

高切坡

防护技术与工程实例

HIGH SLOPE
PROTECTION TECHNOLOGY AND ENGINEERING

徐复兴 练操 钟言 石纲 潘霄 等编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

高切坡防护技术与工程实例

High Slope Protection Technology and Engineering

徐复兴 练操 钟言 石纲 潘霄 等编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内 容 提 要

本书结合三峡库区和丹江口库区的高切坡工程实例,阐述了高切坡的分类与安全等级、高切坡的勘察要点与破坏模式、高切坡的稳定性分析与评价、高切坡治理措施及变形监测设计,其中重点是高切坡工程地质条件和防护技术,同时还介绍了一些当前边坡治理中的新技术。

本书可供从事岩土工程勘察、设计与施工工程的技术人员参考,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高切坡防护技术与工程实例/徐复兴等编著. —武汉:中国地质大学出版社,2017. 5

ISBN 978-7-5625-3969-8

I. ①高…

II. ①徐…②练…③钟…④石…⑤潘…

III. ①三峡工程-滑坡-防护工程-研究

IV. ①P642. 22②TV632. 719

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 292364 号

高切坡防护技术与工程实例

徐复兴 练操 钟言 石纲 潘霄 等编著

责任编辑:徐润英

责任校对:郑 英

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编:430074

电 话:(027)67883511 传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:640 千字 印张:25

版次:2017 年 5 月第 1 版

印次:2017 年 5 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-3969-8

定价:80.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

《高切坡防护技术与工程实例》

编委会

编委会成员（按姓氏笔画排序）

王军怀 王周萼 朱云法 邵中勇 吴蒙蒙

张亚年 李 亮 郑岳琼 易杜靓子

侯 赠 徐 伟 曾 锋 崔亚辉 彭 傲

序

三峡工程库区的地形、地质条件比较复杂，环境容量有限，在大规模移民安置工程的建设过程中，形成了大量类型各异的工程边坡。在此特定工程背景下，这类工程边坡被赋予了一个专门术语——高切坡。我国政府高度重视三峡库区高切坡的防护工作，安排了专项资金，制定了实施规划，采取了有效的防护工程措施，建立了专业监测与群测群防相结合的高切坡监测预警系统。三峡库区移民工程建设十多年来，高切坡防护工作取得了巨大的进展与成果，积累了丰富的经验，为保障移民安置工程的顺利实施及移民的安居乐业发挥了十分重要的作用。

本书的编著者来自水利系统，多年来一直在三峡工程库区和丹江口库区从事地质灾害防治和高切坡防护工程的勘察设计工作，具有很丰富的工程实践经验。本书根据他们近年来从事高切坡治理的工程经验，结合典型的工程实例，系统地介绍了三峡工程库区和丹江口库区高切坡的地质环境、主要类型与变形破坏模式及其主要的防护工程措施，包括锚喷、格构、挡土墙、抗滑桩和桩板墙等，全面反映了我国高切坡防护技术的发展水平。书中对每种技术措施既介绍了设计理论和设计方法，又提供了大量的工程实例可供参考，内容全面，紧扣相关设计规范，对从事边坡治理的工程技术人员有一定的参考价值。

在各行业几代研究者的共同努力下，我国边坡治理水平发展迅速，新理论、新方法和新技术不断涌现，并在工程实践中得到应用。但应看到，与其他的工程领域相比较，边坡工程治理水平仍然比较低，理论上还存在不完善之处，实践中也尚有许多实际问题需要加以解决。边坡工程技术的发展，既要靠科学研究人员的不懈努力，也需大量一线工程技术人员的积极参与。边坡工程是一门实践性很强的专业，只有从大量工程实践中发现问题、解决问题，才能推动技术水平的进步，新理论、新技术也只有经过实践的检验，才能得到不断完善、发展和推广应用。通过此书我欣喜地看到，越来越多从事一线生产的年轻同行投入到这项工作中来，尽管他们不具备高深的理论水平，尽管他们只是新理论、新技术和新方法的应用者，但他们的确是推动边坡工程技术发展不可缺少的力量。我在此特为之作序，祝他们在今后的工作中取得更大的成就。

高占钊

2016年8月于同济园

I

前 言

三峡工程是一项宏伟的民生工程，移民人数和淹没实物量都很大。据统计，截至 2009 年底，库区已累计完成搬迁安置人口 129.64 万人，复建各类房屋 5054.76 万 m^2 。三峡库区在大规模移民安置和工程建设过程中，由于地形、地质条件复杂，难以避免形成大量高切坡，而且当时多数高切坡未及时有效地治理，以致发生了一些高切坡的灾情，给当地移民群众的生命财产安全带来威胁。为此，自 2003 年起国务院组织开展了高切坡防护工程规划勘察设计、安全性评估及治理措施，并展开了高切坡监测预警及科研工作。

