

不良地质与特殊岩土系列丛书

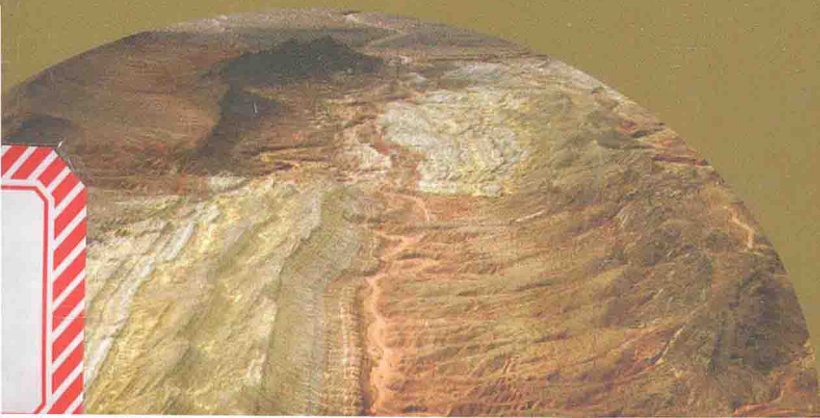
BULIANG DIZHI YU TESHU YANTU XILIE CONGSHU

基于应变软化理论的 顺层边坡失稳机理及 局部破坏范围研究

JIYU YINGBIAN RUANHUA

LILUN DE SHUNCENG BIANPO SHIWEN JILI JI JUBU POHUAI FANWEI YANJIU

郑立宁 胡启军 谢强 ● 著



西南交通大学出版社

国家自然科学基金“边坡泥化夹层细观渐进损伤破坏动态演化规律研究”(51574201)
西南石油大学特殊结构安全与防灾减灾青年科技创新团队(2015CXTD05)

不良地质与特殊岩土系列丛书

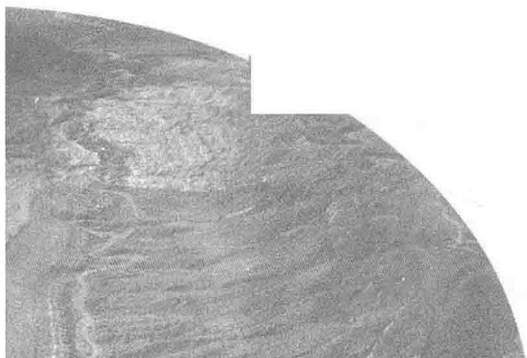
BULIANG DIZHI YU TESHU YANTU XILIE CONGSHU



基于应变软化理论的 顺层边坡失稳机理及 局部破坏范围研究

郑立宇 胡启军 谢强○著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·



图书在版编目 (C I P) 数据

基于应变软化理论的顺层边坡失稳机理及局部破坏范围研究 / 郑立宁, 胡启军, 谢强著. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.1

(不良地质与特殊岩土系列丛书)

ISBN 978-7-5643-5182-3

I. ①基… II. ①郑… ②胡… ③谢… III. ①边坡稳定性—研究 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 000993 号

不良地质与特殊岩土系列丛书

基于应变软化理论的顺层边坡失稳机理及局部破坏范围研究

郑立宁 胡启军 谢强 著

责任编辑 柳堰龙

封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印张 10

字数 202 千

版次 2017 年 1 月第 1 版

印次 2017 年 1 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5182-3

定价 42.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序 言



山区的铁路、公路、水利、矿山和城镇的建设，都涉及大量的边坡工程。倘若边坡岩土体地质条件不良，在各种外营力的作用下，便有发生塌方、滑坡等地质灾害的危险，给工程建设、人民生命财产造成危害。顺层边坡属于工程建设中经常遇到又难以治理的一类边坡，其“顺层”特性，使其难以保持稳定。

近年来，随着我国基础设施建设步伐的加快，所遇到的顺层边坡问题也日渐增多。为保障工程的顺利建设和安全运营，稳定有效的防护措施必不可少。然而，地上的防护措施依赖于对地下情况的认知，即对顺层边坡本身工程特性的了解。顺层边坡的整治难题催生了诸多相关领域的试验和研究。出于工程建设目的，对于顺层边坡的研究可大致从两个方面入手，一是研究其形成和破坏机理，二是研究其防护和治理措施。其中，前者是后者的基础和支撑，后者是前者的方向和目标；前者多侧重于理论分析，后者更强调工程应用。本书所做的研究大致更侧重于前者，同时兼顾后者。

