

Security Evaluation Theory and Practice of Similar Soil Slope

类土质边坡的安全性 评判理论与实践

刘春原 高岭 母焕胜 ◎著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

Security Evaluation Theory and Practice of Similar Soil Slope

类土质边坡的安全性评判理论与实践

刘春原 高 岭 母焕胜 著



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

内 容 提 要

本书作者采用理论分析、数值模拟、物理模拟和现场监测等研究手段相结合的方法,对邢汾高速公路全路段 10 处高度大于 30m 的类土质路堑高边坡进行现场勘察和总结分析。利用 ABAQUS、Z_soil、FLAC-2D 和 UDEC 四种软件,分析了类土质路堑高边坡在开挖过程和降雨及地下水渗流条件下应力场、应变场、位移场、塑性区等要素的发展变化过程和影响范围,系统地归纳出该类边坡变形失稳机制,为边坡的防护加固工程提供了理论依据。最后,选取典型类土质路堑高边坡工点就加固工程与岩土的耦合作用机理进行数值模拟研究,并对加固工程效果进行稳定性检算。本书结构体系合理清晰,内容翔实、实用,包含了作者一些新的认识和思路。

图书在版编目(CIP)数据

类土质边坡的安全性评判理论与实践 / 刘春原, 高岭, 母焕胜著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.3

ISBN 978-7-114-12844-8

I. ①类… II. ①刘… ②高… ③母… III. ①高速公路—边坡稳定性—安全评价—研究 IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 041098 号

书 名: 类土质边坡的安全性评判理论与实践

著 作 者: 刘春原 高 岭 母焕胜

责任编辑: 刘永芬

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外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.5

字 数: 400 千

版 次: 2016 年 6 月 第 1 版

印 次: 2016 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12844-8

定 价: 60.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

我国地域辽阔,山区较多,滑坡、崩塌等地质灾害经常发生,据不完全统计,近几十年来,我国基础建设高速发展,平均每年都会出现一次边坡重大崩塌,造成人员伤亡、良田被埋、房屋倒塌等重大经济损失。边坡的变形破坏在对工程活动及人类生产生活带来严重危害的同时,由于边坡破坏会引起不良的地质环境,周围的生态环境可能会因此受到破坏,从而导致生态系统的结构和功能发生严重失调,进而威胁到人类的生存和发展。因此,对边坡的稳定性进行分析研究是非常必要的。而在边坡失稳问题中,由于地形条件复杂多变,地质结构不同,同时周围环境千差万别,类土质路堑边坡的安全和技术等级要求越来越高。类土质边坡是由岩体风化而成,保留或部分继承了原岩的结构面的土体物质或破碎岩体物质构成。因此,对这一具有典型特征的类土质边坡的稳定性进行系统研究,制定出边坡的失稳判据以及加固对策,对边坡设计、施工及加固具有重要意义。

本书采用理论分析、数值模拟、物理模拟和现场监测等研究手段相结合的方法,对邢汾高速公路全路段 10 处高度大于 30m 的类土质路堑高边坡进行现场勘察和总结分析。利用 ABAQUS、Z_soil、FLAC-2D 和 UDEC 四种软件,分析了类土质路堑高边坡在开挖过程和降雨及地下水渗流条件下应力场、应变场、位移场、塑性区等要素的发展变化过程和影响范围,系统地归纳出该类边坡变形失稳机制,为边坡的防护加固工程提供了理论依据。最后,选取典型类土质路堑高边坡工点就加固工程与岩土的耦合作用机理进行数值模拟研究,并对加固工程效果进行稳定性检算。本书结构体系合理清晰,内容翔实、实用,包含了作者一些新的认识和思路。

本书共 6 章,首先,介绍工程的概况、研究目的和技术路线,归纳了研究边坡断面的信息,通过调研和查阅文献统计边坡相关的参数,分析了类土质路堑边坡的变形破坏机理。其次,采用 ABAQUS、Z_soil、FLAC-2D 和 UDEC 四种软件对邢汾高速十个高边坡在开挖卸荷后稳定性进行分析,对比了考虑节理和未考虑节理时对边坡稳定性的影响。然后,用这四个软件分别分析了 10 处高边坡在降雨

及地下水渗流作用下的稳定性,并归纳该类边坡变形失稳机制。最后,选取典型类土质路堑高边坡工点就加固工程与岩土的耦合作用机理进行数值模拟研究,并对加固工程效果进行稳定性对比分析。

本书的编写人员有河北工业大学研究生丁杰、李光、靳莎莎、郭玉莲、刘汉强和方小强,河北省交通规划设计院的孙康、史彦照、冯明月和王晓明。其中,第1章由刘春原、高岭撰写,第2章丁杰、李光、孙康撰写,第3章靳莎莎、郭玉莲、史彦照、冯明月撰写,第4章和第5章由刘汉强、方小强、王晓明撰写,第6章由河北工业大学刘春原、河北省交通规划设计研究院母焕胜撰写,全书由刘春原统稿。

本书的研究成果得到河北省科学技术厅、河北省交通运输厅和河北省住房和城乡建设厅科技计划项目的资助,在此表示衷心的感谢。

感谢河北省沿海高速公路筹建处、河北省张石高速公路筹建处、河北省保沧高速公路筹建处、河北省建筑科学研究院、唐山唐曹高速公路有限公司等单位提供的宝贵资料,同时感谢赵献辉博士在书稿修订、编排、整理和校阅过程中付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,敬请广大读者批评指正。最后,对参考文献的作者和相关网站,致以衷心的感谢!

