力学性能也得到加强;当环境温度升高时,冻土体融化,固态冰胶结作用也立即消失,土体在自重及外荷载共同作用下出现融沉现象。反复冻融循环作用改变了土体的性状,使土体从不稳定状态向新的动态稳定平衡状态发展^[23]。大量的工程实例和室内试验数据均表明,土体经受反复冻融循环作用后,其物理力学性能较冻土及普通土有较大的不同^[24~30]。

对于反复冻融循环条件下的土体,其内部结构发生变化而引起材料强度发生损伤,这些因素可分为内部因素和外部因素。内部因素主要是土的热学和物理力学指标等,外部因素主要包括冻结融化温度、冻融次数等。

材料损伤是指在各种加载条件下,材料内凝聚力的进展性减弱,并导致体积

单元破坏的现象,可用损伤变量来描述材料的弱化^[31]。力学、热、环境等因素均可引起材料微结构的扰动,原状材料由于扰动而发生微结构的调整,最后达到完全被调整状态^[32,33],损伤因子 D 可表示为

$$D = D(\zeta, \rho_0, p_0, R, \theta, t) \quad (1-1)$$

式中, ζ 、 ρ_0 、 p_0 、 R 、 θ 、 t 分别代表应力-应变历史参数、初始密度、初始压力、颗粒间接触面性质、温度及时间。

国内外学者开展了大量关于土体冻融损伤的研究工作。Graham 和 Au^[34]对原状黄土进行的冻融-固结试验结果表明,冻融作用会破坏原状黄土原有的力学状态。Alkire 和 Mrrsion^[35]、Duquennoi 等^[36]对经历冻融作用的重塑粉质黏土进行了固结排水 (consolidated drained, CD) 三轴试验,试验结果表明:冻融作用可提高低密度粉质黏土的抗剪强度指标。Chuvilin 和 Yazynin^[37]通过试验研究解释了冻融作用导致土体强度指标降低的机理。Othman 和 Benson^[38]对粉质黏土进行了水分影响的冻融试验,发现水分条件对冻融后土体强度损伤有直接影响。Broms 和 Yao^[39]的研究结果表明,不同类型的岩土体其冻融后强度衰减规律不同。Simonsen 和 Janoo^[40]对不同道路边坡的土体材料进行了冻融强度试验,试验结果表明:不同类型的土经历多次冻融循环后强度均明显降低,根据土类型不同其降低幅度为 15%~70%。van Bochove 等^[41]认为冻融循环改变了粉质黏土的物理和生物结构。Hohmann-Porebska^[42]认为岩土体地质参数中黏聚力受冻融影响较大。Chamberlain^[43]对 4 种不同类型黏土在 1.7~140kPa 围压作用下分别进行了 3 次冻融循环试验后,用特殊相机进行了微观结构观察和分析,结果表明,在有压和封闭单向冻融条件下,已经固结的试样由于冻融循环会加强固结,孔隙比减小,但竖向渗透性增大;对于细粒土,竖向渗透性增大是由于冻融循环过程中试样内部有竖向多边形裂缝产生;而对于粗粒土,则主要是由于其中的细颗粒絮凝成团,其在粗颗粒间隙中的体积减小;并且,其进一步指出,竖向裂缝的产生主要是由于冻结过程中形成了负孔隙水压力及水分迁移的影响。Viklander^[44]利用 X 射线技术对冻融后土体的微观结构进行了分析,结果表明:冻融 1、2、4 和 10 次后,土中的岩石矿物颗粒上下运动,进而使土的渗透性增大。

徐学燕和丁靖康^[45]、于琳琳和徐学燕^[46]与 Yu 等^[47]对冻融交界面处土体在反复冻融条件下的抗剪强度指标变化规律进行了试验研究,发现经历反复冻融作用的土样其抗剪强度发生明显的衰减变化,并给定了冻融交界面土体计算参数。齐吉林等^[48,49]对西北和华北等地的粉质黏土进行了冻融条件下的三轴试验和直接剪切试验,试验数据表明,不同类型土体经历冻融作用后,围压水平对其强度损伤程度的影响规律不同,但均表现出黏聚力降低、内摩擦角增大的规律性试验结果。马巍等^[50]通过反复冻融循环试验,发现随着冻融次数增加,复合土体材料的抗剪

