

*The Deformation Characteristics and Process
and Evaluation Methods of Safety Monitoring for Cut Slopes*

路堑边坡变形监测 与稳定性安全评估方法

程建军◎著

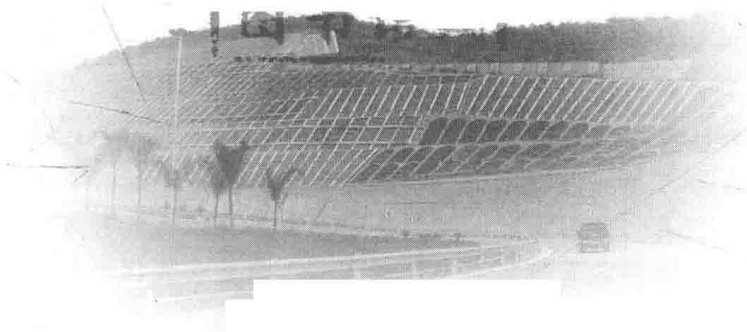


人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

*The Deformation Characteristics and Process
and Evaluation Methods of Safety Monitoring for Cut Slopes*

路堑边坡变形监测 与稳定性安全评估方法

程建军◎著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目 (CIP) 数据

路堑边坡变形监测与稳定性安全评估方法 / 程建军
著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.2
ISBN 978-7-114-12816-5

I. ①路… II. ①程… III. ①路堑-边坡-变形观测
②路堑-边坡-边坡稳定性-安全评价 IV. ①U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第030023号

书 名: 路堑边坡变形监测与稳定性安全评估方法
著 作 者: 程建军
责任编辑: 赵瑞琴
出版发行: 人民交通出版社股份有限公司
地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门内大街斜街3号
网 址: <http://www.chinasybook.com>
销售电话: (010) 59757973
总 经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 880×1230 1/32
印 张: 9.375
字 数: 233千
版 次: 2016年2月 第1版
印 次: 2016年2月 第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-12816-5
定 价: 28.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

内 容 提 要

本书以边坡开挖卸荷的力学机理理论及边坡岩土体蠕变变形理论基础为出发点,结合在福建山区高速公路边坡建设过程开展的大量深孔位移监测数据成果,对路堑边坡的历时变形规律进行研究。

本书对于从事高速公路边坡设计、施工及运营中的高速公路边坡稳定性评价与滑坡防治的工程技术人员有很好的借鉴和参考作用。

前 言

近年来,随着我国山区高等级公路工程的迅速发展,一方面纵横交错新交通网的建设,另一方面低等级公路的拓宽改建升级,都涉及大量开挖路堑边坡工程。这些工程问题尤其是在我国浙江、福建、广东等东南沿海地区表现突出。工程技术人员对路堑边坡变形发展与破坏规律的认识不够造成大量路堑高边坡在施工与运营期的破坏,给道路的正常运营带来了安全隐患,也增加了巨额后期投资。

如何正确设计稳定的高边坡是工程边坡设计与滑坡防治技术领域内亟待解决的问题,如何利用成熟的监测手段评估分析工程边坡的施工期以及运营期的安全状态更是摆在建设单位与施工单位技术人员面前的难题。引起边坡变形破坏的原因很多,涉及坡体地层岩性、地质构造、岩土体结构、坡体结构以及工程地质与水文地质条件等。触发边坡变形与破坏的因素很多,各因素之间相互耦合作用后更为复杂,在无法首先通过计算获得准确安全信息时,采用边坡变形监测手段显得尤为重要和有效。

科学技术手段发展至今,各种先进的边坡变形监测手段层出不穷。但能为工程界所掌握和接受的最可靠的监测手段还是深孔测斜技术手段。在边坡开挖以及支挡结构施工期深孔测斜能准确把握边坡的稳定状态,为工程边坡建设保驾护航。在运营期,深孔测斜作为一种动态监测技术手段,能对边坡的稳定状态进行适时的评价与监测,对变形发展较快且有危险的工点提供预警信

