

GAOYUAN GAOHAN DIQU BIANPO BIANXING POHUAI JIZHI
YU ZONGHE ZHILI JISHU

高原高寒地区 边坡变形破坏机制 与综合治理技术

周志东 陶 然 党永平 著
周春清 王 位 张树军



西南交通大学出版社

GAOYUAN GAOHAN DIQU BIANPO BIANXING POHUAI JIZHI
YU ZONGHE ZHILI JISHU

高原高寒地区 边坡变形破坏机制 与综合治理技术

周志东 陶 然 党永平 著
周春清 王 位 张树军

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

高原高寒地区边坡变形破坏机制与综合治理技术 /
周志东, 陶然, 党永平著. —成都: 西南交通大学出版
社, 2015.6

ISBN 978-7-5643-3966-1

I. ①高… II. ①周… ②陶… ③党… III. ①高原—
寒冷地区—边坡防护—研究 IV. ①TD854.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 132121 号

责任编辑 曾荣兵
装帧设计 墨创文化

出版人: 阳晓

高原高寒地区边坡变形破坏机制与
综合治理技术

周志东 陶然 党永平 著

出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号 610031)
发行电话	028-87600564 028-87600533
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	11.25
字 数	297 千
版 次	2015 年 6 月第 1 版
印 次	2015 年 6 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3966-1
定 价	48.00 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

前言

西藏自治区位于中国青藏高原西南部,地处北纬 $26^{\circ}50'$ ~ $36^{\circ}53'$,东经 $78^{\circ}25'$ ~ $99^{\circ}06'$,属于青藏高原的主体部分。那是一片神奇的土地,有搏击长空的鹰隼,有终年不化的雪山,有一望无际的草地,有荒无人烟的戈壁,有茂密的原始森林,有奔流不息的河流,有肥硕成群的牛羊,有桀骜奔驰的骏马,有络绎不绝的朝拜者……许多人为之膜拜,为之向往。青藏高原平均海拔在 4 000 m 以上,被誉为“世界屋脊”;冰川河流众多,被称为“世界水塔”;对东半球气候影响大,被称为“东半球的气候调节器”。青藏高原几乎是与人类同龄的高原,隆起速度快,受到印度板块和欧亚板块的挤压,也受到太平洋板块的影响,高山峻岭,地质构造复杂,目前已成为全世界地学研究的热点和焦点。然而,西藏地区也是人类聚居地开发程度较低的地区之一,基础设施等建设相对滞后,相关研究工作尚不够深入。

由于西藏地区高寒缺氧、生态脆弱、环境恶劣,人类生存和工作条件差,在客观上阻碍了西藏地区的经济发展。随着国家西部大开发战略的实施,西藏的基础设施建设日益提速,特别是交通能源建设速度日新月异。同时,建设中也出现了不少施工技术与管理问题,其中工程边坡的变形破坏就是比较普遍和典型的工程问题。工程建设过程中,由于多方面的原因,很多边坡出现过变形破坏,加上大多边坡的变形破坏机制很复杂,治理难度大,在一定程度上制约了工程的进展。本次选择“高原高寒地区边坡变形破坏机制及综合治理”做研究,是笔者多年的志向和兴趣。笔者曾先后参加了西藏的部分水利水电、公路、铁路等工程的建设,进行了很多边坡的工程施工与治理,对西藏工程建设中的边坡有了一定的认识,积累了一定的施工经验与治理技术,并在工作过程进行了相关研究,取得了一些成果。

西藏工程建设中所涉及的边坡,具有诸多特点,如独特的大地构造位置、多样的地形地貌、特殊生态与气候环境、多变的岩性组合、中—高地应力、复杂的变形破坏机理、治理难度大等。武警水电三总队在西藏高寒地区进行水利水电等工程的施工过程中,遇见的多数为坡高陡、强卸荷、高开挖、多裂隙、多结构物、坡形多样、环境特殊,岩性多变、机理复杂、治理难度大、寒冻作用明显的边坡。由于多方面的原因,一些边坡出现了变形与失稳问题,从而直接影响了工程的进展。

