

 复杂山区道路路基边坡工程技术系列丛书

顺层岩质边坡稳定性 分析与支挡防护设计

李安洪 周德培
冯 君 张继春 编著

*Shunceng
Yanzhi Bianpo
Wendingxing
Fenxi Yu Zhidang
Fangku Sheji*



人民交通出版社
China Communications Press



湖南大学图书馆ZS0815414

 复杂山区道路路基边坡工程技术系列丛书

顺层岩质边坡稳定性 分析与支挡防护设计

李安洪 周德培 编著
冯 君 张继春



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书紧密结合顺层岩质边坡工程地质特征,全面论述了该类边坡工程稳定性分析和支挡防护设计中工程技术人员广泛关注的问题,即如何确定坡体破坏模式、坡体开挖失稳范围、潜在滑移面的确定方法、结构面力学性质及抗剪强度参数的确定等。本书论述了深孔爆破、浅孔小台阶爆破和浅孔光面爆破可能产生的岩体层裂范围,提出了适用于顺层岩质边坡爆破施工的减振爆破技术;介绍了基于顺层岩质边坡失稳模式的支挡加固措施,同时还介绍了通过注浆方式增强坡体整体性能、提高层面抗剪强度,再辅以轻型支护体系的加固防护技术。本书以渝怀铁路 200 多处顺层岩质边坡工程为依托,给出了具有工程实用价值的设计原则,并以表格的形式提供了该工程 80 多处顺层岩质边坡的工程简况以及支护措施,供设计人员参考。

本书可供铁道、公路、建筑、水电等行业的工程技术人员使用,亦可供高校师生和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

顺层岩质边坡稳定性分析与支挡防护设计 / 李安洪
等编著. —北京: 人民交通出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-114- 08868- 1

I. ①顺… II. ①李… III. ①岩石 - 边坡稳定性 - 分
析②岩石 - 边坡防护 - 防护工程 IV. ①TU457②U417. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 119227 号

复杂山区道路路基边坡工程技术系列丛书

书 名: 顺层岩质边坡稳定性分析与支挡防护设计

著 者: 李安洪 等

责任编辑: 高 培

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 15.75

字 数: 363 千

版 次: 2011 年 8 月 第 1 版

印 次: 2011 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114- 08868-1

定 价: 45.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



序 一

山区铁路与公路工程边坡,因地形险峻、地质构造复杂,且存在滑坡、错落、崩塌等不良地质现象,具有边坡灾害类型多、成灾机理复杂、防治难度大等特点。长期以来,由于缺乏较为系统的科学理论指导,边坡工程的设计施工对经验的依赖性较大,施工中边坡地质灾害时有发生,建成后也时常出现溜坍、崩塌、滑坡等病害,对工程建设和正常运营造成了不利影响。随着国家基础设施建设的迅速发展,山区新建的铁路与公路工程不断增加,特别是高速铁路和高速公路的大量兴建,对边坡工程的安全性提出了更高要求,迫切需要适合山区铁路与公路工程边坡灾害防治的成套工程技术。

近十年来,中铁二院工程集团有限责任公司结合南昆、内昆、渝怀铁路及京珠高速公路等复杂山区铁路与公路工程建设,开展了“破碎软质岩层深路堑高边坡工程试验研究”、“路堑高边坡病害预防及防治措施研究”、“顺层岩质路堑边坡稳定性研究及支挡防护工程试验”、“渝怀铁路斜坡软弱地基填方工程特性及工程技术研究”、“影响支挡结构安全性因素分析研究”等课题的试验研究,完成了十余项复杂山区铁路与公路路基工程设计,形成了复杂山区铁路与公路路基边坡勘察、设计、施工的成套技术,成果显著。

为进一步推广复杂山区铁路与公路路基边坡工程新技术,有关课题主研人员撰写了“复杂山区道路路基边坡工程技术系列丛书”,共三册。

《新型支挡结构设计 with 工程实例》系统介绍了支挡工程设计理论、计算方法以及工程实例,内容包括卸荷板挡土墙、悬臂式和扶壁式挡土墙、锚定板挡土墙、锚杆挡土墙、加筋土挡土墙、土钉墙、抗滑桩、桩板式挡土墙、桩基托梁挡土墙、预应力锚索、锚索桩、槽形挡土墙等支挡结构及与支挡结构有关的植被护坡技术,每种结构包括了结构特点及使用条件、荷载和内力计算、强度和稳定分析、构造要求和设计注意事项以及工程实例等内容。该书既有设计理论的介绍,又有工程实例以供参考,并反映了近年来工程设计领域中的最新成果和有关设计规范中的新内容,实用性强,是该领域一本重要的工具书。

《顺层岩质边坡稳定性分析与支挡防护设计》针对山区铁路公路建设中常见的顺层边坡问题,结合近几年来铁路顺层岩质路堑边坡工程实践与研究,介绍了顺层岩质边坡分类与结构面特征、失稳模式和稳定性评价、稳定性计算分析方法、顺层岩质边坡加固技术、顺