作 者

2015年6月于河北工业大学

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 工程概况	1
1.2 研究目标与技术路线	3
1.3 工作进度安排	4
第 2 章 类土质路堑边坡变形特征	5
2.1 边坡的类型	5
2.2 参数统计	5
2.3 类土质路堑边坡的变形破坏机理	8
第 3 章 边坡失稳判据及稳定性分析	10
3.1 本构模型及安全判定	10
3.2 基于弹塑性理论有限元分析及失稳判据的研究——ABAQUS	11
3.3 基于多物理场耦合有限元分析及失稳判据的研究——Z_soil	46
3.4 基于差分法分析及失稳判据的研究——FLAC-2D	75
3.5 基于离散元法分析及失稳判据的研究——UDEC	97
3.6 本章小结	118
第 4 章 降雨及地下水渗流的边坡失稳判据及稳定性分析	121
4.1 降雨与入渗分析——ABAQUS	122
4.2 地下水与节理岩体物理场耦合分析——Z_soil	134
4.3 基于差分有限元的降雨分析——FLAC-2D	148
4.4 节理渗流分析——UDEC	165
4.5 本章小结	183
第 5 章 削坡前后数值模拟结果对比分析	185
5.1 第一次现场调查报告及建议	185
5.2 第二次刷坡坡率优化设计说明	193
5.3 第二次现场调查报告及建议	194
5.4 削坡前后边坡稳定的 Z_soil 对比分析	196
5.5 削坡前后边坡稳定的 UDEC 分析	241
第 6 章 结论	272
参考文献	273

第 1 章 概 述

1.1 工程概况

1.1.1 工程地理位置

邢汾高速公路邢台至冀晋界段位于河北省西南部邢台市、邢台县和沙河市境内,连接京港澳高速、二广高速、大广高速及青银高速等干线公路。路线起点位于邢台县以西龙泉寺乡,起点桩号 K39+100,在龙泉寺北侧设龙泉寺互通立交与邢左线连接;向西途经梭儿峪南、白石沟北、前柳峪南,在庞会西北侧跨庞安线及宋家庄川;经花木北、石店南,在茶旧沟东北侧设路罗互通立交与邢左线及平涉线连接;路线继续向西经小戈廖北、牛豆台村南穿越后偏梁,在坡子村东路线偏向西北,经清家沟、桃树坪、驮道、寨子沟路线转向西南进入邢台大峡谷,设大桥跨越贺坪峡,在洺水村西北向西进入省界特长隧道穿越省界,隧道出口位于山西省的拐上村北侧,与邢汾高速公路山西段相接;线路终点为山西省拐上村北侧。

1.1.2 气候气象

本地区属于温带大陆性季风气候,主要特点:四季分明,寒暑悬殊,春旱风大,夏热多雨,秋凉时短,冬寒少雪。年平均气温 13.5℃,一月平均气温-3.4℃,四月平均气温 14.8℃,七月平均气温 26.4℃,十月平均气温 13.5℃。极端最低气温-22.4℃,极端最高气温 41.8℃。年平均降水量 558.7mm,雨量多集中在七、八月份。年平均蒸发量 1948.2mm,年日照 2523h,无霜期 174 天。最大冻土深度 44cm。年平均风速 1.4~1.9m/s,最大风速 21m/s,以东南风频率最高,为 9%。夏季山区常出现暴雨和冰雹。

1.1.3 地形地貌

项目区地处河北省西南部,大部分处于邢台县。此区域位于山西高原与华北平原过渡地带,地势西高东低,坡度较大,从西到东可分为山地、丘陵区两种地形。项目区海拔 255~1822m,最大高差 1500m。按成因和形态组合特征,将勘察区地貌简分为三个地貌类型:构造剥蚀中低山地貌类型、剥蚀丘陵地貌类型以及河谷地貌类型。

1.1.4 地层岩性

项目区的基底地层特点与华北其他地区基本相同。自西向东由老到新有:上太古界阜平

群、五台群深变质岩系构成褶皱基底,第四系沉积。

1) 上太古界(Ar)

(1) 阜平群。分布于项目区中部和东部,组成岩石为各类片麻岩,分为两个组:放甲铺组(Ar_3f):黑云母斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩及斜长角闪岩透镜体。该段下部有石墨、蓝晶石片麻岩,上部有石榴石斜长片麻岩,中上部夹有磁铁角闪石英岩,呈透镜状,规模不大。上段为石榴石斜长角闪岩、角闪白云大理岩及含白云母斜长石白云大理岩,顶部为粗晶白云大理岩。