顺层边坡的失稳，其影响因素较多，与地层岩性、岩体结构、地质构造、地形地貌及人类工程活动等密切相关。本书作者通过大量的试验研究，同时结合数值计算、理论分析、现场检测及现场调研等手段，从顺层边坡的泥化夹层应变软化效应入手，对顺层边坡开展理论性和实践性的综合研究。作者所做的研究富有理论深度和实践价值，其研究工作对于了解顺层边坡失稳机理具有一定的推动

作用，对于顺层边坡治理和防护具有一定的参考价值。相信本书的出版将有助于促进顺层边坡的研究及岩土工程行业的发展。



田志兵

中国建设股份有限公司 总工程师

2017年1月

前 言



进入 21 世纪以来，全国的交通基础设施建设进入新的高潮，截至 2015 年年底，全国铁路营业里程达到 12.1 万千米，其中高铁营业里程超过 1.9 万千米，全国高速公路总里程已经达到 11.7 万千米。大量的交通基础设施工程建设必然导致数量繁多的顺层路堑边坡开挖出现，其中含泥化夹层缓倾角（岩层倾角 $< 35^\circ$ ）顺层路堑边坡支挡防护难度较大，往往具有局部破坏现象，存在渐进性失稳机理，但该理论一直缺少深入的分析与研究。

渐进性破坏理论一般源于岩土材料的应变软化效应。为了深入分析顺层边坡渐进性失稳机理，确定其局部破坏范围，我们综合采用资料统计、室内试验、数值计算、理论分析、现场监测及现场调研等多种手段，从层间泥化夹层的应变软化效应研究入手，结合应变软化接触单元本构模型的数值实现，建立含层间应变软化效应的顺层边坡接触元模型，对该系列问题进行深入研究。本书共 6 章：第 1 章为绪论，重点提出问题，并对比国内外研究现状，总结形成研究思路；第 2 章为泥化夹层剪切强度变化特征试验研究，重点研究不同类型泥化夹层应变软化特征、泥化夹层水敏感性及时问效应；第 3 章为含应变软化特征的数值接触单元模型研究，重点研究 FLAC 接触单元应变软特征的实现；第 4 章为基于应变软化理论的顺层边坡力学行为分析，重点研究含应变软化接触单元的顺层边坡计算模型的渐进性破坏特征；第 5 章为顺层边坡首段局部破坏范围研究，重

点研究层厚、岩层倾角等因子对首段局部破坏范围的影响，并形成计算公式；第6章为工程实例，重点研究了长期现场监测的宜万铁路巴东车站顺层边坡工程，且结合重庆湘渝高速顺层滑坡、四川简阳雷打石顺层滑坡进行工程验证。本书部分研究成果可应用于工程实践，同时也为今后进一步深入研究顺层边坡稳定性奠定了一定的理论基础。

在本书的撰写期间，感谢西南交通大学程谦恭教授、文江泉副教授、赵文副教授、郭永春副教授在研究过程中的具体指导，感谢杨丹老师在室内试验过程中大力支持及赵阳、徐飞飞、宋磊等的辛勤劳动，感谢铁道第三勘察设计院集团有限公司周海、中铁西北科学研究院有限公司吴坤在现场案例分析过程中的鼎力帮助。

在本书的出版过程中，得到了中建地下空间有限公司薛国州总经理、田强常务副总经理的支持与鼓励，在此一并感谢。

感谢中国建筑股份有限公司毛志兵总工程师为本书作序。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请专家及同行批评指正。

作者

2017年1月

目 录



第 1 章 绪 论	1 -
1.1 问题的提出	1 -
1.2 国内外研究现状	3 -
1.2.1 泥化夹层剪切强度变化特征研究现状	3 -
1.2.2 基于应变软化理论的边坡力学行为特征研究现状	5 -
1.2.3 顺层边坡失稳机理研究现状	7 -
1.2.4 顺层边坡局部破坏范围研究现状	9 -
1.3 存在的主要问题及拟解决的方法	10 -
1.4 主要研究内容及技术路线	11 -
1.4.1 主要研究内容	11 -
1.4.2 研究技术路线	12 -
第 2 章 泥化夹层剪切强度变化特征试验研究	15 -
2.1 泥化夹层应变软化特征试验研究	15 -
2.1.1 顺层滑坡中的典型层间泥化夹层类型分析	15 -
2.1.2 采样区工程地质特征	17 -
2.1.3 试样的制取与保存	19 -
2.1.4 试样的物质成分分析	20 -
2.1.5 应变软化试验过程及结果	20 -
2.1.6 泥化夹层应变软化试验方法及步骤总结	24 -
2.2 不同类型泥化夹层应变软化特征综合分析	25 -
2.2.1 泥化夹层峰残剪切强度值分布特征总述	25 -