南水北调中线工程由从长江干流引水和从汉江丹江口水库引水两部分组成。根据工程具体条件，目前以丹江口水库作为南水北调中线的水源工程。因此，丹江口大坝加高的续建工程增加淹没房屋 479 万 m^2 ，迁移人口 22.4 万人。由于迁建移民用地及交通道路、通讯等基础设施，也涉及到开挖形成的不同类型高切坡问题。

迄今为止，三峡库区和丹江口库区高切坡防护治理工程已基本结束，治理后的高切坡未发生整体失稳。为了更好地推动从事岩土工程的技术人员交流高切坡工程勘察设计和治理方法的经验，水利部长江勘测技术研究所工程地质与岩土工程研究室编写了本书。

本书的基本素材来源于 4 个方面：①编著者参与主持高切坡的勘察、试验研究与施工，获得了丰富可靠的第一手资料；②少数编著者参与高切坡勘察报告的设计评审，吸取了一些专家提供的高切坡工程理论与实践，收集了一些工程的实例；③部分实例引用了长江勘测规划设计研究院、中国科学院地质与地球物理研究所、重庆市万州建筑设计研究院、四川省蜀通岩土工程公司、重庆大学建筑设计院、中国地质大学（武汉）等单位提供的初设报告；④书中基本理论摘引于《建筑边坡工程技术规范》及参考文献。为此，向提供资料的设计单位及参考文献中原作者致以衷心的感谢。

本书的主要内容分为以下两大部分：

1. 高切坡防护工程技术综述

(1) 高切坡类型及安全等级。根据高切坡岩土的组合类型、坡高、结构特征与控制性结构面的组合形式，以及高切坡可能变形破坏模式等因素，将高切坡分为岩质高切坡、岩土质高切坡和土质高切坡，同时阐述了各类高切坡的特点。按高切坡失稳危害程度及引起不良社会影响的严重性，将高切坡防护工程安全等级分为一、二、三级。

(2) 高切坡工程勘察要点。高切坡勘察需查明的主要工程地质问题：①高

切坡地质环境条件,包括地形地貌特征、地层岩性、区域构造稳定性、气象与水文地质条件;②高切坡物质组成及结构特征,包括岩土成因类型、岩体风化程度、岩土体结构类型与结构特征;③岩土体物理力学性质,包括岩土体与结构面物理力学参数试验值与建议值、岩土等效内摩擦角、地基抗力系数。

(3)高切坡稳定性分析与评价。高切坡稳定性分析是在充分查明工程地质条件的基础上,根据切坡岩土类型和结构特征,判断切坡受力边界条件及变形破坏模式,包括圆弧滑动、平面滑动、复合型滑动、逐级滑动、危岩崩塌等,然后提出岩土计算参数,通过岩体结构分析法、极限平衡法和数值分析法等稳定性计算,对切坡进行稳定性分类评价,并预测工程地质因素随时间变化对切坡稳定性的影响。

(4)高切坡防护技术。高切坡防护技术主要有锚喷支护、格构锚固、挡墙支护、抗滑桩与锚索,以及削坡、排水、土性改良及生态护坡等,同时阐述了各类支护加固措施的应用条件与布置原则、设计计算方法、构造与施工要求,并通过大量的工程实例论证了不同的地质条件与地质环境下,按不同的滑坡推力及滑床岩土力学性质而采取不同的治理方案。

(5)高切坡安全监测设计。介绍了监测设计基本原则、监测的主要内容、监测技术手段及监测系统设计、变形监测成果,包括地表及深部变形监测、支护结构受力监测、地下水位与地下水孔隙水压力监测等,同时简要阐述了高切坡稳态趋势预报的基本原理与方法。

2. 高切坡防护工程实例

本书总结了56个实例,论证了在不同地质条件与地质环境下,按不同的滑坡推力及滑床岩土力学性质而采取不同的防护措施,按照治理措施的类型分为以下6个部分:

(1)锚喷支护。喷锚支护有12个实例,多数高切坡为强风化泥岩、粉砂岩与砂岩,无控制性顺坡向软弱结构面,但岩体较破碎,存在局部稳定问题,少数高切坡为全、强风化花岗岩,且风化厚度较大。根据风化厚度和破碎岩体分布部位,确定系统锚杆和随机锚杆及锚杆长度。

(2)格构锚固。该类防护措施有15个实例,高切坡主要为全、强风化花岗岩、强风化黏土岩与粉砂岩、页岩与绢云母片岩及泥灰岩夹灰岩,极少数为粉质黏土与碎石土。岩质高切坡岩体完整性较差,土质高切坡土体较密实,存在局部滑移或整体浅层滑动问题。根据滑移破坏模式、坡高与坡度采用不同格构锚杆类型与锚杆长度。