北赛组(Ar_3b):以遭受不同程度的混合岩化作用的黑云斜长片麻岩为主,偶夹透镜状斜长角闪岩,局部含石榴石。

(2) 五台群。分布于项目区中部和西部。不整合于北赛组之上。由下而上分为两个组:即下部红鹤组,上部石家栏组。

红鹤组(Ar_3h):下段为二云斜长片麻岩、白云大理岩、黑云母片岩、白云母白云大理岩与石英片岩互层。上段为角闪片岩、黑云角闪片岩和斜长角闪片麻岩。

石家栏组(Ar_3sh):岩性以黑云母斜长片麻岩、黑云母角闪斜长片麻岩为主,夹斜长角闪岩、变粒岩和条带状分布的磁铁石英岩。

2) 新生界(Kz)

第四系:第四纪以来曾有较长一段时间本区处于寒冷气候,全新世以来气候变暖,为河流冲积,洪积砂砾石层堆积。

上更新统黄土(Q_3eol):分布于河流高阶地一带,灰白、浅黄色,结构疏松,大孔隙及垂直节理发育,厚度 2~5m。

全新统崩坡积碎石土(Q_4c+dl):分布于中低山山前斜坡一带,岩性主要为块碎石土,分选较差,结构较密实,厚度变化较大,几米到数十米不等。

全新统残坡积碎石土(Q_4el+dl):分布于丘陵、中低山斜坡一带,岩性主要为碎石土,结构较密实,厚度一般变化不大,几米到十几米不等。

全新统冲洪积物(Q_4al+pl):分布于河(沟)谷一带,局部形成不连续的阶地,多具二元结构,上部黄土状粉质黏土,下部卵砾石等,结构较密实,厚度变化较大,几米到数十米不等。

全新统人工堆积物(Q_4ml):为当地采石、采矿、冶炼厂、石料加工厂等人类工程活动形成的废渣等,一般就近堆放,对周围环境景观破坏较大。

1.1.5 地质构造

项目区位于中朝准地台构造单元的中部,所处位置在二级构造单元的山西台隆东缘。

1) 小戈廖断裂

位于宋家峪一小戈廖一带(K58+520),呈北西—南东向延伸,倾向南西,倾角 60° ,为正断层,延伸 12km 左右,该断裂带宽 10~20m。

2) 路罗断裂

沿路罗—蟬房乡展布(ZK62+435、K62+505),呈北西—南东走向,倾向南西,倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$,为正断层,延伸长度大于 18km,断裂带宽度 10~15m。

1.1.6 水文地质状况

项目区为变质岩山区,根据区域资料,沿线地下水划分为松散堆积层孔隙水和基岩裂隙孔隙水两大类。

1) 松散堆积层孔隙水

主要赋存于第四系砂砾石、卵砾石和中粗砂层孔隙中,主要分布在河沟谷,一般为潜水。含水层岩性为残坡积碎石土、冲洪积砂卵石,厚度较小,一般厚 1~20m,主要接受大气降水渗入补给,与沟谷两侧基岩裂隙孔隙水互为转化,向河谷排泄,转化为地表水。水量贫乏,属弱富水区。

2) 基岩裂隙孔隙水

主要赋存于上太古界片麻岩孔隙、裂隙中。其水位埋深悬殊较大,主要受浅部是否有相对隔水层分布影响。区内基岩节理裂隙发育,地下水接受降水补给、运移条件较好,储集条件较差,地下水贫乏,属弱~极弱富水区。

1.2 研究目标与技术路线

1.2.1 研究目标

本书主要采用理论分析、数值模拟、物理模拟和现场监测等研究手段相结合的方法,选取类土质路堑高边坡的典型破坏类型进行分析,具体方法如下:

(1)通过对全路段 10 处高度大于 30m 的类土质路堑高边坡进行现场勘察,归纳分析边坡失稳影响因素。广泛收集路堑高边坡工程资料,在已有边坡变形失稳机制研究成果的基础上,抽象归纳类土质路堑高边坡变形的基本模式,抓住坡体不连续面这一主控因子,着重考虑路堑开挖对边坡失稳的影响,并进行室内物理模拟,初步揭示邢汾高速公路类土质路堑高边坡变形破坏的孕育特征和发展规律。

(2)以目前在土木工程中广泛采用的有限单元法为理论基础,采用较为成熟的岩土工程数值分析软件,建立相应的数值计算模型,对类土质路堑高边坡的典型失稳机制进行数值模拟研究,提出用有限元分析此类边坡时计算误差最小的屈服准则,对类土质路堑边坡中的应力分布规律、破坏机理进行研究。

(3)通过分析类土质路堑高边坡在开挖过程中应力场、应变场、位移场、塑性区等要素的发展变化过程和影响范围,系统地归纳边坡失稳机制,判定以位移突变(或最大塑性应变)和塑性区贯通作为此类边坡破坏准则的合理性,并通过塑性区的发展趋势获得边坡的滑裂面,为边坡的防护加固提供了理论依据。最后得出此类边坡的失稳判据、安全系数和临界位移值。