强度指标损伤程度逐渐加大。于基宁^[51]采用自行研制的低温三轴试验机对扰动青藏粉质黏土进行了冻融试验、直剪试验和三轴试验,得到了冻融条件下不同试验参数对扰动土样抗剪强度指标的影响规律。罗小刚等^[52]、陈湘生等^[53]的研究结果表明,在一定外界应力作用下冻融土的强度损伤幅度可减小。和礼红等^[54]通过对扰动粉质黏土进行冻融-剪切试验,发现冻融条件下粉质黏土黏聚力损伤幅度大,而内摩擦角损伤幅度小。汪仁和等^[24]对原状粉土进行了冻融-剪切试验,研究结果表明,经历冻融作用后土体物理力学性能变化显著,孔隙度、压缩系数及渗透系数均变大,冻融土样的抗剪强度明显降低。杨平和张婷^[55]对比研究了未冻融土与冻融土物理力学指标的差异,发现冻融作用使土体力学性能发生大幅度损伤,其无侧限抗压强度仅为未冻融土无侧限抗压强度的 30%~50%。董思萌^[56]对成都地区的粉质黏土进行冻融-直剪-三轴试验研究,得到了 5 次冻融循环后试验土样抗剪强度指标的变化规律,并进一步借助 SEM 技术对冻融试样的微观结构变化规律进行了分析。杨更社和薄毅彬^[57]对经历冻融作用的岩石进行了计算机断层扫描试验,试验研究了不同冻融条件下岩石材料的损伤特性,并最终建立了岩石的冻融损伤模型。王永忠等^[58]对南方地区的原状粉质黏土进行了冻融试验研究,结果表明,冻融次数对粉质黏土物理力学指标影响剧烈,并进一步通过 SEM 试验分析得到冻融后土体的孔隙率明显变大且土颗粒重新排列。董晓宏^[59]以陕西杨凌地区的黄土为研究对象,进行了不同含水率及干密度的重塑黄土在封闭系统冻融条件下的直剪试验,结果表明,反复冻融循环使黄土表面结构破坏比较严重;3~5 次冻融循环对黄土强度有较大影响,导致黄土抗剪强度发生明显劣化。马文生和张俊烽^[60]以刘庄矿井工程中冻融土为研究对象,借助 SEM 技术分析该冻土化学成分的变化,试验发现了原状黄土和冻融土力学性能的差异与化学成分和微结构之间的关系。肖中华^[61]研究了上海地区地铁工程段淤泥质土经历冻融作用后物理力学指标的变化规律。王铁行等^[62]对非饱和原状黄土冻融强度进行了试验研究,结果表明,冻融作用对含水率过低的黄土的黏聚力和内摩擦角基本没有影响;但当含水率较高时,冻融循环后黄土的黏聚力较冻融前降低,且冻结温度越低及冻融次数越多,降低幅值越大,而内摩擦角均较冻融前有所增加。齐吉琳和马巍^[26]对冻融后的天津粉质黏土和兰州黄土分别进行 SEM 和土力学试验,发现两种土的强度参数经过冻融作用后均发生了明显变化;并进一步结合 SEM 图像的定量分析和冻融过程中的变形时程,给出了超固结土强度变化的机理解释。宋春霞等^[63]研究了兰州黄土经历一个冻融循环后土体强度参数的变化规律,试验结果表明,相同冻结温度梯度下土的黏聚力随着土样干密度的增大先增大后减小;而土的内摩擦角在干密度较小时,冻融后其值变化不大,但在干密度较大时内摩擦角 φ 略微增大。姚晓亮等^[64]研究了青藏重塑饱和黏土试样在封闭系统下经历一个冻融循环后