(3)挡土墙。挡土墙实例有10个,多数高切坡为粉质黏土夹碎石土及黏土岩、泥灰岩与绢云母片岩。根据高切坡破坏模式和推力大小,采用不同型式挡墙,如沿泥岩层面滑动,整体欠稳定,采用锚杆挡墙;土体浅层滑动,推力较

小,采用重力式挡墙;浅层全、强风化岩体圆弧滑动,采用肋板式锚杆挡墙。

(4) 抗滑桩。抗滑桩支护措施实例有 12 个,多数高切坡上部为粉质黏土夹碎石,厚度较大,下部为强风化泥岩及绢云母片岩,沿基岩面发生深层整体滑动,推力大。少数高切坡为粉质黏土与弱膨胀土呈圆弧滑动及泥灰岩内部沿软弱夹层滑动。根据切坡潜在滑移面的深度及推力大小,确定抗滑桩形式,如锚索桩、排式悬臂桩及板桩墙。

(5) 预应力锚索。预应力锚索只举了 3 个实例,高切坡上部为碎石土,下部为强风化粉砂岩夹页岩及泥灰岩,页岩已形成泥化夹层。高切坡沿泥化夹层产生滑动,或沿土体与基岩接触面产生滑移破坏,即整体失稳。锚索的锚固段设置在滑动面以下的稳定岩层中。

(6) 高切坡其他防护措施。该防护措施有 4 个实例,即坡率法、明洞集流槽法和改性土换填法。在高切坡中,粉质黏土夹碎石的坡比为 $1:1.20\sim 1:1.50$;强风化岩体坡比为 $1:1.00\sim 1:1.25$ 。明洞集流槽及钢丝绳拦石网应用于宜昌市至兴山县灵老爷公路明洞旁的碎石土与砂岩夹页岩的规模大的崩滑体中。南水北调中线浙川膨胀土高切坡渠道采用水泥改性土及抗滑桩支挡措施。

本书主要撰写人:前言、1.1、1.2 徐复兴、钟言、潘霄;1.3、1.4 练操、潘霄;1.5、1.6 钟言、徐伟;2.1 徐复兴、练操、王周萼;2.2 石纲、朱云法、彭傲、郑岳琼;2.3 徐复兴、潘霄、徐伟;2.4 吴蒙蒙、侯赠、曾锋;2.5、2.6 王周萼、石纲、张亚年、李亮、易杜靓子、曾锋、崔亚辉

本书由陈德基、高大钊、张庆贺、傅旭东、徐超、李邵军等教授审阅,他们提出了许多宝贵的修改意见,刘特洪教授审阅了全书,高大钊教授为本书作序,特在此向他们致以衷心的感谢和谢意。

编著者

2016 年 11 月

目 录

1 高切坡防护工程技术综述	(1)
§ 1.1 概述	(1)
1.1.1 高切坡问题的提出	(1)
1.1.2 高切坡防护技术重点内容	(1)
1.1.3 高切坡防护技术理论依据	(4)
1.1.4 高切坡的治理效果	(6)
§ 1.2 高切坡类型及安全等级	(6)
1.2.1 岩质高切坡	(6)
1.2.2 岩土质高切坡	(8)
1.2.3 土质高切坡	(8)
1.2.4 高切坡安全等级	(9)
§ 1.3 高切坡工程勘察要点	(10)
1.3.1 高切坡的地质环境条件	(10)
1.3.2 高切坡的水文地质条件	(12)
1.3.3 高切坡的物质组成	(13)
1.3.4 高切坡岩土物理力学参数	(14)
§ 1.4 高切坡稳定性分析与评价	(21)
1.4.1 高切坡岩土失稳破坏模式	(22)
1.4.2 极限平衡分析法	(23)
1.4.3 岩体结构分析法	(29)
1.4.4 有限元法分析	(31)
1.4.5 高切坡稳定性分析方法的工程实例	(34)
1.4.6 高切坡稳定性评价	(36)
§ 1.5 高切坡防护技术	(38)
1.5.1 高切坡支护结构的侧向岩土压力	(38)
1.5.2 锚喷支护	(41)
1.5.3 格构锚固	(44)
1.5.4 挡墙支护	(46)
1.5.5 抗滑桩	(59)
1.5.6 预应力锚索	(67)
1.5.7 高切坡其他防护措施	(69)
§ 1.6 高切坡安全监测设计	(74)
1.6.1 监测设计的基本原则	(74)
1.6.2 监测的主要内容及技术手段	(75)