息，为边坡的后期补强加固设计与施工提供科学依据。

作者2005年进入铁道部科学研究院攻读博士学位，与此同时，入职中铁西北科学研究院南方分院，以工程师的身份担任高边坡现场施工设计代表，在边坡施工现场一线工作3年，负责福建泉州—三明高速公路路堑边坡的设计与现场变更设计及施工指导工作。同时负责泉州—三明以及永安—武平线的高边坡动态监测工作。在开展高边坡动态监测评估工作方面，分析整理了累计达286个边坡工点，约1500个深孔测斜钻孔，监测深度累计超过20万米获得了大量的深孔测斜数据。

为了对已有监测数据的分析与整理更有科学性与依据，在统计分析边坡深孔测斜数据的同时，采用有限元数值分析手段进行了数值反演，使结论更可靠。并有针对性地开展重点边坡单工点的全程监测研究。

在整理分析大量深孔测斜数据的过程中，得到了中铁西北科学院资深边坡专家王恭先研究员、黄小铭研究员的指导，同时得到了许多同事的帮助与指导。特别是廖小平研究员无私地将边坡设计实践经验传授给我，在此表示衷心感谢。

著者

2016年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 工程边坡	1
1.1.1 工程边坡建设现状	1
1.1.2 道路工程边坡监测的重要性	3
1.1.3 工程边坡研究的意义	4
1.2 国内外有关边坡工程的研究现状及分析	5
1.2.1 边坡开挖卸荷相关理论的研究现状	6
1.2.2 边坡历时变形发展规律的研究现状	8
1.2.3 边坡安全监测的研究现状	10
1.2.4 边坡稳定性分析的研究现状	12
1.3 主要研究内容与技术路线	14
1.3.1 主要研究内容	14
1.3.2 研究技术路线	15
第2章 路堑边坡地质与力学基础研究	17
2.1 路堑边坡工程概述	17
2.2 路堑边坡的工程分类	18
2.2.1 土质边坡	19
2.2.2 岩质边坡	20
2.2.3 二元结构边坡	24

2.3 路堑边坡地质基础研究	24
2.3.1 路堑边坡变形破坏的孕育条件	24
2.3.2 路堑边坡的变形破坏触发因素	30
2.3.3 路堑边坡的变形破坏类型	33
2.4 路堑边坡力学基础研究	36
2.4.1 路堑边坡应力应变状态研究	36
2.4.2 路堑边坡坡体力学强度参数特性研究	40
2.4.3 路堑边坡稳定性评价方法	41
2.5 本章小结	45
第3章 路堑边坡开挖卸荷变形的力学机理 及其特征规律研究	46
3.1 边坡开挖卸荷理论基础	46
3.2 边坡开挖卸荷的应力分析	49
3.2.1 边坡开挖卸荷的场区应力分布特征	49
3.2.2 边坡开挖卸荷的场区内点位应力分析	53
3.3 路堑边坡开挖卸荷的变形规律分析	61
3.3.1 边坡开挖卸荷的场区变形规律分析	61
3.3.2 边坡开挖卸荷的水平向变形规律分析	64
3.4 边坡的开挖卸荷效应与工程作用	66
3.4.1 边坡的开挖卸荷效应	66
3.4.2 边坡岩土体开挖卸荷破坏的基本规律	67
3.4.3 边坡开挖的工程作用	69
3.5 本章小结	70
第4章 路堑边坡岩土蠕变规律研究	72
4.1 岩土蠕变理论基础	72
4.1.1 岩土蠕变特性	72
4.1.2 岩土蠕变模型	74
4.2 边坡蠕变变形规律	79