2.2.2	不同类型泥化夹层峰残剪切强度值对比分析	27
2.2.3	泥化夹层应变软化过程中的塑性剪切位移分析	30
2.3	水对泥化夹层应变软化特征的影响分析	31
2.3.1	水对泥化夹层峰值剪切强度的影响	31
2.3.2	水对泥化夹层应变软化过程的影响	33
2.4	泥化夹层剪切强度随时间变化的软化及硬化特征研究	35
2.4.1	试验方法	35
2.4.2	试验结果分析	36
2.5	本章小结	38
第3章	含应变软化特征的数值接触单元模型研究	40
3.1	FLAC 接触单元及应变软化本构特征	40
3.1.1	FLAC 接触单元特征	40
3.1.2	FLAC 应变软化-硬化本构模型特征	41
3.2	FLAC 接触单元应变软特征的实现	41
3.2.1	链表式数据类型的特点	42
3.2.2	FLAC 接触单元数据的访问与修正	42
3.2.3	FLAC 接触单元数据类型的特点	43
3.2.4	FLAC 中含应变软化特征接触单元的完善	44
3.3	含应变软化接触单元的直剪试验数值验证	46
3.3.1	模型的建立	47
3.3.2	剪切应力-位移关系曲线模拟结果	48
3.3.3	渐进性破坏过程及内部应力变化特征	48
3.4	接触单元强度参数演化与剪切应力-位移关系曲线研究	51
3.5	本章小结	54
第4章	基于应变软化理论的顺层边坡力学行为分析	56
4.1	顺层边坡复合接触元模型的设计	56
4.1.1	模型的几何特征	56
4.1.2	接触单元的设置	56
4.1.3	模型的本构关系及材料参数	58
4.2	应变软化接触单元对层间应力特征的响应	58

4.2.1 应变软化效应前层间接触单元的受力特征	58 -
4.2.2 产生应变软化效应的力学准则	60 -
4.2.3 应变软化效应对层间应力特征的响应	61 -
4.3 应变软化效应的链式传递	63 -
4.3.1 渐进性破坏现象的产生	64 -
4.3.2 渐进性破坏过程中层面应力变化特征	67 -
4.3.3 渐进性破坏的机理	69 -
4.4 顺层边坡破坏特征分类	71 -
4.5 本章小结	71 -
第 5 章 顺层边坡首段局部破坏范围研究	73 -
5.1 首段局部破坏范围的定义	73 -
5.2 首段局部破坏范围的影响因子敏感度分析	74 -
5.2.1 单因子敏感度分析	74 -
5.2.2 多因子敏感度分析	76 -
5.3 首段局部破坏范围理论计算公式分析	78 -
5.3.1 局部破坏范围与层厚的关系	79 -
5.3.2 局部破坏范围与岩层倾角的关系	79 -
5.3.3 局部破坏范围与泥化夹层峰值摩擦角的关系	80 -
5.3.4 局部破坏范围与泥化夹层残余摩擦角的关系	80 -
5.3.5 局部破坏范围与泥化夹层峰值黏聚力的关系	81 -
5.3.6 局部破坏范围与泥化夹层残余黏聚力的关系	81 -
5.3.7 局部破坏范围与泥化夹层塑性剪切位移的关系	82 -
5.3.8 局部破坏范围与坡长的关系	82 -
5.3.9 首段局部破坏范围理论计算公式的拟合	86 -
5.4 理论计算公式的简化分析	87 -
5.4.1 泥化夹层的极限应变软化特征	87 -
5.4.2 首段局部破坏范围理论计算公式的简化分析	87 -
5.5 基于现场样本边坡特征的理论计算公式修正分析	88 -
5.6 含泥化夹层顺层边坡局部破坏范围的计算方法及步骤	91 -
5.6.1 确定顺层边坡岩体结构特征	91 -
5.6.2 分析顺层边坡中泥化夹层特征	91 -