(4)结合类土质路堑高边坡的失稳机制和稳定性计算,提出相应的边坡加固工程对策,并选取典型类土质路堑高边坡工点就加固工程与岩土的耦合作用机理进行数值模拟研究,并对加固工程进行稳定性检算,对影响边坡安全系数及变形值的几个因素进行分析探讨,对路堑高边坡的现场监测结果进行关联分析。最后依据上述方法和思路,遵循岩土工程反分析的思维

和边坡工程动态设计的理念,提出路堑高边坡稳定性判别准则及支护结构的仿真设计技术方法。

1.2.2 技术路线

研究技术路线如图 1-1 所示。

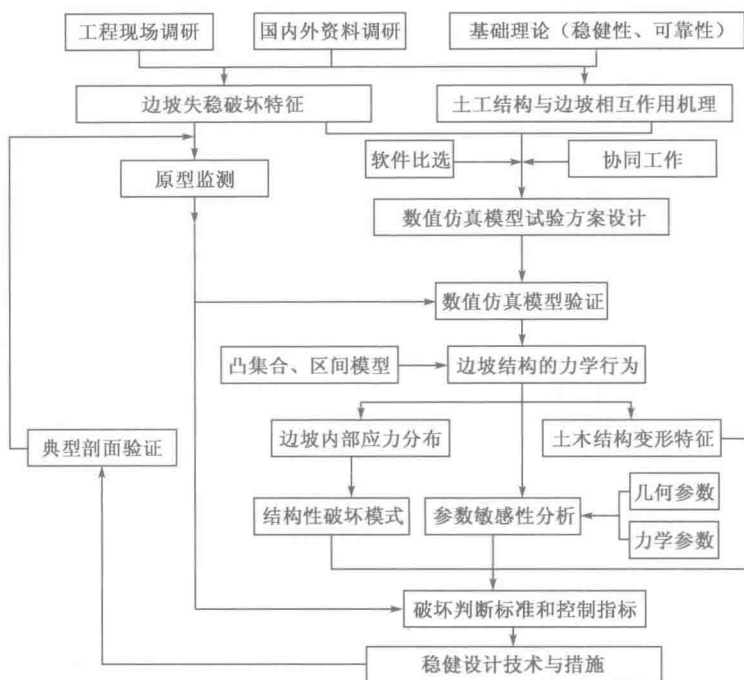


图 1-1 研究技术路线

1.3 工作进度安排

(1)2010 年 6 月~2010 年 9 月:全线路类土质高路堑现场调查,国内外研究资料调研以及其他必要的准备工作。

(2)2010 年 10 月~2011 年 9 月:建立类土质高路堑边坡室内物理模拟模型,完成初步实验分析。建立类土质高路堑边坡数值仿真模型,完成理论分析和数值仿真研究。

(3)2011 年 3 月~2011 年 12 月:典型路段的现场试验和监测研究。

(4)2011 年 10 月~2012 年 3 月:基于室内模拟试验、现场试验和监测数据分析,对理论研究成果加以修正和完善,提出高路堑变形的控制标准和措施,并进行工程应用。

(5)2012 年 4 月~2012 年 12 月:成果整理,撰写报告,鉴定验收。

第2章 类土质路堑边坡变形特征

2.1 边坡的类型

根据边坡土质风化程度不同,类土质边坡可分为以下几类:

- (1)全风化类土质边坡,如图 2-1 所示。
- (2)强风化类土质边坡,如图 2-2 所示。
- (3)中风化类土质边坡,如图 2-3 所示。
- (4)中微风化类土质边坡,如图 2-4 所示。

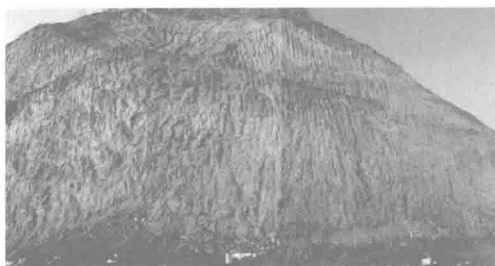


图 2-1 全风化类土质边坡图

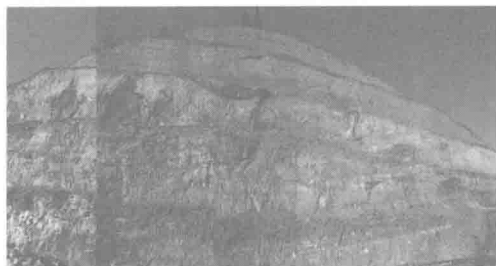


图 2-2 强风化类土质边坡图



图 2-3 中风化类土质边坡图



图 2-4 中微风化类土质边坡图

2.2 参数统计

根据工程地质勘察报告和查询相关文献取得的参考值,本书对工程中边坡各层岩土体的参数值进行了柱状图统计分析,非常清晰地显示了各类参数取值范围,进而确定了各类参数的取值,如图 2-5~图 2-16 所示。