1.6.3	监测系统设计	(76)
1.6.4	监测成果分析	(78)
1.6.5	高切坡稳态趋势预报	(82)
2	高切坡防护工程实例	(84)
§ 2.1	锚喷支护	(84)
2.1.1	湖北兴山县柏树包高切坡防护工程	(84)
2.1.2	湖北乐天溪镇朱家湾高切坡防护工程	(91)
2.1.3	湖北兴山县游家河高切坡防护工程	(96)
2.1.4	重庆丰都县丰华高切坡防护工程	(101)
2.1.5	重庆丰都县乌龙村高切坡防护工程	(106)
2.1.6	湖北宜昌太平溪镇高切坡防护工程	(111)
2.1.7	湖北郧西县安沟北高切坡防护工程	(117)
2.1.8	湖北宜昌夷陵区九四中学高切坡防护工程	(121)
2.1.9	湖北秭归县金狮路高切坡防护工程	(126)
2.1.10	湖北兴山县李家沟大桥桥头高切坡防护工程	(131)
2.1.11	湖北宜昌夷陵区许家冲高切坡防护工程	(137)
2.1.12	湖北兴山县加油站高切坡防护工程	(142)
§ 2.2	格构锚固	(146)
2.2.1	湖北宜昌太平溪镇港口高切坡防护工程	(147)
2.2.2	重庆奉节县南岸朱家湾高切坡防护工程	(152)
2.2.3	湖北十堰市张家湾区黄龙镇李家湾高切坡防护工程	(158)
2.2.4	湖北郧西县安沟南高切坡防护工程	(162)
2.2.5	湖北兴山县坑子高切坡防护工程	(168)
2.2.6	重庆巫山县上升街高切坡防护工程	(173)
2.2.7	重庆巫山县大昌镇高切坡防护工程	(176)
2.2.8	重庆奉节县医院高切坡防护工程	(181)
2.2.9	重庆奉节县三马山高切坡防护工程	(186)
2.2.10	湖北宜昌太平溪村高切坡防护工程	(192)
2.2.11	湖北丹江口徐家院高切坡防护工程	(197)
2.2.12	湖北秭归县迎合路高切坡防护工程	(206)
2.2.13	湖北郧西县天河口高切坡防护工程	(214)
2.2.14	湖北宜昌夷陵区五厢庙村高切坡防护工程	(219)
2.2.15	湖北兴山县北斗小区高切坡防护工程	(222)
§ 2.3	挡土墙	(227)
2.3.1	重庆北岸新城小区双桂路高切坡防护工程	(227)
2.3.2	重庆万州龙宝国家路高切坡防护工程	(232)
2.3.3	重庆万州区五桥百安坝高切坡防护工程	(240)
2.3.4	重庆云阳县 EA2 路高切坡防护工程	(247)
2.3.5	重庆云阳县滨江花园高切坡防护工程	(251)

2.3.6	重庆奉节县古坟包高切坡防护工程	(255)
2.3.7	重庆万州区北滨路高切坡防护工程	(261)
2.3.8	湖北宜昌夷陵区谭家榜高切坡防护工程	(266)
2.3.9	湖北太平溪镇龙潭村高切坡防护工程	(270)
2.3.10	湖北郧西县道场坪高切坡防护工程	(274)
§ 2.4	抗滑桩	(279)
2.4.1	重庆燕美实业公司高切坡防护工程	(279)
2.4.2	湖北郧县尚家河村高切坡防护工程	(286)
2.4.3	湖北郧西县晏家庄高切坡防护工程	(292)
2.4.4	湖北兴山县钟家屋场高切坡防护工程	(297)
2.4.5	重庆云阳县邓祥芝高切坡防护工程	(304)
2.4.6	重庆江南新区南滨路高切坡防护工程	(307)
2.4.7	重庆万州枇杷坪 XO 线高切坡防护工程	(314)
2.4.8	重庆万州枇杷坪驸马高切坡防护工程	(319)
2.4.9	重庆云阳县南溪大道高切坡防护工程	(322)
2.4.10	重庆云阳县姚坪高切坡防护工程	(327)
2.4.11	湖北巴东红石包高切坡防护工程	(331)
2.4.12	湖北十堰变电站高切坡防护工程	(336)
§ 2.5	预应力锚索	(341)
2.5.1	重庆云阳县龙角镇卫生院高切坡防护工程	(341)
2.5.2	重庆奉节县吴家湾高切坡防护工程	(347)
2.5.3	重庆云阳县龙角镇聚龙高切坡防护工程	(352)
§ 2.6	高切坡其他防护措施	(356)
2.6.1	重庆云阳县云阳中学高切坡坡率法	(356)
2.6.2	重庆奉节县耐火材料厂高切坡坡率法	(360)
2.6.3	湖北兴山县灵老爷段公路高切坡明洞集流槽法	(365)
2.6.4	河南淅川膨胀土渠道高切坡改性土换填法	(373)
参考文献		(382)
附录 岩土物理力学指标与材料性能的主要符号		(385)