边坡变形破坏主要有天然边坡变形破坏和工程边坡变形破坏。经研究,笔者认为,西藏的天然边坡变形机理主要有:热融滑塌变形破坏、滑移—拉裂—剪断变形破坏机制、倾倒—破裂变形破坏机制、滑移—弯曲—剪断—溃决变形破坏机制和卸荷—旋转—拉裂变形破坏机制等;人工边坡除天然因素影响外,还受到设计和施工等人为因素的影响,主要变形破坏机制有:开挖—热融

滑塌变形破坏、松动—牵引—开裂—滑塌变形破坏、卸荷—松动—滑塌变形破坏、卸荷—倾倒—溃决变形破坏等。

西藏边坡综合治理,要运用系统原理、层次原理、预防性治理与问题性治理相结合的原理、理论计算与实际相结合的原理、历史动态分析原理、能力最小和经济适用相结合原理、监控与反馈原理、创新原理与临时支护与永久治理相结合的原则等,主要采取主动与被动、深层与浅表层结合的方式进行。施工中尽量采用“四新”技术,开展科技创新,使复杂问题处理简单化、快速化。

本次研究成果在西藏老虎嘴水电站右岸边坡工程和旁多水利枢纽右岸边坡工程的综合治理过程中,得到了较好的应用。可以说,成果对西藏的边坡综合治理具有一定的理论指导价值和实践意义,能为今后西藏类似的边坡施工提供较为全面的参考。由于本次就寒冻作用对边坡岩体影响的研究尚不系统,对寒冻作用的空间分布特征的研究也不够深入,且对边坡变性破坏机制的研究仍有待加强,预防措施的分析还不透彻,所以高寒地区的寒冻作用对岩质边坡影响的问题仍然值得今后进一步加强研究。

在本项工作的研究过程中,笔者得到了各方的关注和帮助,使研究工作顺利进行,并如愿地完成了科研工作。在此,特别致谢:

首先,感谢武警水电部队,特别是水电三总队,为本次研究的完成提供了很好的平台,并且在研究经费等诸多方面予以了巨大的支持。

其次,感谢总队长梁建忠、政委翟从福、前总队长周庆丰、总工王永平、参谋长卢路生、政治部主任孟宪明等,他们从部队建设的长远出发,对研究工作,不遗余力地支持和关心,从科研选题、研究和经费等给予了很大的关心和帮助。同时也感谢单位的其他领导和战友提供的相关帮助。

再次,感谢武汉大学陈益峰教授、刘武博士、蔡新华博士后等,对笔者工作的帮助和生活上的关照;感谢中科院寒区与旱区研究所的马巍所长、俞祁浩研究员、王贵荣主任、陈世杰工程师等在试验研究等方面提供的帮助;感谢中国水电顾问集团西北勘测设计研究院的王文革高工提供老虎嘴水电站相关的资料;感谢成都矿产研究所廖忠礼教高提供了部分西藏的地质资料。

最后,感谢旁多水利枢纽工程项目部和老虎嘴水电站工程项目部的全体官兵在生活和工作方面给予笔者的诸多帮助和支持!

周志东

2015年2月

目 录

1 绪 言	1
1.1 立项依据	1
1.2 拟解决的关键技术难题	5
1.3 研究内容、研究目标及技术路线	5
1.4 可行性分析	6
2 青藏高原高寒地区边坡特征	8
2.1 西藏的地理位置	8
2.2 交通状况	8
2.3 环境特征	9
2.4 地貌气候特征	9
2.5 资源	11
2.6 地质特征	12
2.7 寒冻作用特征	16
2.8 场地特征	26
3 寒冻作用对边坡岩土体的影响	27
3.1 温度应力	27
3.2 冻融作用	28
3.3 裂隙岩体冻融影响分析	37
4 西藏边坡变形破坏机理	39
4.1 天然边坡变形破坏机理	39
4.2 开挖边坡变形破坏机理	52
5 综合治理技术	60
5.1 治理原理	60
5.2 治理需研究的内容与思路	62
5.3 主要的治理手段与方法	64