4.2.1	边坡蠕变概念	81
4.2.2	坡体材料蠕变特性	82
4.2.3	坡体蠕变边界条件	84
4.2.4	边坡蠕变类型	86
4.2.5	边坡蠕变影响因素	88
4.2.6	边坡蠕变变形规律	89
4.3	本章小结	91
第5章	路堑边坡动态监测技术研究	93
5.1	路堑边坡监测的目的与意义	93
5.2	路堑边坡监测体系	94
5.2.1	坡体变形(位移)监测	94
5.2.2	坡体应力监测	98
5.2.3	边坡的水文监测	109
5.2.4	边坡的其它特征量监测	110
5.3	边坡坡体深部位移监测	110
5.3.1	边坡坡体深部位移监测技术	110
5.3.2	监测数据处理与变形曲线分析	116
5.4	边坡监测优化设计原则及监测技术要求	131
5.4.1	边坡监测优化设计原则	131
5.4.2	边坡监测技术要求	132
5.5	本章小结	134
第6章	路堑边坡变形历时数值分析	135
6.1	数值计算分析方法	135
6.1.1	弹塑性本构模型	135
6.1.2	Joint模型(模拟结构面效应)	136
6.2	路堑边坡开挖变形历时数值模型	138
6.2.1	均质坡体数值模型	139
6.2.2	I型二元结构坡体数值模型	140

6.2.3	Ⅱ型二元结构坡体数值模型	141
6.2.4	Ⅲ型二元结构坡体数值模型	141
6.2.5	Ⅳ型二元结构坡体数值模型	142
6.2.6	Ⅴ型二元结构坡体数值模型	143
6.2.7	Ⅰ型含结构面坡体数值模型	143
6.2.8	Ⅱ型含结构面坡体数值模型	144
6.3	路堑边坡开挖变形历时数值模拟结果分析	145
6.3.1	坡体开挖过程变形曲线	145
6.3.2	开挖过程中坡体历时变形规律与特征	162
6.4	路堑边坡开挖后历时变形数值模拟	163
6.4.1	岩土介质材料衰减引起坡体历时变形 数值模拟	164
6.4.2	蠕变边界条件改变引起坡体历时变形 数值模拟	178
6.5	本章小结	180
第7章	福建山区高速公路边坡工程监测实例	182
7.1	福建省山区高速公路边坡工程监测概况	182
7.2	三福高速公路边坡监测	183
7.2.1	三福高速公路三明市境段边坡监测	183
7.2.2	三福高速公路南平市境段边坡监测	186
7.2.3	三福高速公路福州市境段边坡监测	188
7.3	邵三高速公路边坡监测	190
7.3.1	邵三高速公路南平市境段边坡监测	190
7.3.2	邵三高速公路三明市境段边坡监测	191
7.4	漳龙高速公路漳州市境段边坡监测	194
7.5	龙长高速公路边坡监测	196
7.6	在建高速公路边坡监测	198
7.6.1	浦南高速公路边坡监测	198
7.6.2	泉三高速公路泉州境段边坡监测	198

7.6.3 泉三高速公路三明市境段边坡监测	199
7.6.4 永武高速公路边坡监测	199
7.7 重点滑坡监测	200
7.7.1 梅列互通滑坡监测	200
7.7.2 K201滑坡监测	208
7.7.3 金斗山滑坡监测	214
7.8 重点边坡监测	227
7.8.1 永武K28+410~520段右边坡开挖 变形监测试验	227
7.9 本章小结	237
第8章 基于动态变形监测的稳定性评估方法	239
8.1 边坡工程稳定性评估方法	239
8.1.1 工程地质类比评估方法	239
8.1.2 数值分析计算评估方法	241
8.1.3 工程检测监测评估方法	243
8.2 动态监测评估方法	245
8.2.1 边坡施工期稳定性评估	245
8.2.2 边坡工后变形坡体稳定性判识	249
8.2.3 边坡变形破坏的监测曲线分析	256
8.3 本章小结	270
第9章 结论与展望	271
9.1 主要研究成果和结论	271
9.2 主要创新点	275
9.3 存在的问题和进一步研究工作	276
参考文献	278