1 高切坡防护工程技术综述

§ 1.1 概 述

1.1.1 高切坡问题的提出

由于长江三峡工程的兴建,三峡库区在大规模移民安置和工程建设中,特别是在城镇迁建中,由于当地地形条件所限,大部分沿江地区为山区,地形坡度变化大,岩体风化严重,地质条件复杂,开挖形成许多高边坡,称之为高切坡。高切坡系指在三峡库区移民迁建过程中的特定条件下开挖形成的高边坡。2009年南水北调中线水源工程在丹江口大坝的加高及库区移民迁建工程中,也开挖形成一定数量的高切坡。

由于有些高切坡未及时有效地治理,发生了高切坡的灾情,给当地移民的生命财产安全带来了威胁。自2003年国务院三峡工程建设委员会办公室组织各单位系统地开展了高切坡防护工程的规划、勘察设计、防治措施及安全性评估,对已经实施工程治理的1462处高切坡,为了保证其安全性,由专业技术单位进行了高切坡防护工程质量和效益安全性评估,并开展了高切坡预警及科研工作,使高切坡工程有序地实施勘察设计和防护措施。

2005年国务院三峡办组织技术力量开展了《三峡库区三期地质灾害防治规划》(高切坡防护)中的1270处尚未治理的高切坡的防护工程的地质勘察和初步设计工作。迄今为止,三峡库区高切坡防护治理工作已基本结束。为了更好地交流高切坡工程勘察设计和治理方法的经验,将高切坡防护工程中有关技术规定及加固防护措施作以阐明。

1.1.2 高切坡防护技术重点内容

本书的主要内容分为两大部分:高切坡防护工程技术综述和高切坡防护工程实例。

1.1.2.1 高切坡防护工程技术综述

1.1.2.1.1 高切坡的类型和安全等级

根据高切坡岩土的组合类型、坡高、结构特征与控制性结构面的组合形式,以及高切坡的可能变形破坏模式等因素,将高切坡分为岩质高切坡、岩土质高切坡和土质高切坡。

(1) 岩质高切坡。根据岩体结构特征,岩质高切坡可分为块状结构岩体高切坡、平缓层状结构岩体高切坡及存在优势外倾结构面的岩体高切坡。

(2) 岩土质高切坡。根据岩层产状与切坡坡向、坡角的关系,岩土质高切坡可分为切岩层层面的高切坡和顺基岩面或层面的高切坡。

(3) 土质高切坡。根据物质组成,土质高切坡可分为散体型高切坡和破碎型高切坡。

按高切坡失稳危害程度及引起不良社会影响的严重性,将高切坡防护安全等级分为很严重、严重和较严重三个等级。

1.1.2.1.2 高切坡工程勘察要点

(1) 环境地质。包括地貌特征、地层岩性与分布特点、区域构造稳定性及地震参数、气象条件及水文地质条件(包括地下水位、出水点、岩土透水性、孔隙水压等)。

(2) 物质组成及其组合特征。包括岩土成因类型、岩土的结构特征、岩体软弱夹层及控制性结构面、岩体风化程度及裂隙发育程度。

(3) 勘察范围和勘探深度。勘察范围和勘察深度根据岩体破坏规模和破坏模式以及支挡结构类型确定,对于可能沿土体内部呈圆弧破坏的土质高切坡不应小于1.5倍坡高;对可能沿岩土界面滑动的土质高切坡,后部要大于可能的后缘边界,前缘应大于可能的剪出口位置。勘探点深度应进入最下层潜在滑面1~2m,对于重力式挡墙、扶壁式挡墙和锚杆挡墙可进入持力层2~3m,对于悬臂桩进入嵌固段深度宜为悬臂长度的 $1/2 \sim 2/3$ 。

(4) 岩土物理力学性质。包括岩土体、滑移面和结构面的抗剪强度参数、岩土承载力、变形模量、基底摩擦系数及锚固体黏结强度、岩土等效内摩擦角及地基抗力系数等,并提出不同岩土类型及安全等级的试验方法和取值原则、岩土体和结构面的计算参数。

1.1.2.1.3 高切坡稳定性分析与评价

(1) 岩土失稳破坏模式。包括圆弧滑动、平面滑动、折线滑动及危岩体崩滑等。判断切坡的可能破坏方式时应同时考虑到受岩土体强度控制的破坏和受结构面控制的破坏。

(2) 稳定性分析方法。对土质高切坡、极软岩高切坡、破碎或极破碎岩体高切坡进行稳定计算时,可采用圆弧滑动的简化毕肖普法;对于沿结构面滑动的稳定性计算,应根据结构面形态采用平面滑动法计算或折线形滑动的传递系数法隐式解;对于结构复杂的岩质高切坡,可配合采用赤平投影法和实体比例投影法;对高切坡破坏机制复杂,且安全等级为一级的高切坡,可采用数值分析法。