层岩质边坡爆破施工技术、顺层岩质边坡设计与工程实例。该书是对顺层边坡研究成果与实践经验的总结,具有很强的针对性、实用性和理论性。

《斜坡软弱地基填方工程技术研究与实践》针对山区特殊地形、地质与气候环境下形成的斜坡软弱地基,采用有限元计算与稳定分析、土工离心模型试验、现场原型测试等研究方法,以地基在填方荷载作用下的变形特征为主线,系统分析了斜坡软弱地基填方工程的变形特性、破坏模式及加固机理,提出了斜坡软弱地基填方工程稳定分析方法及以限制地基侧向变形为核心的斜坡软弱地基填方工程技术。该书在理论上完善了斜坡软弱地基填方工程设计方法,同时为工程应用提供了可借鉴的工程实例,理论和工程意义兼备。

“复杂山区道路路基边坡工程技术系列丛书”,是中铁二院山区铁路和公路路基工程技术系列研究成果和实践经验的总结和升华,更是相关研究人员十余年在专业技术上辛勤耕耘的结果,可以预期,该系列丛书的出版必将进一步推动路基边坡工程技术的持续进步。

中铁二院工程集团有限责任公司总经理



2010年10月30日

序 二

顺层边坡问题是山区基本建设中常见的岩土工程问题,由于对该类边坡缺乏足够的认识,顺层滑坡造成的重大事故屡见不鲜。顺层边坡的稳定性受岩性、岩体结构、结构面位置特征、地下水等诸多因素影响,因而层间计算参数的确定和顺层推力的计算成为顺层边坡设计的难点。

中铁二院工程集团有限责任公司长期以来从事西南山区铁路勘察设计工作,对此具有丰富的工程实践经验,同时结合渝怀铁路工程,与西南交通大学等单位开展了“顺层岩质边坡稳定性研究及支挡防护工程试验”。通过大量的室内外试验和计算分析,取得了一系列成果,并成功应用于多条山区铁路、公路顺层边坡设计施工中,为复杂艰险山区道路的建设提供了成功经验。本书是在总结顺层工程实践经验及顺层科研成果基础上编制而成的,具有以下特点:

(1)在综合考虑了顺层路堑边坡的地质特征、工程设计和施工特点以及道路顺层路堑边坡勘察成果和实践经验等的基础上,建立了顺层路堑边坡的分类体系,据此对顺层岩质边坡进行分类。

(2)总结了顺层边坡失稳的9种破坏模式,重点研究了顺层滑移破坏、滑移—拉裂破坏、滑移—弯曲破坏、滑劈破坏等工程中常见的顺层破坏模式,给出了定量的稳定性分析和计算方法。

(3)对顺层岩质边坡开挖影响范围与开挖切层高度、岩层倾角、岩层走向与边坡走向夹角的关系进行了系统研究和探讨,为顺层边坡的加固设计提供了科学依据。

(4)提出了顺层岩质边坡的减振爆破技术措施。

(5)介绍了顺层岩质路堑边坡的设计方法、设计原则及常用的顺层岩质边坡加固技术。本书还提供了大量的顺层边坡工程实例及算例。

因此,本书内容具有很大的实用性,在当前铁路、公路大规模建设的时期,本书的出版对于铁路和公路建设领域的科研、教学和工程技术人员来说将是一本很有价值的参考文献。

中国工程院院士

2011年3月

前 言

顺层边坡问题是山区铁路、公路建设中常见的工程地质问题。以往的工程实践证明,顺层边坡引发的问题多、危害大,由顺层滑坡造成的重大事故屡见不鲜。顺层路堑边坡设计是山区路基设计的难点,若设计处理不当将对工程建设和生命财产造成巨大损失。反之,过于保守将造成投资浪费。

为提高顺层路堑边坡设计和施工水平,避免形成更多滑坡后再进行整治,造成不必要的人力、物力浪费。以渝怀铁路 200 多处顺层边坡工程为依托,中铁二院工程集团有限责任公司(以下简称中铁二院)与西南交通大学开展了“顺层岩质边坡稳定性研究及支挡防护工程试验”,针对顺层路堑设计的难点,重点解决顺层路堑边坡的分类、开挖失稳范围、破坏模式、层间力学参数、稳定性分析方法,以及合理支挡加固形式的选择等方面的疑难问题。本书的内容既是这些科研成果的总结和提炼,也是中铁二院近二十年来在西南山区铁路建设中有关顺层岩质边坡工程设计、施工经验的汇集。本书撰写时紧密结合顺层岩质边坡工程的地质特征,全面论述了该类边坡工程稳定性分析和支挡防护设计中工程技术人员广泛关注的问题,即如何确定坡体破坏模式、坡体开挖失稳范围、潜在滑动面的确定方法、结构面力学性质及抗剪强度参数的确定等;论述了深孔爆破、浅孔小台阶爆破和浅孔光面爆破可能产生的岩体层裂范围,以及爆破施工的减振爆破技术。本书提出来了顺层岩质边坡支挡加固的新理念,即根据顺层岩质边坡可能的失稳破坏模式设置支挡加固措施;同时还介绍了在注浆增强坡体整体性能、提高层面抗剪强度的基础上,辅以轻型支护体系的加固防护技术。本书给出了具有工程实用价值的设计原则,并以表格的形式列出了渝怀铁路成功处治的 80 多处顺层岩质边坡的工程简况以及支护措施,供设计人员参考。