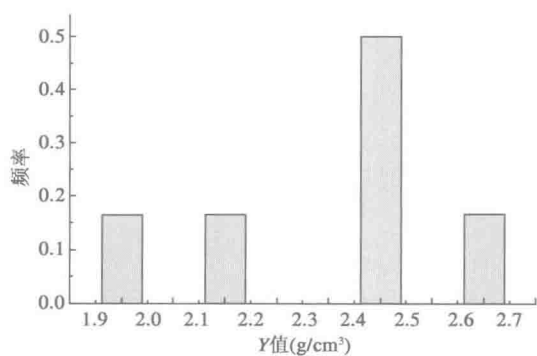


图 2-5 全风化片麻岩密度柱状图

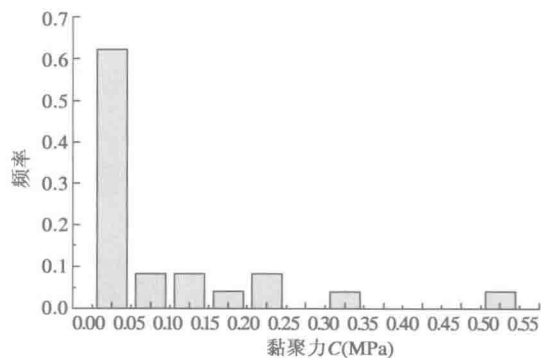


图 2-6 全风化片麻岩 C 值柱状图

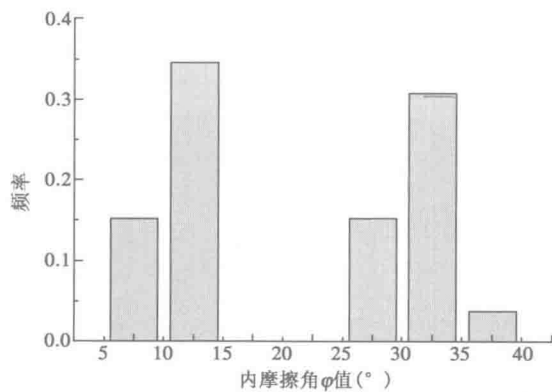


图 2-7 全风化片麻岩 φ 值柱状图

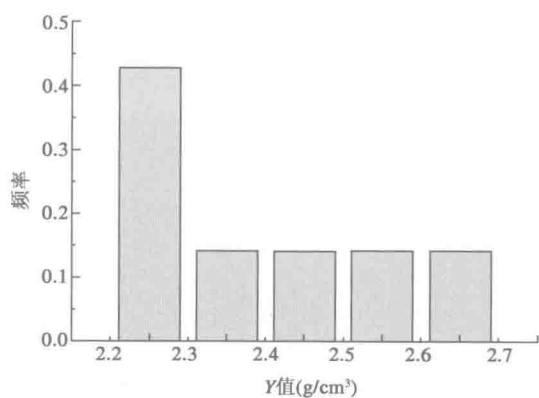


图 2-8 强风化片麻岩密度柱状图

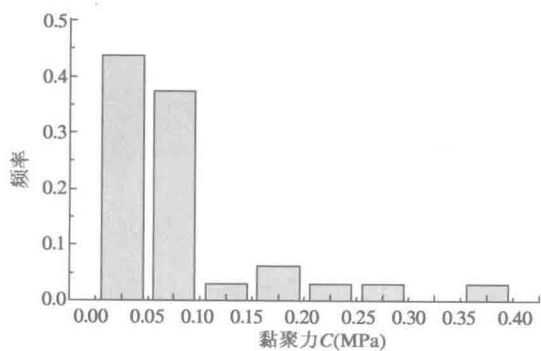


图 2-9 强风化片麻岩 C 值柱状图

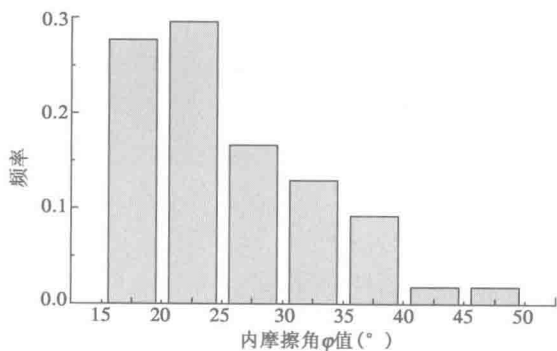


图 2-10 强风化片麻岩 φ 值柱状图

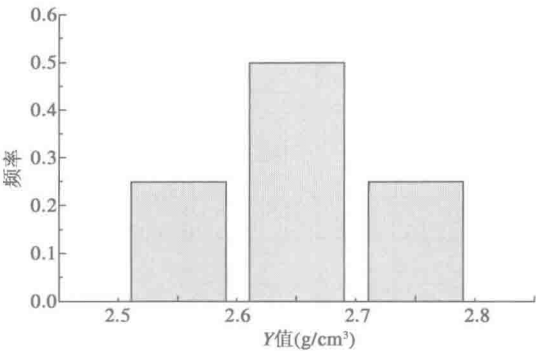


图 2-11 中风化片麻岩比重柱状图

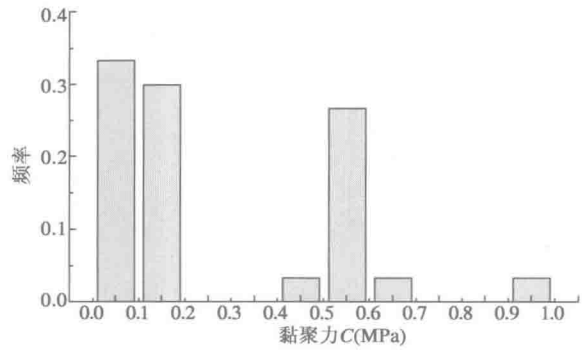


图 2-12 中风化片麻岩 C 值柱状图

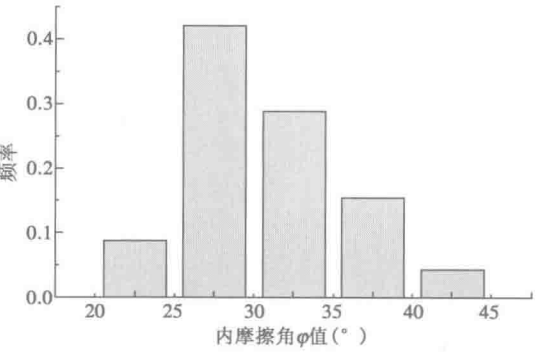


图 2-13 中风化片麻岩 phi 值柱状图

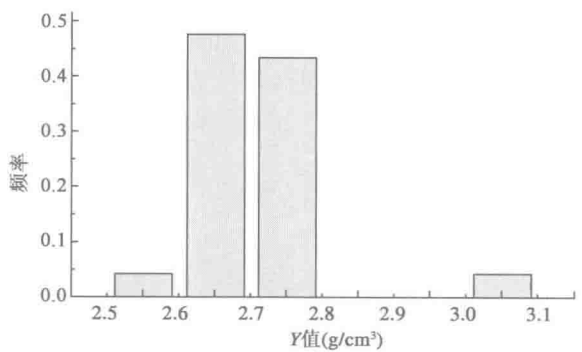


图 2-14 微风化片麻岩密度柱状图

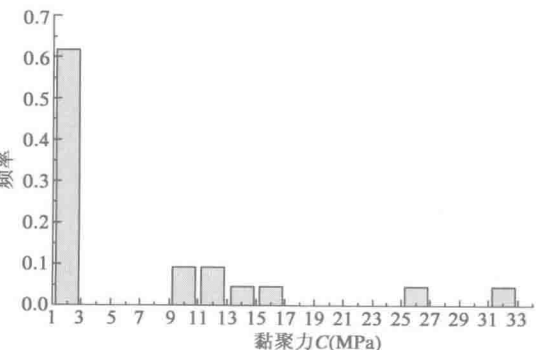


图 2-15 微风化片麻岩 C 值柱状图