第1章 绪论

1.1 工程边坡

1.1.1 工程边坡建设现状

中国是一个多山的国家，除广阔的西部地区外，还包括华东、华南沿海经济发达地区，山区面积占中国960万 km^2 国土面积的69%。以福建省为例，其山地面积占到全省陆地总面积的81.04%。目前我国山区经济发展相对滞后的现状已经严重阻碍了国家经济建设快速发展的步伐，为此国家重点对山区基础设施建设投入大量资金、人力、物力，以期加快山区的经济建设。仍以福建省山区高等级公路建设为例，自1994年修建第一条高速公路泉（州）至厦（门）开始，相继建成了国道主干线同三高速公路闽境福泉高速公路、厦漳高速公路、罗宁高速公路、罗长高速公路、漳诏高速公路、福宁高速公路、漳龙高速公路、京福福建境内段龙长、浦南、泉三、永武等高速公路，到2007年历时10多年，修建公路长度突破2000km，且近几年更是突飞猛进。但山区的高速公路建设不可避免地遭遇大量深挖路堑边坡与高填方路堤边坡工程，边坡失效与滑坡事故成为山区高速公路建设中的焦点与难点问题之一。此外，国家的铁路、能源、矿山、水利建设工程领域都不可避免地遭遇大量的高陡边坡与深凹边坡，这些边坡工程的成败已经成为制约整个工程建设成败的因素之一。

与此同时,在国家西部大开发的基础建设领域中,边坡工程与滑坡事故亦成为西部公路交通发展过程中遇到的普遍性问题。随着基础工程建设规模的不断增大,在水利水电工程领域与矿山建设领域所遭遇的边坡更是越来越高,如采矿边坡高度可达300~500m,其复杂性也是前所未有。举世瞩目的长江三峡工程,其双线连续五级船闸是世界上规模最大的船闸,位于山顶劈岭下切的岩槽中,土石方开挖量达3700万 m^3 ,形成的花岗岩体边坡高度达170多米,且下部为50~60m的直立岩墙,这些工程边坡的安全与否,已成为整个工程建设的关键点之一。

水利、矿山工程中的高边坡工程失稳破坏,以及地质领域中的灾害性滑坡都常常造成巨大的经济损失与惨重的人员伤亡。意大利瓦依昂水库近坝库段的巨型滑坡使拱坝坝基失稳,库水形成巨浪,造成下游2600余人死亡;我国云南澜沧江漫湾水电站左岸缆机平台边坡失稳的治理工程耗资1.2亿元,延误工期一年多,造成经济损失超过10亿元;天生桥二级水电站进口右岸滑坡事故造成48人丧生。如此重大的工程边坡失稳与滑坡事故令人触目惊心。是什么原因造成诸多工程边坡失稳酿成滑坡事故呢?值得我们去思考与深入研究。

与水利、矿山工程建设不同,高等级公路及铁路都是线状工程,要穿越不同的地貌单元和岩层分布区,其所遭遇的高边坡使用年限较长,属于永久边坡工程,因此高速公路高边坡工程的安全可靠关系到国计民生。高速公路工程中边坡工程的失稳破坏,常常形成滑坡与崩塌,轻则增大投资,延长工期,重则破坏公路、中断交通、造成人员伤亡。因此,高速公路在建边坡工程的防治技术与已建成边坡的安全监控技术等问题已引起政府与工程、科研等部门的热切关注。而在地质灾害防治领域中,国际上已将地震、滑坡、泥石流并列为全球性三大地质灾害(崔政权、李宁,1999),可见滑坡作为地质灾害的一种,常常威胁着人类的生存与国家的发展。我国的西北、西南、东南等山区也是地质灾害频发的地区,例如,2007年7月28日发生在四川北川羌族