本书共八章,着重介绍了顺层岩质边坡分类与结构面特征、失稳模式和稳定性评价、稳定性分析、开挖变形及影响范围分析、顺层岩质边坡爆破施工技术、顺层岩质路堑边坡加固技术、顺层岩质边坡设计与工程实例。内容涉及顺层边坡的勘察、设计、施工技术,反映了近年来顺层边坡研究的最新成果,既有系统的理论研究,又有大量的工程实例。本书内容丰富、实用性强,可供专业技术人员及高等院校师生参考。

本书由李安洪、周德培主编,并对全书进行统校与定稿。参加各章编写者为:第一章,

李安洪、周德培；第二章，李安洪、冯君；第三章，冯君；第四章，冯君、周德培；第五章，周德培、冯君；第六章，张继春；第七章，周德培、李安洪；第八章，李安洪、周德培。

本书的出版得到了中铁二院的大力支持和帮助，写作过程中参阅了大量的参考资料，在此向他们表示感谢。由于作者水平有限，书中如有错漏和不足之处，敬请专家、读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 顺层岩质边坡基本概念与特征	1
第二节 顺层岩质边坡工程综述	3
第三节 渝怀铁路顺层岩质边坡工程及研究成果	8
参考文献	11
第二章 顺层岩质边坡分类与结构面特征	15
第一节 概述	15
第二节 顺层岩质边坡分类	15
第三节 结构面形态及变形特性	20
第四节 结构面力学性质	25
第五节 结构面抗剪强度	33
参考文献	48
第三章 顺层岩质边坡失稳模式和稳定性评价	49
第一节 概述	49
第二节 顺层岩质边坡破坏模式	49
第三节 基于赤平投影原理的失稳模式判断	54
第四节 顺层岩质边坡的总体稳定性评价	57
第五节 边坡稳定性安全评价的方法和标准	61
参考文献	62
第四章 顺层岩质边坡稳定性分析	63
第一节 概述	63
第二节 顺层滑动破坏型顺层边坡稳定性分析	63
第三节 滑动拉裂破坏型顺层边坡稳定性分析	76
第四节 滑动弯曲破坏型顺层边坡稳定性分析	83
第五节 滑劈破坏型顺层边坡稳定性分析	89
第六节 楔形体破坏型边坡稳定性分析	92
参考文献	95
第五章 顺层岩质边坡开挖变形及影响范围分析	97
第一节 概述	97
第二节 开挖影响范围系列小比例模型试验	97

第三节	开挖影响范围大比例模型试验	99
第四节	开挖影响范围数值分析	100
第五节	工程实例验证	104
	参考文献	108
第六章	顺层岩质边坡爆破施工技术	109
第一节	概述	109
第二节	顺层岩质路堑边坡爆破地震效应	112
第三节	顺层边坡岩体爆破的层裂效应	126
第四节	顺层岩质边坡开挖爆破的减振技术	134
	参考文献	142
第七章	顺层岩质路堑边坡加固技术	145
第一节	加固原则与常用技术	145
第二节	注浆加固技术与效果分析	156
第三节	独立布置的大锚杆组合结构设计计算	160
第四节	微型桩组合结构的设计计算	167
	参考文献	180
第八章	顺层岩质边坡设计与工程实例	181
第一节	概述	181
第二节	确定滑移面的方法	182
第三节	结构面抗剪强度	185
第四节	顺层岩质路堑边坡设计原则	192
第五节	工程应用实例	195
	参考文献	231
附录一	渝怀线典型顺层岩质路堑边坡工点照片	232
附录二	顺层岩质路堑边坡病害工点照片	238

第一节 顺层岩质边坡基本概念与特征

自然界中具有层状构造的沉积岩约占陆地面积的三分之二(我国的沉积岩约占我国陆地面积的 77.3%),许多变质岩也具有层状构造特征,因此在人类工程活动中将遇到大量的层状岩体稳定问题。在铁路、公路、水电等基础设施建设中,将会在层状岩体中开挖修建不同用途的边坡工程,当开挖边坡的坡面和层状岩体的层面二者的走向和倾向一致时,一般将这种边坡称为顺层岩质边坡或顺倾岩质边坡[图 1-1a)],其余的称为反倾[图 1-1b)]或斜向岩质边坡。