(3) 稳定性分类评价。根据《建筑边坡工程技术规范》对高切坡进行稳定性分类评价,并按稳定性系数的大小分为稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定4种。

1.1.2.1.4 高切坡防护技术

高切坡防护技术主要有锚喷支护、格构支护、挡墙支护、抗滑桩及锚索,以及削坡、排水、土性改良及生态护坡等,同时阐述了各类支护加固措施的应用条件与布置原则、岩土侧向压力的计算方法、各类支挡结构的设计计算方法和基本理论、构造与施工要求。

1.1.2.1.5 高切坡安全监测设计

介绍了监测设计基本原则、监测的主要内容、监测技术手段及监测系统设计、变形监测成果,包括地表及深部变形监测、支护结构受力监测、地下水位与地下水孔隙水压力监测等,同时简要阐述了高切坡稳态趋势预报的基本原理与方法。

1.1.2.2 高切坡防护工程实例

本书总结了56个实例,论证了在不同地质条件与地质环境下,按不同的滑坡推力及滑床岩土力学性质而采取的不同防护措施,按照治理措施的类型可分为以下6个部分。

1.1.2.2.1 锚喷支护

根据工程地质条件和工程特殊性而采用不同的治理方案。对于无顺坡向滑移结构面的岩质高切坡,当岩体为全强风化或弱风化,且完整性较差时,为防止高切坡表浅层岩块崩落,减缓风化作用,可采用素喷混凝土、挂网喷混凝土。对于岩体较破碎的岩质高切坡,局部存

在不稳定块体崩滑,为增强其整体稳定性,可采用系统锚杆或随机锚杆进行支护。

在锚喷支护的 12 个工程实例中,多数高切坡为强风化泥岩、粉砂岩与砂岩,无控制性顺坡向软弱结构面,但岩体破碎,存在局部浅层稳定问题。少数高切坡为全、强风化花岗岩,呈砂状与碎块状,且风化厚度较大。

1.1.2.2.2 格构锚固

对于岩体完整性较差的强风化或弱风化岩质高切坡,或结构较致密的土质高切坡,根据岩体破碎程度、坡高和潜在滑面位置的深浅情况,分别选用混凝土或钢筋混凝土格构锚固。

在格构锚固的 15 个工程实例中,高切坡主要为强风化黏土岩与粉砂岩、页岩、绢云母片岩、泥灰岩夹灰岩及全强风化花岗岩,极少数为较密实粉质黏土与碎石土。高切坡存在浅层滑动问题。

1.1.2.2.3 挡土墙

根据具体情况可采用重力式挡土墙、俯斜式挡土墙、仰斜式挡土墙、直立式挡土墙和衡重式挡土墙。当下滑力较大时,挡墙与锚杆支护结构联合使用。

在挡土墙支护的 10 个工程实例中,多数高切坡为粉质黏土夹碎石、强风化泥岩、绢云母片岩及泥灰岩。根据高切坡破坏模式和主动土压力大小,采用不同型式的挡土墙。例如:实例 2.3.1AB 段,坡高 12m,在暴雨工况下切坡处于基本稳定状态,采用衡重式挡土墙;实例 2.3.5AB 段为土质高切坡,坡高约 17m,主动土压力为 2531kN/m,采用扶壁式挡土墙;实例 2.3.6 土体可能沿基岩面产生滑动,下滑力较大,采用锚杆式挡土墙。

1.1.2.2.4 抗滑桩

对于岩土质混合高切坡或土质高切坡,当潜在破坏面埋深不大,且有可靠的持力层时,可考虑采用抗滑桩支挡结构;当下滑推力较大时,抗滑桩可与预应力锚索结合使用,有时可选用桩墙复合支挡结构。

在抗滑桩支护的 12 个实例中,多数高切坡上部为粉质黏土夹碎石,厚度较大,下部为强风化泥岩及绢云母片岩,沿基岩面发生整体滑动。少数高切坡沿泥灰岩内部软弱夹层产生深层滑动,推力大,因此采用抗滑桩与锚索相结合的治理方案。

1.1.2.2.5 预应力锚索

当边坡高陡,破坏面埋深较大,不具备削坡条件时,可采用预应力锚固支护措施;当下滑力较大时,可采用预应力锚索支护;当下滑力较小时,采用预应力锚杆支护。

在预应力锚杆(锚索)支护的 3 个工程实例中,高切坡上部为碎石土,下部为强风化粉砂岩夹页岩及泥灰岩,页岩已形成软弱夹层,部分泥化。高切坡沿基岩面或软弱夹层可能产生滑动,整体欠稳定。