6	西藏老虎嘴水电站边坡的变形破坏与治理	86
6.1	边坡简况	86
6.2	区域地质	86
6.3	山体及边坡地质情况	89
6.4	开挖前和开挖后边坡稳定性计算与分析	92
6.5	老虎嘴水电站右岸边坡治理手段	118
6.6	施工治理效果	123
6.7	施工后的渗漏情况	146
7	旁多水利工程开挖边坡稳定性分析	147
7.1	概 况	147
7.2	边坡失稳模式分析	150
7.3	边坡稳定性分析	152
8	结 论	171
9	进展及讨论	172
	参考文献	173

1 绪 言

1.1 立项依据

1.1.1 研究依据

边坡的变形破坏是指边坡自身的各要素（边坡的地形地貌、岩土体性质、岩土体结构、受荷历史以及支挡结构物等）在其赋存环境（主要是地应力、地下水、地表水、地壳运动和人类活动等）中的影响和相互耦合作用，边坡稳定状态发生的一系列变化发展过程。根据其成因，分为天然边坡变形破坏和人工边坡变形破坏两大类。

武警水电三总队自 1991 年组建以来，常年在西藏地区承担水利水电工程、铁路工程、公路工程 and 房屋建筑工程等的施工与建设。以水利水电工程为例，根据统计，2011 年以前，西藏 70% 以上的电力供应来自我部承建的水利水电工程。我部先后承担了羊卓雍湖水电站、查龙水电站、满拉水利枢纽、老虎嘴水电站、藏木水电站、尼玛水电站、旁多水利枢纽等 16 个水电站的施工与建设。其主要的边坡开挖工程如表 1-1 所示。

表 1-1 我部主要承担的水利水电工程边坡开挖情况

序 号	工程名称	边坡名称	高度/m	备 注
1	羊卓雍湖水电站	进水口边坡	37	
2	沃卡一级水电站	厂房后边坡	123	
3	沃卡一级水电站	倒虹吸边坡	76	局部变形
4	沃卡一级水电站	许莫大坝右坝肩边坡	45	
5	金河水电站	厂房后边坡	56	
6	金河水电站	坝肩边坡	35	
7	满拉水利枢纽	厂房后边坡	51	
8	直孔水电站	厂房后边坡	76	开挖后变形
9	直孔水电站	导流洞进口边坡	56	开挖后变形
10	藏木水电站	左岸坝肩边坡	148	相邻单位滑塌 3 000 m ³
11	藏木水电站	右岸坝肩边坡	186	
12	老虎嘴水电站	进场公路出口进口边坡	82	变形，局部滑塌

续表

序 号	工程名称	边坡名称	高度/m	备 注
13	老虎嘴水电站	导、泄洪洞出口边坡	82	变形,局部滑塌
14	老虎嘴水电站	厂房后边坡	115	变形,局部滑塌
15	老虎嘴水电站	右坝肩边坡	125	变形,局部滑塌
16	旁多水利枢纽	右岸公路边坡	285	开挖后滑塌 $8 \times 10^4 \text{m}^3$
17	旁多水利枢纽	导泄洞进口边坡	37	
18	阿渴夺水电站	大坝右坝肩边坡	55	
19	狮泉河水电站	大坝边坡	35	
20	查龙水电站	右坝肩边坡	32	
21	尼玛水电站	坝肩边坡	21	
22	普兰水电站	厂房边坡	48	
23	札达水电站	厂房边坡	26	
24	仲巴水电站	左坝肩边坡	31	

上述边坡高度均在几十米到一百多米(见表 1-1),根据水电水利工程中的边坡分类(见表 1-2),从边坡高度看,表 1-1 所列工程边坡基本上属于高边坡或者超高边坡。

表 1-2 水电水利工程边坡分类表[据《水电水利工程边坡设计规范》(DL/T 5353—2006)]

分类依据	分类名称	分类特征说明
成因类型	自然边坡	天然存在由自然营力作用形成的边坡
	工程边坡	经人工改造形成的或受工程影响的边坡
组成物质	岩质边坡	由岩体组成的边坡
	土质边坡	由土体或松散堆积物组成的边坡
	岩土混合边坡	由岩体和土体组成的边坡
坡体结构	顺向坡	层状结构面平行河谷倾向岸外
	反向坡	层状结构面平行河谷倾向岸里
	横向坡	层状结构面与河谷正交倾向上游或下游
	斜向坡	层状结构面与河谷斜交倾向上游或下游
	水平层状坡	层状结构面为水平产状