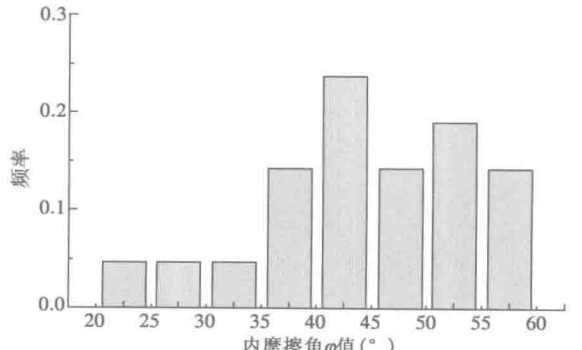


图 2-16 微风化片麻岩 phi 值柱状图

由以上分布规律可以大致确定各风化层的密度、黏聚力、内摩擦角以及弹性模量和泊松比的取值范围,如表 2-1 所示。

参 数 建 议 值

表 2-1

风 化 状 态	密度 $\gamma/(\text{g}/\text{m}^3)$	黏聚力 $C(\text{MPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	弹性模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 μ
全风化	2.4~2.5	0~0.05	10~15	0.0~0.5	0.35~0.4
强风化	2.2~2.3	0.05~0.1	20~25	0.5~1.0	0.35~0.4
中风化	2.6~2.7	0.5~0.6	25~30	1.0~5.0	0.25~0.3
微风化	2.6~2.7	1~3	40~45	10~15	0.25~0.3

2.3 类土质路堑边坡的变形破坏机理

2.3.1 类似均质土的圆弧形破坏

类土质边坡破坏面具有不确定性,当原岩软弱面有利于边坡稳定时,该类边坡又可能以产生均质土边坡的破坏形式,如圆弧形破坏。对于类土质路堑边坡,如不考虑地质不连续面的存在和影响,其坡体变形破裂面一般呈圆弧或似圆弧的形状,如图 2-17a)所示。如该工程右线 YK61+980~YK62+142 位置发生滑坡,如图 2-17b)所示。再如该工程第 13 标段清家沟服务区广场,左广场 K70+000—K70+200 位置发生滑坡,如图 2-17c)所示。