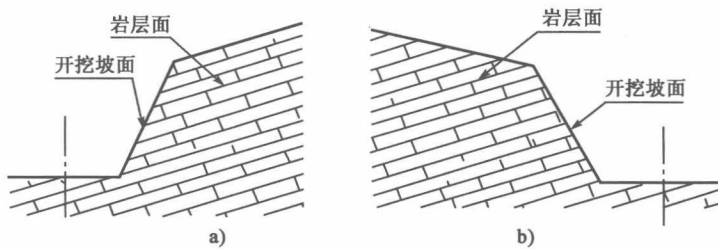


图 1-1 顺倾和反倾岩质边坡

a)顺倾岩质边坡;b)反倾岩质边坡

如图 1-1 所示,顺层岩质边坡很容易沿岩层面发生滑移破坏,而反倾岩质边坡则不会发生这种破坏。工程实践表明,当开挖坡面和岩层面二者的走向互相垂直或呈大角度相交时,坡体一般不会发生顺层滑移破坏;但呈小角度相交时则可能会发生滑移破坏。因此,二者走向夹角的大小是判断层状岩体开挖后是否发生顺层滑移破坏的重要指标之一,此指标目前还没有一个公认的值,有的认为是 20° ,有的认为是 30° ,从已发生顺层破坏的工程资料分析,在此暂且定为 30° 。因此将开挖坡面和岩层面二者走向的夹角小于 30° ,且倾向接近的边坡定义为顺层边坡。该类边坡开挖后发生顺层破坏的可能性很大,所以应按顺层边坡加以设计。工程实践中,顺层岩质边坡开挖后发生顺层破坏的情况很多,它已成为路基边坡工程设计的难点,因此本书将对此重点加以论述。

顺层岩质边坡除了具有开挖坡面和岩层面二者倾向和走向的组合特征外,还具有破坏模式以顺层滑移为主的特征,而且顺层滑坡灾害还有滞后性,即完工后一段时间才发生,使人难以防范。在顺层坡体自身的岩性、岩层走向与线路间夹角、岩层倾角大小、不利结构面的位置和密度、地下水、层间充填物类型与厚度等诸多因素中,岩层倾角、结构面对坡体稳定性影响较大。

一、岩层倾角

与其他类型的边坡相比,岩层倾角是顺层岩质边坡的一个明显特征,对坡体稳定性及其变形破坏形式有着极其重要的影响。图 1-2 为开挖坡面的倾角与岩层面倾角的关系。对于倾角较大的顺层岩体,开挖坡面的倾角可以与岩层倾角相同[图 1-2a)],此时如果开挖高度较大、岩层强度低,可能会因岩体重力挤压而使岩层发生压溃破坏。对于倾角较小的顺层岩体,一般开挖坡面的倾角都大于岩层倾角,岩层被切断后形成有效临空面[图 1-2b)]。同时由于其中的软弱夹层在坡面出露,故易于形成沿软弱夹层的滑动破坏。一般认为岩层倾角较缓时,不稳岩体的下滑力较小,开挖后边坡会较为稳定,但实际情况并非如此。例如 1997 年蒋爵光等对国内 12 条铁路干线的岩石边坡进行了详细地调查统计后发现:铁路岩石滑坡比较多,且都是顺层滑坡,凡是顺层路堑边坡地段,不论边坡坡度陡缓,只要在边坡坡度大于岩层倾角,且岩层倾角大于 15° 的情况下,几乎都发生过顺层滑塌或顺层滑动的破坏现象。甚至有的砂泥岩互层的红层软岩顺层边坡,即使岩层倾角小于 10° 也会发生顺层滑移破坏。例如成南高速公路 K174+800 发生的错落平推滑坡,滑面倾角仅有 6° 。因此岩层倾角的陡缓不能作为坡体稳定性的判别依据,还要结合其他因素综合分析。

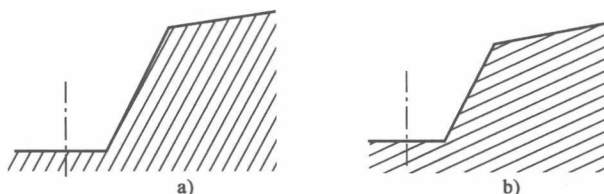


图 1-2 坡面倾角与岩层面倾角关系

a)开挖坡面与岩层面倾角相同;b)开挖坡面倾角大于岩层面倾角

二、结构面

结构面是顺层岩体中诸如断层、节理面、夹层及沉积面等的统称。顺层坡体被这些结构面切割成不连续体,使坡体成为非连续介质,给力学分析造成了很大困难。其中抗剪强度很低的软弱结构面是影响坡体稳定的重要因素。对于结构面而言,重要的是其连续性和充填物特征。