分类依据	分类名称	分类特征说明
与建筑物的关系	建筑物地基边坡	必须满足稳定和有限变形要求的边坡
	建筑物周边边坡	必须满足稳定要求的边坡
	水库或河道边坡	要求稳定或允许有一定限度破坏的边坡
存在时间	永久边坡	工程寿命期内需保持稳定的边坡
	临时边坡	施工期需保持稳定的边坡
稳定状态	稳定边坡	能保持稳定和有限变形的边坡
	潜在不稳定边坡	有明确不稳定因素存在但暂时稳定的边坡
	变形边坡	有变形或蠕变迹象的边坡
	不稳定边坡	处于整体滑动状态或时有崩塌的边坡
	失稳后边坡	已经发生过滑动的边坡
边坡坡高	特高边坡	坡高大于 300 m
	超高边坡	坡高 100~300 m
	高边坡	坡高 30~100 m
	中边坡	坡高 10~30 m
	低边坡	坡高小于 10 m

根据笔者调查研究,西藏的边坡具有坡形多样、环境特殊,岩体性复杂、地应力高,机理多变、治理难度大等特点。在西藏的水利水电等工程的施工过程中,由于高寒地区的边坡变形破坏诱因与内地存在一定的差别,在多方面因素的影响下,一些边坡出现了变形问题和失稳问题,如直孔水电站厂房后边坡变形问题、藏木水电站左岸边坡失稳问题、老虎嘴水电站边坡变形破坏问题等,均不同程度地直接影响工程的进展。

本次研究主要以我部在西藏已竣工和正在施工的工程项目边坡为立足点,开展边坡的变形破坏特点、机制和治理方式的研究,从实践和理论上分析高寒地区边坡的变形破坏机制和治理对策。

1.1.2 研究意义

我部在西藏高寒地区施工的边坡具有以下特点:

高坡度、坡形多样:由于抬升快,200万~300万年间抬升了2700~3400 m,河流下切作用强烈,形成了西藏地区的河流两岸边坡坡度大,一般呈现“U”字形或者“V”字形河谷,因而形成了坡度大、高度大的边坡,坡度一般为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。

高开挖、强卸荷：由于青藏高原抬升快，造成卸荷作用强烈，对于强卸荷岩体，根据山体情况，一般情况下，重要结构物边坡将强卸荷带全部挖除，但是由于开挖量大，支护量大，施工难度大，所以，坝肩等建筑物布置在边坡上面时往往使得一部分强卸荷带成为开挖边坡的残留部分。

环境特殊、强风化：西藏地区植被相对稀少，岩石裸露，环境日温差和年温差大，紫外线辐射强，一到下午往往风沙大（一般在 5 级以上），冰川发育，岩体受到的冰劈作用等物理化学风化作用强，边坡强风化岩体较为发育。

岩性多变、多裂隙：受到构造运动影响，侵入岩多，变质岩发育，区域内岩性多变。由于岩体原生裂隙、构造裂隙和表生改造裂隙多，裂隙十分发育。一般裂隙组数多，密度大，张开裂隙多，特别是 2~5m 范围内的表层岩体，在表生作用的改造下，表层裂隙发育，往往表现为散体结构。

变形破坏机理复杂、多结构物：变形破坏受到多种因素的影响，加上边坡多结构物，机理复杂。以西藏老虎嘴水电站为例，右岸布置有导流洞、泄洪洞、交通洞、右坝肩和厂房等。开挖后，形成导流洞进口边坡、泄洪洞进口边坡、交通洞出口边坡、右坝肩开挖边坡、厂房后边坡及进厂公路边坡、导流洞（泄洪洞）出口边坡，其中导流洞（泄洪洞）进口边坡为一大型复杂倾倒变形体，整个山体边坡治理难度较大。

寒冻作用强烈：西藏地区气候特殊，平均每年冻融约 180 天，气候对边坡的寒冻作用强烈，导致边坡的物理风化作用明显，寒冻作用突出。

治理难度大：特殊区域地质环境，多特点的山体边坡，很多属于高原高寒地区的复杂边坡，稳定性差，施工条件差，治理难度大。

正是由于上述特征，深入研究西藏高寒地区边坡的变形破坏机制，有效、快捷、经济处理这类复杂的工程边坡，进行综合治理，对西藏地区的水电站等工程的施工建设和营运有至关重要的意义。