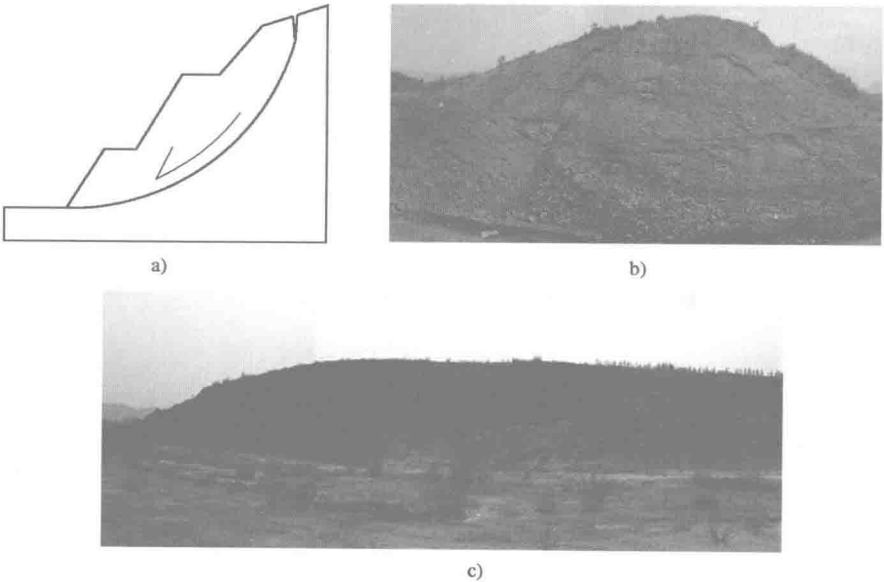


图 2-17 圆弧或似圆弧破坏

2.3.2 平面滑动或折线滑动等沿结构面的破坏

当考虑边坡坡体中风化后仍残留或隐藏的层面、节理时,在软硬相间、互层或间层状的岩脉中,存在一些抗风化能力比较弱的岩体,在形成风化了的类土质边坡后,这些抗风化能力较弱的岩脉一般会成为坡体的软弱夹层。降雨时,对硬质结构面的强度影响很小,但软岩风化后

残留于土中的软弱结构面常常变成地表水在坡体中的渗流通道,这些软弱夹层的充填物一般对水的作用比较敏感,在水的作用下会引起物质软化和泥化等不良地质作用。当发生降雨时,这些软弱结构面在地表水的作用下,力学强度将会大大降低。当这些结构面在边坡开挖过程中出现临空面时,坡体常常会沿着这些结构面发生滑移破坏。这类边坡的破坏与坡高并没有直接关系,其主要取决于边坡临空面与结构面的空间组合,以及软弱面的抗剪强度。此类边坡破坏多发生在雨季,降雨使结构面进一步软化,滑体原有裂隙扩展或产生新裂隙,逐渐解体为滑动块体沿结构面剪出,简图如图 2-18 和图 2-19 所示。

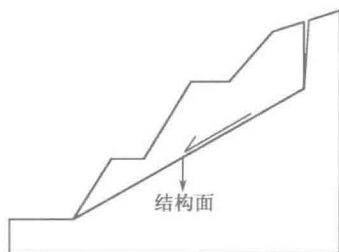


图 2-18 沿结构面的平面型破坏

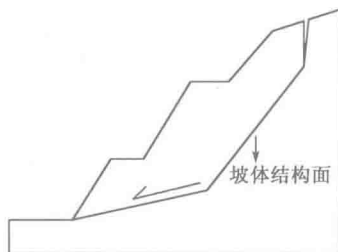


图 2-19 沿结构面的折线型破坏

该工程第 11 标段右线 YGK+535~YGK+640 位置发生滑坡,如图 2-20 所示。

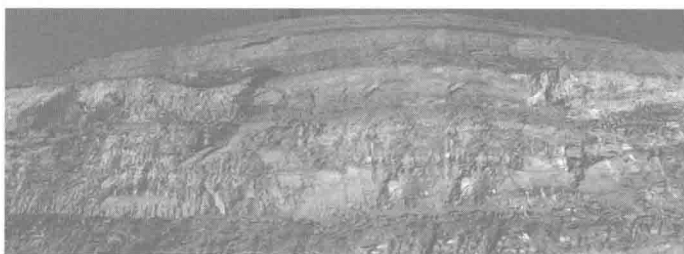


图 2-20 平面型或折线型破坏

第3章 边坡失稳判据及稳定性分析

3.1 本构模型及安全判定

目前,建立弹塑性本构方程依据的理论主要有两种:一种是流动理论,另一种是形变理论。流动理论反映的是塑性应变增量随着瞬时应力改变而与之相对应的值,而形变理论反映的是塑性应变随着瞬时应力改变而与之对应的值,两者的区别主要是塑性应变的选取不同。在荷载作用下,岩土体不同部位可能处于不同的变形状态,当大部分土体仍处于弹性阶段的时候,某部分土体可能提前进入塑性状态,此时,弹性区和塑性区会在岩土体内同时存在。为了计算和分析过程的简便,一般会将岩土体塑性区进行简化设定,最常用的两种简化模型为:①理想弹塑性模型,如图 3-1 所示。②理想弹塑性线性强化模型,如图 3-2 所示。除了这两种常见的简化模型外,根据屈服准则、硬化规律和流动法则的不同假定,还可以构成其他的岩土体本构模型。