结构面的连续性。当边坡岩体结构面连续、完全贯通时,边坡稳定性较差;而当结构面为非贯通,如被一些陡坎错开时,则对边坡的稳定有利。结构面的充填特征主要是指结构面的充填物性质和充填厚度等。结构面内的充填物分为胶结和非胶结两种。胶结充填结构面的强度通常不低于岩体的强度,因此它不属于软弱面;胶结充填分硅质、铁质、钙质和岩脉充填等类型。非胶结充填节理内的充填物主要是泥质材料,当非胶结充填物中含膨胀性的不良矿物(如蒙脱石、高岭石、绿泥石绢云母、蛇纹石、滑石等)较多时,其力学性质最差;当含非润滑性质的矿物(如石英和方解石等)较多时,其力学性质较好。充填物的性状主要是指充填物粒度或颗粒大小、含水率、渗透系数、超固结比等。充填物的厚度可分为以下四种类型:①薄膜充填。它是节理面岩壁附着一层厚度在 2mm 以下的薄膜,由风化物矿物和应力矿物等组成,如黏矿物、绿泥石、绿帘石、蛇纹石、滑石等。虽然很薄,但由于充填矿物性质不良,它的存在也明显降低

了结构面的强度。②断续充填。充填物的厚度小于结构面形态高差,充填物在结构面内不连续,形成断续充填,其力学性质取决于结构面的形态及充填物和岩壁岩石的力学性质。③连续充填。充填物的厚度稍大于结构面形态高差,其力学性质取决于充填物和岩壁岩石的力学性质。④厚层充填。充填物厚度从数十厘米到数米不等,形成一个软弱带,其破坏时表现为岩体沿接触面的滑移,有时也表现为软弱带本身的塑流破坏。

第二节 顺层岩质边坡工程综述

一、顺层岩质边坡失稳机理与破坏模式

在层状岩体工程中,顺层岩质边坡是在铁路、公路、露天采矿和水利建设中经常遇到的工程。由于对该类边坡的工程性状、破坏机制缺乏深入了解而造成的重大事故屡见不鲜。如,1963年意大利瓦依昂水库左岸的巨型岩质顺层滑坡,滑坡体积约 $2\sim 3$ 亿 m^3 ,造成3 000多人死亡的重大事故;成昆铁路铁西滑坡为顺层岩石滑坡,堆积在路基上的滑坡体厚度达14m,体积为220万 m^3 的滑坡体,越过铁路达25~30m,掩埋铁路长160m,中断行车40天,造成严重的经济损失。20世纪80年代,仅广州铁路局怀化分局管内湘黔、焦柳线通过红砂岩顺层地段,陆续发生了多次较为严重的红砂岩路堑顺层滑坡灾害,中断正线行车共13次,其中3次造成列车颠覆、3次拦停区间运行的列车、8次封锁区间,累计中断正线行车达413h,给铁路运输生产造成了巨大的经济损失。20世纪90年代后期,我国西南、西北、华南地区的山区铁路及高速公路沿线顺层边坡稳定问题尤为突出,其边坡失稳不仅造成重大经济损失,而且严重威胁人民的生命安全。如2003年建成通车的重庆市万(州)梁(平)高速公路,全长67km,高度超过20m的岩质路堑高边坡共有115个,其中顺层岩质边坡有60个,占高边坡总数的52%。在施工过程中全线发生各类滑坡共57处,其中顺层岩质滑坡32处,占高边坡总数的56%。

工程中出现了如此多的顺层边坡及其灾害,促使人们重视顺层边坡破坏机理的研究。胡厚田等详细研究了层间错动与顺层路堑滑坡的关系后认为,岩石顺层路堑滑坡的滑动面基本上都是由层间错动带发展而来,层间错动的形成和发展决定着顺层滑坡的发生。徐邦栋、刘祥海等对顺层滑坡的性质及机理进行了研究,将顺层滑坡的滑动过程分为蠕动变形、挤压、滑动和暂时稳定四个阶段。徐邦栋和傅传元还应用地质力学理论对顺层滑坡的发生机理进行了研究。

石豫川、秦四清等应用物理模型试验、数值计算方法及非线性理论对缓倾角顺层路堑边坡进行了研究,均得出了一些有益的结论。对于陡倾角顺层边坡,以前将其定义为稳定类边坡。但随着对霸王山溃屈失稳滑坡变形破坏机制的不断认识,在自然界中特别是在三峡库岸边坡中发现了越来越多的溃屈失稳型滑坡。对此,我国学者采用了材料力学、弹性力学、模型试验、非线性力学等多种方式对其进行了大量地研究,探讨了顺层溃屈失稳的变形破坏机理,得到了不同条件下的极限坡长及位移量等。