1.1.3 研究现状

西藏以独特的魅力吸引着众多学者对其自然景观、地质和文化等进行研究。对西藏高寒地区边坡的研究也有很多研究者进行了很多工作，尤其以公路和矿山边坡的研究居多。主要集中在对边坡的变形破坏模式等方面的研究，特别是研究解决青藏公路和青藏铁路等工程的多年冻土边坡的稳定性与防护等。

其中，边坡寒冻作用作为西藏高寒地区常见的一种地质现象，很多地质工作者于 20 世纪 80 年开始进行研究。例如，朱立平、王家澄、彭万巍、陶兆祥^[3]等于 20 世纪末通过采集青藏公路和中尼公路的岩石样本，进行了寒冻条件下热力作用对岩石破坏的模拟实验。试验表明，寒冷条件下较强的热源辐射可以产生快速的环境温度变化，并导致相应岩体内部温度变化，这种变化幅度可以使矿物产生强烈的胀缩并导致岩石内部结构的破坏。成都理工大学的许强^[2]、武警水电三总队周志东^[19]等认为，世界第三、亚洲第一的西藏易贡山体滑坡的成因，一定程度上与寒冻作用有一定的成因联系，其中冰劈作用和冰雪融化是滑坡形成的重要因素之一。

其他地区类似的研究如：日本学者福田正己（1996）、菊地实吉（1997）、高桥辉明（1997）研究了日本北海道寒冷地区岩石破坏的机理与预防措施。中国的李航、于玲（2011）^[18]等研究了高纬度地区冻融循环作用下路基边坡稳定性变化。罗学东、黄成林、彤增湘、吕乔森等（2011）^[20]研

究了冻融循环作用对蒙库铁矿边坡岩体物理力学特征的影响。王加龙（2011 年）^[21]研究了冻融作用对边坡稳定性影响，并进行了浅析。杨更社、蒲毅彬等（2002）^[22]初步研究了冻融循环条件下岩石损伤扩张。

但是，针对西藏等高寒地区工程边坡变形破坏机制的研究还不够多，研究内容也不太深入，一般对边坡的研究仅局限在冻融作用，没有考虑水、力、热三者的耦合关系。另外，对边坡的综合治理的研究也没有深入，这些方面都值得进一步研究和探讨。

1.2 拟解决的关键技术难题

高寒地区边坡变形破坏由于自身的一些规律，本次主要解决以下问题：

（1）总结归纳边坡的变形破坏类型，主要包括自然边坡和人工边坡的变形破坏类型；

（2）找出高寒地区边坡破坏的原因及影响因素，主要从内因和外因两方面入手，找出影响边坡的主要因素。

（3）针对西藏特定的水利水电工程边坡，初步研究边坡水、力、热的变化规律对边坡的影响。以西藏某个水利水电工程的边坡稳定性为研究对象，在水、力、热三者的耦合作用过程中，研究岩体结构、岩体强度的变化，研究温度应力对岩体的影响，特别是研究岩体细部结构的变化对边坡稳定性的影响，采用数值模拟和物理模拟寒冻作用对水利水电工程边坡的作用过程。

（4）针对边坡变形破坏的规律，提出预防治理措施，真正做到研究与实践的结合。

1.3 研究内容、研究目标及技术路线

主要研究的内容如下：

（1）西藏高寒地区边坡的特点，主要研究西藏所处的特殊的区域地质、地形地貌、气候条件、场地特征等对边坡的影响。

（2）研究边坡变形破坏的类型及其影响因素。

（3）研究冻融等寒冻作用对岩体内部结构的影响。研究裂隙张开、发展的规律；研究饱水状态下岩体裂隙变化的规律；研究不饱水但潮湿状态下的裂隙变化规律；研究干燥状态下裂隙的变化规律；研究温度应力对岩体强度和结构的影响。