5.6.3 边坡破坏模式判断	-92 -
5.6.4 局部破坏范围计算	-92 -
5.7 本章小结	-92 -
第6章 工程实例	-94 -
6.1 宜万线巴东车站顺层边坡开挖现场监测及数值计算验证	-94 -
6.1.1 宜万线巴东车站工程地质条件	-94 -
6.1.2 宜万线巴东车站顺层边坡支挡设计方案	-97 -
6.1.3 现场监测方案及监测过程	-101 -
6.1.4 分项监测成果分析	-106 -
6.1.5 监测成果综合分析	-115 -
6.1.6 数值计算验证	-119 -
6.1.7 无支护作用下的开挖局部破坏范围分析	-126 -
6.1.8 小 结	-127 -
6.2 重庆湘渝高速顺层滑坡破坏特征	-127 -
6.2.1 工程概况	-127 -
6.2.2 滑坡工程地质条件	-127 -
6.2.3 滑坡基本特征	-129 -
6.2.4 滑坡形成的原因	-130 -
6.2.5 滑坡滑移范围的理论计算验证分析	-131 -
6.3 四川简阳雷打石顺层滑坡破坏特征研究	-131 -
6.3.1 工程概况	-131 -
6.3.2 滑坡工程地质条件	-132 -
6.3.3 滑坡基本特征	-134 -
6.3.4 滑坡形成的原因	-135 -
6.3.5 滑坡滑移范围的理论计算验证分析	-136 -
6.4 本章小结	-137 -
结 论	-138 -
参考文献	- 141 -

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

近年来,国内基础设施建设得到迅猛发展,大量的交通道路工程向山区修筑,由于道路建设标准的提高,不可避免地出现了大量的顺层路堑边坡^[1, 2]。正在修建的南(宁)—广(州)高速铁路桂平至肇庆东段,线路正线总长 284.92 km,路堑总长 76.30 km,其中顺层 47 处,总长 8.72 km,占路堑总长 11.42%。已建成的宜(昌)—万(州)铁路,线路总长 378 km,出现顺层路堑 60 余处,总长约 15 km^[3]。另外已建成的渝怀铁路,线路全长 600 km,出现顺层路堑 249 个,总长约 43.64 km,占路基总长近 15%^[4]。顺层边坡(见图 1-1)开挖处理不当往往容易形成顺层滑坡,给道路施工带来巨大困难。如 20 世纪发生的贵昆铁路大海哨车站滑坡^[5]、成昆铁路铁西滑坡^[6]、宝天铁路柿树林车站滑坡^[7]、万盛至南川铁路猪槽湾滑坡^[8]、湘黔复线沅滩滑坡^[9]及水柏铁路银山滑坡^[10]等都是典型的顺层路堑开挖所至的顺层滑坡。在已建成的重庆万梁高速公路,其 J、K 合同段 K41—K50 近 10 km 范围内,由于顺层边坡开挖引发了二十几处顺层滑坡^[11]。正在建设的南广线桂平至肇庆东段 NGZQ-5、NGZQ-6 标段,自 2009 年开工以来,产生顺层路堑垮塌及滑坡 17 处,总长



(a)



(b)

图 1-1 顺层边坡图片

近 1.63 km, 造成大量的经济损失, 严重影响施工进度。

顺层路堑滑坡灾害如此频繁发生, 其诱因主要存在三个方面。其一为思想认识不足, 由于顺层路堑边坡往往坡高相对不高、岩层倾角较缓, 现场勘察中往往忽视了其潜在危害, 未对其层间低剪切强度的软弱夹层进行足够重视, 边坡设计往往按照普通岩石边坡进行。其二为施工操作越规, 顺层路堑边坡的预加固以坡脚支挡为主, 现场施工中受多方面因素影响, 不合理的跳槽开挖及拉槽开挖施工加剧了顺层滑坡的发生。其三为防治设计理论不足, 方法有限, 设计方案不合理。部分顺层路堑边坡虽然深入勘察, 规范设计, 按步施工, 但滑坡现象依然发生。