中科院工程地质研究所等单位在20世纪80年代末对三峡库岸顺层岸坡进行过较为详细地研究,认为自然顺层岸坡的稳定性主要受强降雨和河流对岸坡侧向及前缘切割的影响,并归纳了自然顺层岸坡四种基本的重力破坏模式。

我国目前对路堑边坡的设计一般采用工程地质类比法,即对以前设计的边坡在一定环境地质条件下的稳定性状况进行统计分析,总结其成功的经验、分析其失败的原因;然后给出典型地质及水文条件下稳定的坡高及坡度,同时综合考虑工程的等级类别及失稳后果等方面的特殊要求并把其应用到类似边坡的设计中。这是目前铁路、公路、露天采矿和水利水电部门在边坡工程设计中大量采用的方法。工程地质类比法的应用与设计人员的经验有很大的关系。但是由于现场边坡岩体工程地质条件的复杂性,采用工程地质类比法往往难以获得良好的设计效果。

张倬元、王兰生等研究了岩体结构类型对应的变形破坏模式,如表 1-1 所示。对顺层岩质边坡变形破坏机制提出了蠕滑—压致拉裂、滑移—拉裂、滑移—弯曲等多种模式,开创了地质和岩石力学分析相结合的时代,为推进边坡稳定性分析合理建模作出了贡献。

岩体结构类型与变形破坏模式(张倬元等,1994年)

表 1-1

类 型	主 要 特 征		主要变形模式	可能破坏方式
	结构及产状	外形		
I 均质或似均质体斜坡	均质的土质或半岩质斜坡(包括碎裂状或碎块状体斜坡)	决定于土、石性质或天然休止角	蠕滑—拉裂	转动型滑坡或滑塌
II 层状体斜坡	平缓层状体坡 $\alpha=0\sim\pm\varphi$	$\alpha<\beta$	蠕滑—压致拉裂	平推式滑坡、转动型滑坡
	缓倾外层状体坡 $\alpha=\varphi_r\sim\varphi_p$	$\alpha\approx\beta$	滑移—拉裂	顺层滑坡或块状滑坡
	中倾外层状体坡 $\alpha=\varphi_p\sim 40^\circ$	$\alpha\geq\beta$	滑移—弯曲	顺层一切层滑坡
	陡倾外层状体坡 $\alpha=40^\circ\sim 60^\circ$	$\alpha\geq\beta$	弯曲—拉裂	崩塌或切层转动型滑坡
	陡立—倾内层状体坡 $\alpha>60^\circ\sim$ 倾内		弯曲—拉裂(浅部) 蠕滑—拉裂(深部)	崩塌,深部切层转动型滑坡
	变角倾外层状体坡 上陡下缓 $\alpha>\varphi_r$	$\alpha\leq\beta$	滑移—弯曲	顺层转动型滑坡
III 块体状斜坡	可根据结构面组合线产状按 II 类细分		滑移—拉裂多见	
IV 软弱基座体斜坡	平缓软弱基座体斜坡	通常上陡下缓	塑流—拉裂	扩离、块状滑坡
	缓倾内软弱基座体斜坡			崩塌,转动型滑坡(深部)

注: φ_r 和 φ_p 为软弱面的残余摩擦角和基本摩擦角, α 为软弱面倾角, β 为斜坡坡角。

马惠民(2006)等人认为顺层岩质高边坡破坏模式与其坡体结构密切相关,提出的 5 种顺层边坡坡体结构所对应的破坏模式如下。

(1)顺层老滑坡的典型坡体结构。此类边坡的失稳破坏模式是沿既有滑带失稳滑移,如果在开挖范围内存在多层由层间错动带弱化形成的泥化夹层时,高边坡还可能产生多层多级滑动破坏。

(2) 炭质页岩夹层边坡的典型坡体结构。该类边坡的稳定性受炭质页岩夹层控制,在工程影响下的稳定性一般较差,可能的失稳破坏模式为砂、泥岩岩体依附炭质页岩夹层产生滑动。

(3) 泥化夹层边坡的典型坡体结构。该类边坡在工程影响下的稳定性一般较差,可能的失稳破坏模式为坡体沿泥化夹层形成贯通滑带,产生滑坡。

(4) 砂泥岩互层边坡的典型坡体结构。该类边坡的稳定性取决于岩层倾角和节理裂隙的发育程度,可能的失稳破坏模式为在工程影响下沿厚层砂岩底的错动带形成滑带。

(5) 覆盖层边坡的典型坡体结构。该类高边坡的稳定性一般较差,可能的失稳破坏模式为覆盖层沿下伏基岩顶面下滑。

这些成果深化了坡体结构的概念,为建立与坡体地质条件更为一致的坡体稳定性分析模型,提供了较好的途径和方法。

二、顺层岩质边坡稳定性分析

目前,国内外对于顺层边坡的稳定性分析,主要采用理论计算法和工程地质类比法。前者属于定量分析,主要包括极限平衡法和数值分析法,后者属于定性分析,其优点是能综合考虑各种影响因素,可快速地对边坡的稳定状况及其发展趋势作出评价,但需要分析人员具有丰富的实践经验。