1.1.2.2.6 其他防护措施

其他防护措施有坡率法、明洞集流槽法和改性土换填法。

(1) 坡率法。用于工程场地有放坡条件,且无不良的地质作用,同时根据高切坡岩土的变化情况按不同坡率放坡。在工程实例中,粉质黏土夹碎块石的坡比为 1:2.0~1:1.50;强风化岩体坡比为 1:1.00~1:1.25。

(2) 明洞集流槽法。应用于宜昌市至兴山县灵老爷公路段,其内侧存在规模较大的崩滑体,崩滑体体积约 $5.0 \times 10^4 \text{m}^3$ 。经半路堑深基础明洞结构设计和钢绞绳拦石网措施,解决了崩滑体问题。

(3) 改性土换填法。对膨胀土高切坡常用水泥土或灰土换填,在南水北调中线工程淅川段,根据膨胀土类别而采用不同换填厚度,即弱膨胀土换填厚度为1.0~1.5m,中膨胀土换填厚度为1.5~2.0m,强膨胀土换填厚度为2.0~2.5m。同时当渠坡坡高较大时,在一级马道处设计一排抗滑桩支挡。

1.1.3 高切坡防护技术理论依据

1.1.3.1 勘察设计的规范和规定

高切坡防护工程主要规范与规定如下:

- (1) 《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013);
- (2) 《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001);
- (3) 《水利水电工程地质勘察规范》(GB50487—2008);
- (4) 《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002);
- (5) 《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010);
- (6) 《岩土锚固与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB50086—2001);
- (7) 《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008);
- (8) 《砌体结构设计规范》(GB50003—2001);
- (9) 《室外排水设计规范》(GBJ14—87);
- (10) 《工程岩体分级标准》(GB50218—94);
- (11) 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001);
- (12) 《土工试验方法标准》(GBT50123—1999);
- (13) 《工程岩体试验方法标准》(GBT50266—1999);
- (14) 《工程测量规范》(GB50026—93);
- (15) 《三峡库区高切坡防护工程地质勘察与初步设计技术工作要求》(2005年)。

在上述规范与规定中明确指出了高切坡工程分类与安全等级、高切坡工程勘察要求、岩土试验方法与取值原则、高切坡稳定分析方法与评价、高切坡支护结构上的侧压力计算、各类支护结构设计计算、坡率法的工程经验数据等。

需要说明的是,高切坡工程在《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013)新规范颁布前已实施稳定计算和防护措施,因此有些工程的设计计算公式和参数的选用仍按(GB50330—2002)规范。

1.1.3.2 防护工程的设计计算方法

1.1.3.2.1 不同滑面形态的高切坡稳定性计算方法

(1) 土质或强风化破碎岩体组成的高切坡,滑面呈圆弧状,稳定性计算采用简化毕肖普法。

(2) 沿外倾结构面或岩土界面呈平面滑动,稳定性计算按平面滑动法。

(3) 沿岩体软弱层面或岩土界面呈折线形滑动,稳定性计算采用传递系数法隐式解。

(4) 楔形体的稳定性分析,采用结构面组合的赤平投影分析法,或楔形体沿结构面交线滑动的稳定计算。

1.1.3.2.2 支护结构上的侧向岩土压力

(1) 侧向土压力计算。侧向土压力采用库仑、朗肯土压力计算式求解。在工程实例中,侧向土压力的主要计算方法有以下3种:

1) 假定滑裂面为平面时的高切坡,按侧向土压力计算方法;

2) 高切坡坡面倾斜时,按侧向土压力计算方法;

3) 土中有地下水但未形成渗流时,对砂土和粉土按水土分算原则计算;对黏性土宜根据工程经验按水土分算或水土合算原则计算。

(2) 侧向岩体压力计算。在工程实例中主要有以下3种情况:

1) 沿外倾结构面滑动的切坡侧向岩体主动压力计算;

2) 沿缓倾的外倾软弱结构面滑动的切坡侧向岩体压力计算;

3) 切坡坡面倾斜时,侧向岩体压力及切坡破坏时的平面破裂角计算。

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013)的规定,当有外倾硬性结构面时,侧向岩体压力分别以外倾硬性结构面的参数和以岩体等效内摩擦角按侧向土压力方法计算,取两种结果的较大值;破裂角取外倾结构面倾角和 $45^\circ + \varphi/2$ 两者中较小值。

1.1.3.2.3 挡墙结构设计计算

(1) 锚喷设计。在实际工程中,锚杆设计是先确定钻孔倾斜角及锚杆排间距,就可以按每米块段的侧压力求出单根锚杆的承受力、每根锚杆承受力所需的钢筋截面积及锚固长度。

(2) 格构设计。格构梁内力计算采用弹性地基梁理论,将格构梁锚杆视为弹性支座,两锚杆之间的长度为格构跨度,格构梁超出最边缘锚杆部分为悬臂段。在工程实例中,计算格构梁内力的方法是岩土工程软件FLAC^{3D}的简化算法,它是基于三维的有限差分法的数值分析方法。