在顺层路堑边坡的预加固设计中, 需对潜在滑面的剪切强度参数取值进行重点研究。由于顺层路堑滑坡主要发育在易滑地层中, 且潜在滑面是产生层间错动的软弱夹层(多为泥化夹层)^[12]。路堑开挖必然导致岩体松动, 加剧层间软弱夹层的错动变形, 促使夹层剪切强度产生应变软化效应。由于剪切强度应变软化具有全过程动态变化特征, 数学概述与试验取值具有一定的复杂性, 准确合理的应变软化剪切强度确定较为困难。传统的做法往往是忽略应变软化效应, 无视剪切强度由峰值过渡至残余值的全过程动态变化特征, 经验性固定参数取值为主, 但是否合理准确往往难以定论。

缓倾角(岩层倾角 $< 35^\circ$)顺层路堑边坡一般坡长较长($> 100\text{ m}$), 在预加固设计中主要采为传递系数法计算滑坡推力^[13]。推力计算中滑体纵向取值范围若直至坡顶, 则计算推力可能大到无法想象, 至无法进行预加固设计。部分学者研究认为^[3], 顺层路堑边坡广泛存在渐进性失稳特征及首段局部破坏模式, 且渐进性失稳与层间夹层的应变软化特征有关。如基于该理论, 则顺层路堑边坡的预加固范围可缩小至首段局部破坏区。但由于岩石边坡存在复杂的岩体结构特征, 考虑层面应变软化效应的顺层边坡稳定性计算目前尚未深入, 缓倾角(岩层倾角 $< 35^\circ$)顺层路堑边坡的渐进性失稳机理有待深入研究, 使用的首段局部破坏范围计算方法有待系统完善。

针对以上问题, 本书以含泥化夹层的缓倾角顺层路堑边坡为研究对象, 重点研究顺层路堑边坡层间泥化夹层剪切强度参数应变软化特征取值、结合应变软化理论的顺层边坡稳定性计算方法、顺层边坡渐进性失稳机理、预加固滑体计算范围等顺层滑坡防治关键技术, 为该类工程问题合理优化设计提供扎实的理论依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 泥化夹层剪切强度变化特征研究现状

关于泥化夹层剪切强度的变化特征,目前学者主要从泥化夹层的应变软化特征、水致弱化特征及流变特征3个方面进行研究。本书重点关注在剪切应变全过程中的应变软化特征、水对应变软化特征的影响及剪切强度变化的时间效应。

1. 泥化夹层的应变软化特征

关于岩土材料的应变软化特征的概念,由 Terzaghi K. (1948)^[14]最早提出,其研究表明,裂隙黏土在应变较小的状态下,土具有较强的抗剪能力。Skempton (1964)^[15]在超固结土室内直接剪切试验中发现,当受剪切超过一定应变后,超固结土抗剪强度会下降。Bishop (1967)提出用于描述应变软化特征的脆性指数(I_b),该参数用来描述岩土材料具有应变软化特征的大小。Wood 等 (1994)^[16]人利用峰值应力比和当前状态参数的关系来说明细粒土的应变软化现象。沈珠江 (2000)对应变软化机理进行了总结,把应变软化现象归结为减压软化、剪胀软化和损伤软化3类^[17]。层间泥化夹层的应变软化特征同样明显,国内最早 (1979)进行研究的是铁道部科学研究院西北研究所、第三机械工业部勘测公司及冶金部成都勘察公司三家单位^[18],他们系统地总结20世纪60—70年代国外关于滑带土应变软化特征的描述方法及试验取值过程,并自研了部分试验仪器,其中李妥德、张颖均等 (1979)总结了有关滑带土残余强度的取值影响特征、强度恢复等几个重要问题^[19]。王恭先 (1984)在贵昆铁路大海哨车站顺层滑坡,对泥化夹层滑带进行现场大规模剪切试验^[5]。李守定等 (2007)以三峡库区某顺层滑坡为例,对顺层层间泥化剪切带发育演化进行了深入分析^[20]。

由于刚体极限平衡分析法难以考虑岩土材料的破坏全过程,以至对应变软化全过程的深入探究也一时难以推广应用,学者大量的研究集中在应变软化发生后残余强度参数的合理取值,包括岩土对象的矿物成分、初始结构、颗粒含量、孔隙水化学成分、应力历史、应力水平、实验剪切速度等因素对残余强度的影响,并建立了大量残余强度与土各种物理参数间的经验关系式。