极限平衡法由于使用简单、物理意义相对比较清晰,在实际工程中得到了广泛应用。目前很多商用程序,如加拿大 GEO-SLOPE 系列的 SLOPE、Rock Science 公司的 SLIDE、国内的 STAB 等都是基于极限平衡法开发的。采用此方法进行顺层岩质边坡稳定性分析时,目前最大的难点是如何正确确定顺层坡体的失稳范围、滑移面的位置及其抗剪强度参数。

数值计算方法在岩土工程中发展很快,并广泛用于工程实践。很多数值计算方法都可用于顺层边坡的稳定性分析,例如有限元法(FEM; Finite Element Method)、边界元法(BEM; Boudary Element Method)、无限元法(IEM; Infinite Element Method)、离散元法(DEM; Distinct Element Method)、刚体有限元法(RFEM; Rigid Finite Element Method)、数值流形元法(NMM; Numerical Manifold Method)、无单元法(EFM; Element-free Method)、快速拉格朗日分析法(FLAC)及各种耦合分析法。在这些方法中,有限元法凭借其宽广的适用范围,取得了良好的效果。同时也开发出了许多通用软件(如 ABAQUS、ADINA、ANSYS、MARC、NAS-TRAN 等)和岩土工程专用软件(如 GEO-SLOPE、PHASE2、PLAXIS、2D/3D-SIGMA 等)。但是有限元法也存在很多缺点,如前处理工作量大,尤其是在对复杂结构进行三维分析时,难度较大;难以进行任意路径的开挖计算等。为了能使用有限元方法模拟岩体软弱夹层的控稳作用,相继提出了各种模拟岩体不连续性的简单力学元件或薄层、界面单元,常见的有:有厚度的薄(夹)层单元、无厚度的节理单元和联结单元以及接触摩擦单元。这些单元的引用,使得有限元法可以对那些起控稳作用的长大结构面进行重点模拟,其不足之处为:只能对已知的结构面进行模拟计算,而对新生成的破裂面却无法计算;参数选取的经验有待进一步积累;在计算域内,这类单元数量不能太多,否则会导致求解时间过长或者不收敛。通过有限元计算,可以得到整个边坡的应力应变场,在对应力应变场分析后,可以对边坡的稳定性进行评价。然而在工程实践中,大部分工程师仍习惯使用安全系数对边坡的稳定性进行快速评价。为此,Zienkiewicz(1975)提出了边坡安全系数的一种新的定义方式,即可将安全系数(FOS)定义为:将岩

土体抗剪强度进行折减,使边坡刚好达到临界破坏时所需抗剪强度折减的程度。潘家铮(1980)对此定义进行了分析,并指出了它的合理性。由此发展而来的有限元强度折减法在分析边坡稳定性中显示出了强大的优势,国内外众多学者都对此进行了研究,并取得了大量的研究成果,为边坡稳定性分析开辟了新的途径。

此外,模型试验和现场试验是认识边坡变形破坏机理的有效手段,尤其是模型试验在实际工程经常被采用。现场试验是最能够直观和准确反映实际情况的方法,但是由于花费巨大而且周期较长,一般只在重大工程或个别典型工点中使用。对于大型岩质边坡稳定性的研究,模型试验是各种方法综合研究中不可缺少的一个方面。它的优点是紧密结合具体工程的实际条件,能够考虑到在数学力学计算分析中难于考虑的某些重要因素,并在具备相应的试验技术和试验设备的条件下,获得较为满意的结果,还可以比较可靠地用于指导工程实践。

综上所述,为了正确评价顺层边坡的稳定性,许多学者从不同角度采用不同方法进行了研究。在研究方法上,从室内物理模型试验到原位原型试验、从定性到定量、从各类理论解析法到数值计算方法越来越多样化,也越来越先进。但是在实际工程中较为常用、且通常认为较为可靠的方法仍是模型试验法或是现场试验加上数值分析法。由于岩体工程的复杂性,模型试验法和数值分析法的综合应用就显得尤为重要。

三、顺层岩质边坡防治技术

目前顺层岩质边坡加固防护措施主要有:普通抗滑挡墙、抗滑桩、预应力锚索抗滑桩、预应力锚杆(索)(框架、地梁、格子梁和锚墩)、桩板墙、锚杆(索)加固、注浆加固等。这些加固防护措施必须与坡体的地质条件、坡体变形规律和施工工序等相适宜,方可达到预期的目的。同时应在充分考虑高边坡应力变化规律的前提下,对各种结构物进行合理配置。必要时,还应考虑采用如下组合结构。