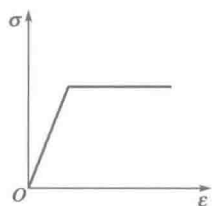


图 3-1 理想弹塑性模型

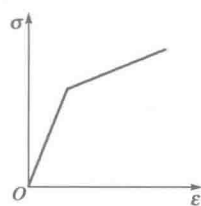


图 3-2 理想弹塑性线性强化模型

强度折减最早由 Zienkiewicz 等提出,是目前在土坡稳定分析中适用性较广泛的一种有限元数值分析方法,它将强度折减技术与有限元方法相结合,在给定的评判指标下,通过调整折减系数对边坡的稳定性进行分析,进而求得边坡的稳定安全系数。强度折减有限元法的基本原理是在外荷载保持不变的情况下,边坡内土体所能提供的最大抗剪强度与外荷载在边坡内产生的实际剪应力之比。降低岩土体强度指标 C, φ , 得到一组新的 C_m, φ_m 值 ($m=1, 2, 3, \dots$), 然后作为新的材料参数代入有限元方程进行试算。且边坡土体符合给定的临界破坏状态判定条件时,且假定边坡内所有岩土体发挥的抗剪强度相同时,这种抗剪强度的折减系数 F_r 相当于传统意义上的边坡整体稳定安全系数 F_s , 在此过程中,弹性模量 E 和泊松比 μ 保持不变。

抗剪强度参数折减以后的表达式为:

$$C_m = \frac{C}{F_r} \quad (3-1)$$

$$\varphi_m = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_r}\right) \quad (3-2)$$

式中: C 、 φ ——土体所能够提供的抗剪强度和内摩擦角;

C_m 、 φ_m ——维持岩土体平衡实际发挥的抗剪强度, 和内摩擦角 $m=1, 2, 3, \dots$;

F_r ——强度折减系数。

由于类土质边坡坡体中存在软弱的结构面, 在大多数情况下类土质边坡的强度主要由软弱结构面所决定, 因此在强度折减稳定分析时, 应考虑软弱结构面强度参数的折减。

边坡稳定分析中边坡失稳判据的研究是弹塑性有限元强度折减法中的一个关键问题, 当前一般用于边坡失稳的判据主要分为三类:

(1) 数值收敛判据: 折减后的土体强度参数使得有限元计算在规定的迭代次数内不能收敛, 即在给定的非线性迭代次数极限值条件下, 最大位移或不平衡力的残差值不能满足所要求的收敛条件, 则认为边坡在所给定的强度折减系数下失稳破坏。

(2) 塑性区判据: 超过某一幅值的广义剪应变或等效塑性应变形成贯通带, 即通过域内广义剪应变等某些物理量的变化和分布来判断, 塑性区从坡脚贯通至坡顶。理论上, 边坡的变形过程总是伴随着一些物理量如塑性区、塑性应变、广义剪应变和应力水平等的出现和发展。当这些物理量达到一定数值时, 边坡失稳。

(3) 位移判据: 边坡坡面特征节点位移突变或根据计算域内某一部位的位移与折减系数之间关系曲线的变化特征确定失稳状态, 如当折减系数增大到某一特定值时, 某一部位位移突然迅速增大, 则认为边坡发生失稳。以边坡某部位或节点位移与折减系数曲线的特征作为判据的优点是具有明确的物理意义。

3.2 基于弹塑性理论有限元分析及失稳判据的研究——ABAQUS

3.2.1 ABAQUS 软件的节理材料模型

ABAQUS 有两个主分析模块 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit, ABAQUS/Standard 用额外的四个模块 ABAQUS/Aqua、ABAQUS/Design、ABAQUS/AMS 和 ABAQUS/Foundation 来解决某些特殊问题。为了解决模型的前后处理问题, ABAQUS 提供了一个能够全面支持计算求解器的图形用户界面——ABAQUS/CAE。此模块中能够进行 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 所需的建模、任务提交以及监控运算过程。

由于岩体强度一般由岩块和结构面决定。当岩体中的结构面不发育时, 岩体的整体性比较强, 岩体的强度主要由岩块决定。当岩体有延结构面破坏的趋势时, 岩体的强度主要取决于结构面的强度。在实际工程中岩体的结构面有多种样式, 有的小到只是细微的裂隙, 有的大到形成断层, 有的有规律分布, 有的无规律分布。我们把有规律的裂隙岩体称为节理岩体。ABAQUS 中提供的节理材料模型, 用于模拟节理岩体。该模型适用于模拟一系列定向平行的节理, 而且要求节理的间距相对于整个边坡而言要足够小, 可以把整个边坡看成一个连续的滑动体。

某一节理 a 的方位由垂直于节理面的法向量 n_a 表示, 如图 3-3 所示, t_{0a} ($a=1, 2$) 为节理面上两个正交向量, 局部应力为作用在节理面上的压应力 p_a 和剪应力 τ_{0a} 为:

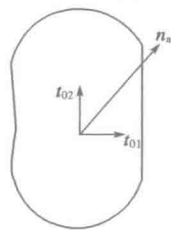


图 3-3 节理方向