其中研究最为深入的是物质成分对残余强度的影响, Kenney 对黏土的化学成分对残余强度的影响进行了研究^[21]。Moore 等研究认为, 土的残余强度受孔隙水中盐分浓度的影响较大^[22]。Lupini 研究发现, 土中黏土含量的增加对黏性土的残余剪切行为和机制产生影响^[23]。由于黏土的塑性指数对残余强度具有影响, Skempton、Voight 等人, 建立了残余摩擦角与黏土含量、级配、液限及塑性指数之间的经验关系^[24]。Kenney (1967) 提出了塑性指数 I_p 与残余摩擦角之间的关系^[25]。Kanji (1974) 提出了液限 W_L 与残余摩擦角之间的关系^[26]。李青云、王幼麟 (1989) 研究了泥化夹层错动带残余强度的主要因素即比表面 B 和胶结构含量 C , 并建立了经验公式^[27]。冯夏庭、王泳嘉 (1995) 经过研究后, 认为: 泥化夹层的残余强度与其黏粒含量 P 、液限 W_L 、塑性指数 I_p 、比表面积和碳酸盐含量之间的关系不用确定性的函数方程来表达^[28]。王战权、唐春安 (1999) 黏土类泥化夹层以非胶结型结构连接为主^[29]。陆有忠、高永涛 (2008) 利用支持向量机, 综合四参数 (泥化夹层黏粒含量、液性界限、塑性指数、比表面积 (A_s)) 预测了泥化夹层的残余摩擦系数^[30]。

另外, 部分学者还针对有效法向应力及剪切速率对残余强度取值影响部分进行了一定研究。Skempton 建议两者之间全部采用线性关系, 并给出了相关公式^[31]。Skempton 研究认为, 当剪切速度较大 ($> 100 \text{ mm/min}$) 时, 速度对残余强度的影响较大^[32, 33]。Tika 所做的环剪试验研究表明, 快慢剪的残余强度对比分析中快速剪切的速度效应分为正速度效应、中速度效应及负速度效应 3 种^[34]。

2. 水对泥化夹层应变软化特征的影响

关于含水量变化对泥化夹层应变软化特征的影响, 国内外研究均有限, 北京交通大学张忠平^[35]曾以万梁高速公路 K43 顺层滑坡中滑动带为研究对象, 得出了不同含水量下的快剪残余强度值。更多的研究集中在水至致使土材料弱化的机理方面。钱家欢、殷宗泽 (1996) 提出以水膜联结和颗粒胶结作用最大^[36]。李广信 (2004) 认为, 土中含水量的土质矿物在溶解和重析出过程中生成^[37]。杨庆、栾茂田 (2003) 提出土的内摩擦角主要与土的颗粒结构、大小及密实度等密切相关^[38]。河海大学胡昕博士 (2010) 重点对高液限土和煤系土进行了深入分析, 从结构及粒组成分分析变化的原因^[39]。

3. 泥化夹层的剪切强度时间效应变化特征

岩土流变力学一般认为, 岩石的强度随时间的变化会产生衰减, 直至长期强度, 但该结论一直值得商榷^[40]。针对泥化夹层强度随时间的变化特征, 便具有两种观点。最早黎克日、康文法(1983)基于陈宗基提出泥化夹层长期强度的确定方法^[41]。肖树芳(1987)采用单一试样分级加载的方法试验, 将泥化夹层分为两种蠕变类型, 提出泥化夹层内部会产生微结构硬化和软化不断交替发展的现象^[42]。杨天鸿等(2008)建立了老化模型的长期强度取值公式^[43]。朱珍德等(2009)得出长期强度低于短期强度, 且黏聚力衰减幅度较摩擦角大^[44]。程强、周德培(2009)建议夹层的长期剪切强度取短期剪切强度的75%^[45]。

然而, 大量的工程实例表明, 产生层间错动的泥化夹层往往具有一定的强度恢复特征, 铁科院西北院李妥德、张颖均(1979)最早注意到了该点^[19], 后来任光明、聂德新等(1995)对此做了一定的研究, 但其研究仅采取压缩固结法, 未考虑切向剪力对强度特征的影响^[46]。