(3) 挡墙设计。挡墙设计包括侧向岩土压力计算、挡墙结构内力计算、立柱嵌入深度计算、锚杆计算和构造设计、挡板和立柱及基础设计、切坡变形控制设计、整体稳定性分析。但不同类型的挡墙有不同的设计计算要求。

1) 锚杆挡墙设计包括挡墙结构的内力计算、立柱嵌入深度计算、锚杆抗拔承载力计算。土质边坡结构内力宜按弹性支点法计算。当固定点水平变形较小,且采用“逆作法”施工时,结构内力计算也可按静力平衡法或等值梁法。

2) 重力式挡墙计算通常包括抗滑移验算、抗倾覆验算、地基承载力验算及墙身强度验算。

3) 悬臂式挡墙设计包括墙身内力及配筋计算、地基承载力验算、基础板的内力及配筋计算、抗滑移稳定及抗倾覆稳定验算。

4) 扶壁式挡墙设计包括抗滑移稳定及抗倾覆稳定验算、基础底板强度计算。

在工程实例中,通常采用理正岩土工程软件程序进行设计计算。

(4) 抗滑桩设计。抗滑桩间距的确定是基于平面土拱模型或三维土拱模型的数值分析求得;滑动面以上部分桩身内力,根据岩土侧压力或滑动面推力计算;滑动面以下嵌固段桩身内力,根据地面或滑动面处弯矩和剪力采用地基系数“K”法或“m”法进行计算;桩的嵌固深度,主要是根据地基横向承载力特征值确定。在工程实例中,采用弹性地基抗力系数“m”法或“K”法的理正抗滑桩设计软件进行内力计算和桩身配筋。

桩间挡土板设计方法主要有:①根据桩间岩土体的主动土压力计算;②按土压力乘以

0.7~0.8 折减系数计算；③考虑土拱效应的拟化筒仓法。在实际工程中，通常将作用于挡土板的土压力视为均匀分布，按全部土压力进行设计取值。

(5) 预应力锚索设计。根据切坡剩余下滑力设计锚固力及锚索截面积，并验算地层与注浆间黏结长度及注浆体与锚索体间的黏结长度。

1.1.4 高切坡的治理效果

据初步统计，2014 年 2 月前，三峡库区和丹江口库区约有 3411 个高切坡进行了治理。现场调查表明，高切坡支护措施效果良好，未发现整体失稳迹象。根据湖北三峡库区二期和三期 492 个高切坡的变形监测资料分析，有 75.6% 的高切坡向临空面累计水平位移小于 10mm，10~30mm 占 15.6%，大于 30mm 占 8.8%，沉降量小于 10mm 占 80.8%，高切坡整体稳定。这里需说明的是，高切坡初步设计变形监测点与实际监测点的位置有较大变动，同时变形监测资料收集不全，因此对治理后高切坡稳定性难以作出全面评价。

§ 1.2 高切坡的类型及安全等级

三峡水库高切坡问题是与库区地质灾害防治同时提到重要地位进行勘察研究的，高切坡防护规划专家组根据三峡库区的工程特点和地质环境特性，考虑高切坡及其组合类型、坡高、地质结构，以及高切坡可能的变形破坏模式等因素，将高切坡分为岩质高切坡、岩土质高切坡和土质高切坡，如表 1-1 所示。必须指出，这一分类及划分标准只适用于三峡水库移民工程，以后又推广至丹江口水库加高工程库区移民工程的工程边坡。

表 1-1 高切坡分类

判定条件 高切坡类型		坡高 H (m)	介质及其 组合类型	高切坡结构特征	可能变形 破坏方式
I	I_1	≥ 15	块状岩体或层状岩体	块状岩体，存在不利结构面组合	偶有掉块
	I_2			层状岩体，岩层平缓或反倾，并有内倾结构面	局部塌落
	I_3			存在优势外倾结构面或不同外倾结构面的组合线	存在滑移破坏可能性
II		≥ 10	岩土质	上部为土体，下部为岩体	上部土层可能局部变形或沿基岩面滑动
III		≥ 8	土质（不含松散回填土和弃土）	各类残、坡、洪、冲积物，结构相对均匀	有局部变形或滑动可能性

1.2.1 岩质高切坡

该类高切坡高度 $H \geq 15\text{m}$ ，一般 $H < 50\text{m}$ ，天然坡比大多在 1:0.25~1:0.5 之间。根据岩质高切坡的结构特征，又可分为 3 个亚类。