自治县白什乡后山的150万 m^3 山体崩塌滑坡使千余名农民沦为灾民，直接对山区人民的生命和财产构成威胁。

1.1.2 道路工程边坡监测的重要性

造成路堑边坡失效与滑坡事故的原因是多方面的，由于在路堑边坡的勘察、测试与设计的每一个阶段都存在不确定性因素，造成路堑边坡的设计不可能完善。正是由于设计上的不完善往往造成工程的失败或部分失败，这就要求必须通过施工期和运营期的安全监测来保证施工安全，验证设计合理性并通过信息反馈及时修正设计方案与施工方法，因此研究路堑边坡在各种工程地质条件、各种坡体结构、构造以及岩性组合条件下的开挖过程的坡体变形规律对设计、施工都有指导意义。大量实践证明，边坡往往在施工完成后的一段时期内发生变形甚至破坏，部分边坡甚至在运营期发生滑坡、坍塌等工程事故，说明在运营期的安全监测不仅必要而且十分重要。通过边坡安全监测可以把控坡体的安全状态，掌握边坡变形的发展状态，以便在边坡出现宏观变形失稳之前实施工程防治措施。

在当前路堑边坡工程中最有效和成熟的安全监测技术当属坡体深部变形测斜监测手段，本书在总结和继承了当前有关路堑高边坡研究成果的基础上，以福建三福高速公路边坡监测、邵三高速公路边坡监测、京福高速公路边坡监测以及龙长高速公路边坡监测等近200km测斜监测数据为基础，进行了深入总结、分类与提炼，并结合永武高速公路边坡现场施工对部分开挖边坡进行测斜监测试验，以把握坡体在开挖过程中的变形发展规律。

结合当前高速公路路堑边坡所涉及的突出技术难点，本书拟研究如下问题：

(1) 路堑边坡开挖卸荷变形的力学机理及特征规律研究。近年来，该项研究成为逐渐被关注的难点与重点问题。掌握了边坡开挖卸荷后的坡体场区应力分布特征以及场区内特征点位的应力随开挖进程历时的变化规律，才能明确由开挖卸荷造成的坡体

松弛带的范围与区域,在此基础上,坡体的防护治理工程措施的采用才能有的放矢,因此对开挖卸荷变形的力学机理及特征规律的研究是边坡设计计算理论进一步发展和不断完善的方向。

(2) 坡体的稳定与安全必须历经开挖卸荷过程以及开挖卸荷完成后长期的考验。路堑坡体的历时变形包括开挖卸荷造成的变形与开挖完成后的长期蠕变变形两部分。在岩土蠕变理论的基础上对坡体的蠕变机理与蠕变规律进行研究,能够为边坡的稳定性评估尤其是坡体长期的稳定状态的评估提供依据与理论支持,同时,由于对工程边坡的开挖变形规律以及坡体长期变形发展规律的研究尚不成体系,造成当前边坡设计人员仍依照经验进行设计并指导施工,设计方案的针对性不足,工程防护措施出现失效或过于保守造成浪费,因此研究坡体开挖过程的变形规律以及坡体开挖后长期变形发展规律具有理论价值与实际意义。

(3) 目前对于工程边坡失效与滑坡事故往往以治理技术研究为主,这些都是在滑坡变形破坏发生后的工程治理措施,实际上已经失去了最佳工程处理时机,不仅加大了工程治理的难度,增加了工程的造价,且难以达到有效与经济。合理而有效的方法是在掌握边坡变形发展规律的基础上,在边坡变形处于缓增启动阶段采取有针对性的工程处理措施,防止边坡变形进入加速阶段。因此研究基于边坡工程的安全监测技术的坡体变形规律,以变形监测手段指导施工、预防工程失效、把控工程治理时机与进度很有实际意义。

1.1.3 工程边坡研究的意义

当前国家经济进入快速发展时期,大量已建和在建山区高速公路都涉及路堑边坡工程问题。由于我国在山区高速公路建设方面还处于积累和实践时期,大量边坡技术问题尚未良好地解决,突出的问题就是与路堑边坡稳定性相关的失稳破坏问题,一般都是从渐变到突变的发展过程,因此研究路堑边坡开挖卸荷的变形规律以及边坡变形的长期发展规律有现实意义。影响路堑边坡稳