综上所述, 泥化夹层剪切强度变化特征中, 关于泥化夹层应变软化特征的研究一般与滑带土的研究结合在一起, 研究的出发点为软化现象的表述与内部机理的解释。由于工程应用中对稳定性的关注, 且刚体极限平衡计算中无法考虑内部软化过程, 泥化夹层应变软化的研究主要集中在残余剪切强度的影响因子分析及取值的经验方法。关于水对泥化夹层应变软化特征的影响研究较少, 缺少研究进展。关于泥化夹层剪切强度的时间效应, 存在强度劣化与强度增长两种观点。

1.2.2 基于应变软化理论的边坡力学行为特征研究现状

20世纪80年代日本的川本基于室内岩石三轴试验, 将应变软化曲线简化为三线型^[47], 由此奠定了应变软化特征基本理论的应用模型。伴随着应变软化理论的进步, 理论的应用开始在解决岩土工程问题中大显身手, 应用始于对复杂岩土体渐进性破坏的深入分析。研究认为, 岩土体渐进性破坏现象是岩土材料应变软化特征的表现, Lo等(1973)最先总结了渐进破坏的条件^[48]。A. W. Skempton(1993)通过对英格兰Carsington土坝溃坝现场进行的详细勘察, 并结合现场监测数据, 通过室内不同土体的剪切试验分析, 认为坝体的最终破坏原因为坝体内部含应变软化特征的黄黏



土的强度衰减^[49]。Potts (1990) 对英格兰 Carsington 土坝黄黏土进行深入分析, 利用含应变软化特征的有限元程序, 进行数值模拟, 并与现场检测情况进行了详细对比分析。

但由于应变软化理论的不完善性, 在计算应用过程中需要不断地对模型本构进行创新, 大量学者的工作主要集中在新算法的实现及现场工点的验证。殷有泉 (1981) 在等向强化和软化的条件下导出了渐进破坏的弹塑性本构关系^[50]。T. Adachi (1991) 对有限元单元网格大小对计算结果的影响进行了深入研究^[32]。方德平 (1991) 对 1980 年 Owen D. R. J. 的有限元程序进行了脆塑性修改^[51]。沈珠江 (1997) 建立了类似孔隙压力产生的方法来描述应变软化过程的广义孔隙压力模型理论^[17]。侯永峰等 (2004) 以多次载荷作用后的变形及强度的衰减特征作为软化系数, 设定与作用次数有关的软化参数^[52]。D. Sterpi (2004) 利用应变软化本构模型对隧道的开挖过程中掌子面破坏进行了三维数值模拟^[53]。Zdenek P. Bazant (2004) 从对非局部微尺度的角度建立应变软化本构模型^[54]。F. Varas (2005) 利用有限差分软件 (FDM) 对基于分叉理论的应变软化隧道模型进行了模拟计算^[55]。A. Troncone (2005) 建立包含弹塑性本构和非局部弹塑性本构的有限元模型^[56]。Chai J.-C. (2007) 建立了基于剑桥黏土模型修改的应变软化本构模型^[57, 58]。E. Conte (2010) 通过建立非局部弹塑性应变软化模型, 并利用某边坡的开挖渐进性破坏特征进行了验证^[59]。S. L. Wang (2011) 建立了一种新的应变软化本构模型的解法^[60]。

通过应变软化本构模型数值方法的不断完善, 部分带有较为合理应变软化计算本构模型的商业软件逐步出现, 国内学者更多地集中在应用商业软件对复杂问题的处理方面。王学滨、潘一山 (2002) 利用 FLAC 对具有应变软化特征的岩石试样在不同应力状态下的力学行为进行了系统研究。张均锋、丁桦 (2003) 基于 FLAC 自带的应变软化本构模型, 模拟出含裂隙岩质边坡的渐进性破坏^[61]。王志伟、王庚荪 (2004) 利用 FLAC 模拟裂隙性黏土边坡的渐进性破坏^[62]。谭文辉、任奋华 (2007) 提出利用坡体峰值强度计算最危险滑动面, 利用坡体残余强度计算加固设计方案的综合加固设计方法^[63]。施大堃 (2010) 利用三维 ABAQUS 中提供的用户子程序开发了应变软化本构模型^[64]。

由于应变软化本构模型的理论特征限制, 应变软化性质主要应用在均质岩体材料中, 如均质的岩土边坡及地下隧道等, 很少在计算过程引入复