1. 桩—锚组合结构

顺层高边坡加固工程采用“分级开挖、逐层加固”的原则,下部一般采用抗滑桩或预应力锚索抗滑桩,上部采用预应力锚索。当施工开挖到最后一级边坡时,高边坡处于最危险状态,坡脚处形成较大的应力集中,若施工脱节,或机械化大拉槽施工,或挡墙开挖、砌筑工期过长等,都可能引起高边坡的失稳破坏,并破坏已有加固工程。为此应采用桩—锚组合结构,即当施工剩余最后一级边坡时,先施作抗滑桩,再进行桩前路槽开挖,这样可预防大变形的产生。此种组合结构尤其适合高大顺层边坡和可能多层多级滑动的顺层路堑边坡。

2. 墙—锚组合结构

当顺层切坡不高时,可在坡脚处以挡墙进行防护,挡墙以上坡面采用预应力锚索框架(地梁)或长锚杆框架加固。此种结构切忌在施作挡墙时全断面拉槽开挖,并要求快速施工,以防边坡长期松弛。

3. 桩—桩组合结构

对于顺层坡而言,当切坡后顺层推力过大时,可采用两排或多排桩进行加固;当顺层滑坡滑体较长、滑坡推力较大、滑坡有可能从边坡的半腰剪出时,也可采用桩—桩组合结构。一般采用桩—桩组合结构,即由上而下在滑坡体上布置两排抗滑桩,上排桩抵挡后级滑坡推力,下

排桩稳定前级滑坡。

4. 顺层清方—桩(锚)组合结构

当边坡由上陡下缓、软硬相间的顺倾岩层组成时,开挖后边坡可能产生挤出型或旋转型滑动。由于此类滑坡推力主要来自坡体后部,因此一般后部采用顺层清方减重,这样可大大减小滑坡推力;前部利用抗滑桩或预应力锚索框架(地梁)支挡。

此外,还应做好防排水工程。水是影响顺层岩质路堑边坡稳定性的重要因素,因此应设法尽量减少地表水向边坡岩体渗透,并排出边坡岩体中的地下水。一般应在顺层边坡影响范围外侧及堑顶外设置截水天沟,使地表水在流进坡面张裂隙之前就被排走。同时,还应使用黏土、砂浆等对地表张裂隙进行封闭,并使边坡顶面有一定的排水坡度,不让水在地面停留,避免水沿裂隙渗入坡体。当地下水较发育时,可在边坡设水平排水孔,降低地下水位,以减小静水压力。

综上所述,由于顺层岩质边坡广泛存在于各类工程建设中,人们对它的研究也做了较多的工作,并取得了一些成果。但是由于这类边坡工程地质条件复杂、致灾机理多样化,坡体力学性质表现出极大的非线性和不连续性,导致这类边坡工程的设计和施工仍然是工程技术人员面临的难题。目前,人们广泛关注的、并且还需要进一步加以研究解决的问题主要如下。

(1)关于坡体破坏模式的确定。尽管现有成果已提出了一些顺层边坡的破坏模式,但在实际的设计施工中可操作性和可判别性却不强。如何根据地质勘探资料正确确定坡体开挖后可能发生的破坏模式,从而建立与地质资料一致的边坡稳定性分析模型,还需要进一步深入研究。

(2)关于坡体开挖的失稳范围。顺层岩质边坡开挖失稳范围是稳定性分析和支护设计的重要依据,设计时一般是凭设计人员的经验确定。科研院校通常是利用数值分析来研究此范围,也有从大量资料调研出发建立经验公式来计算失稳范围的,例如提出了长大顺层边坡的首段滑移长度计算公式,但是失稳范围与多种因素相关,应该根据坡体的地质特征,按照开挖坡体的应力与变形规律来分析和确定此范围。

(3)关于滑移面及其抗剪强度参数的确定。确定顺层岩质边坡的滑移面是正确进行稳定性分析的关键,但是要想在顺层岩体中的诸多岩层面中正确找出滑移面至今还是尚未得到很好解决的难题。目前,对于结构面抗剪强度参数的确定也提出了一些方法,例如根据室内外测试资料,利用数理统计的方法、参数反算的方法等。但这些方法还存在不足之处,需要进一步加以补充和完善。

(4)关于爆破施工的减振技术。对于顺层硬质岩边坡通常采用爆破施工方法开挖路堑边坡。目前面临的问题是对于具体的顺层岩体,选择什么样的爆破施工方法和爆破工艺,才能使坡体层裂范围、地震效应和坡面性状满足设计要求。

(5)关于顺层边坡设计及顺层坡体的加固技术。对于顺层边坡设计而言,一般采用顺层清方,或清方与顺层坡体加固相结合的处理措施。顺层坡体的加固通常采用以抗滑桩、预应力锚索抗滑桩、桩间墙、桩板墙等桩锚结构为主的加固技术。这些重型支挡结构所需要的钢筋水泥用量大、投资大、机械化程度低、工期长,能否根据坡体地质条件采用轻型支护体系,也是目前尚待研究的课题。