定性与长期稳定性的影响因素复杂多样,既涉及坡体岩土介质本身所有的固有因素,如岩土介质的物理力学特性及其强度衰减特性、坡体工程地质条件、水文地质条件、初始应力状态等,还涉及固有因素以外的各种其它因素,比如工程开挖、大气降雨、地质营力(地震、风化)等的影响,因此单凭经验难以掌握边坡的状态以及其历时变形的发展过程,必须依靠各种监测仪器对边坡坡体进行周密的安全监测。边坡安全监测能够监测到坡体在不同时间的真实状态的某种前兆及突变前信息,特别适合作为坡体稳定状态的长期评价依据,通过合理的设计安全监测系统,选择正确的安全监测方法,及时准确地整理分析监测数据资料,就能够及时掌握边坡的工作性状。正确的监测数据资料不仅能为坡体的安全提供把控指标,还能进一步为坡体变形,长期稳定性预测、预防提供依据。

本书以路堑边坡的地质与力学基础研究为出发点,剖析路堑边坡开挖卸荷变形的力学机理,以及坡体的开挖历时变形与长期蠕变规律,重点研究路堑边坡在开挖卸荷过程中及坡体开挖后的长期过程中的历时变形发展规律,并基于大量测斜监测数据,研究稳定坡体、不稳定坡体的稳定性状态历时变化过程,总结与提炼变形监测曲线形态变化特征规律以及稳定状态把控信息,为在建边坡与建成边坡的安全监测提供技术指导。以监测技术为手段,通过工程开挖施工期的坡体变形规律研究,力图能够优化监测手段,以开挖过程中的监测手段所反映的坡体稳定状态信息来优化后期监测设计方案,通过对开挖后坡体的长期变形规律的研究,力图掌握坡体的稳定状态的变化以及变化至破坏的异常启动点特征,为后期防护加固设计提供理论依据。

1.2 国内外有关边坡工程的研究现状及分析

边坡工程属于岩土工程范畴,它涉及工程地质、水文、力学、监测、气象、结构等诸多学科^[1-3]。对于边坡工程相关理论

——路堑边坡变形监测与稳定性安全评估方法

6

的研究从最初的纯经验判断开始,逐渐到定性评价与定量分析相结合的方向发展,已经有相当长的历史。其中对于边坡历时变形的研究是边坡工程相关理论中最重要的研究内容之一,由于边坡坡体的历时变形状况直接与坡体的稳定状态相关联,因此要获得坡体的稳定状态的信息必须及时掌握坡体的历时变形特征。路堑边坡作为工程边坡的一种,其历时变形包括开挖卸荷造成的坡体变形与坡体开挖完成后因坡体岩土介质材料的蠕变特性等因素造成的长期变形。对于坡体开挖卸荷造成的坡体松弛变形涉及边坡的开挖卸荷的力学机理、开挖卸荷的应力场区、特定点位的应力变化规律等方面的研究,对于边坡开挖完成后的历时变形的研究涉及坡体岩土介质材料的蠕变性质、坡体蠕变边界条件的研究。但迄今为止对于边坡的历时变形发展过程(包括边坡的变形孕育、发展、灾变演化过程)的研究尚不成体系,对于涉及边坡历时变形的坡体开挖卸荷机理、蠕变变形规律等仍不清晰,需进一步深入研究。

边坡安全监测可以从宏观上把控边坡的历时变形发展过程,可以为研究坡体的内在变形机制(开挖卸荷机制、蠕变变形机制)提供佐证与判识,因此研究边坡安全监测技术,以及监测资料、数据处理方法有较强的工程实践意义。当前对于边坡稳定度的研究,工程实践中仍然基于极限平衡经典解进行分析,数值分析方法仅作为分析的辅助手段,因此深入研究有效、可靠的数值分析方法是边坡稳定性分析的研究内容之一。

1.2.1 边坡开挖卸荷相关理论的研究现状

关于边坡开挖卸荷相关理论,国外这方面的研究较少,有代表性的研究者为M.B.Etkin和A.E.Azarkovich,他们针对露天爆破开挖产生的损伤区的形状和范围,给出了确定爆破开挖损伤区半径的公式^[4]。而在国内,相关研究以水利水电工程和高速公路深路堑工程为主。

围绕三峡工程开展的相关研究是比较多的。哈秋龄等在国内