（4）研究高寒地区复杂边坡的综合治理措施，特别是采用不同的手段，有针对性地开展综合治理。

研究的目标主要是找出高寒地区边坡的特征和变形破坏规律，从而在工程实践中，针对性地采取综合治理措施，达到人与自然的和谐。

具体的研究思路见图 1-1。

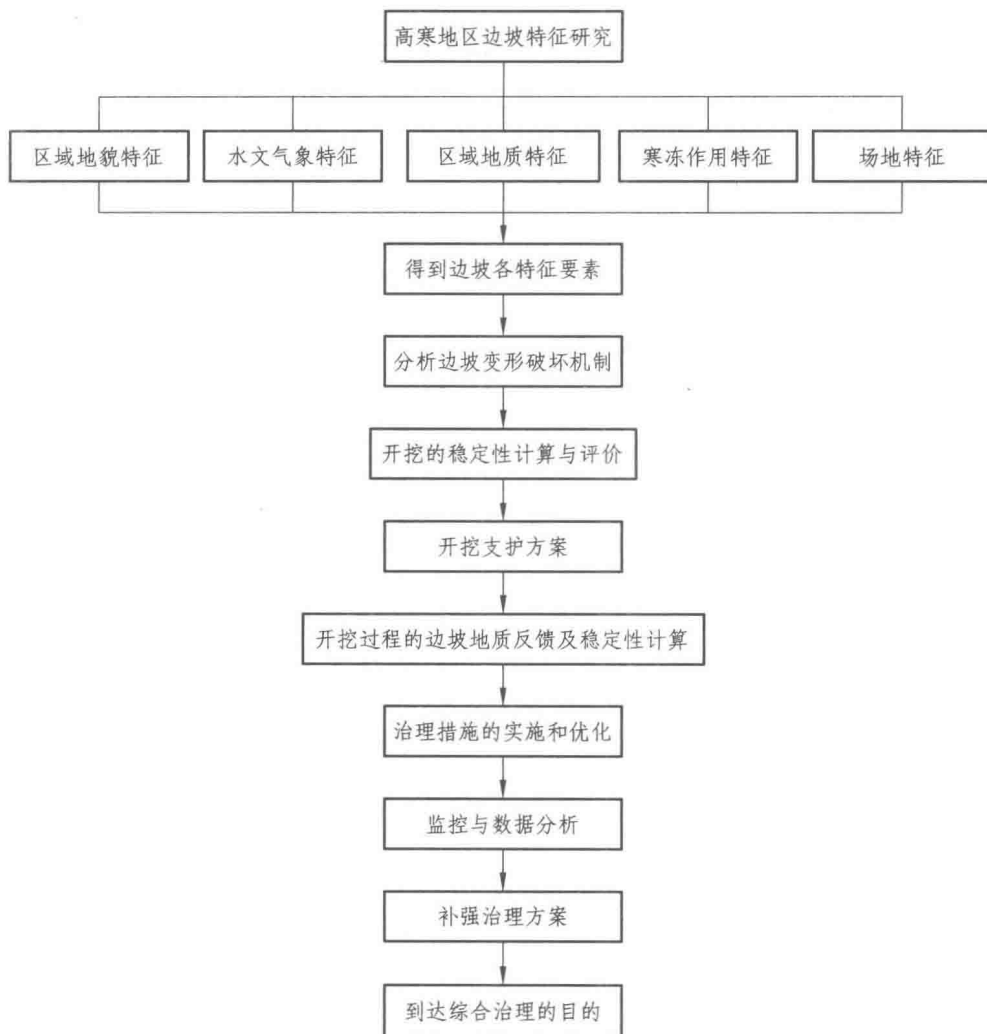


图 1-1 研究简易思路图

1.4 可行性分析

本项目研究者多年从事西藏地区水利水电等工程的施工与研究。从 1998 年开始，研究者之一的周志东就在被誉为“西藏水电小百科”的沃卡一级水电站站工作，先后参建了青藏铁路 19 标段、西藏仲巴水电站、直孔水电站、老虎嘴水电站、藏木水电站、旁多水利枢纽工程等的施工与边坡研究，积累了针对西藏地区复杂边坡稳定性分析与治理的经验和研究方法。其他研究人员陶然、党永平、周春清等均在西藏等的高寒严酷地区从事水利水电工程多年，就寒冻作用对边坡的影响均有过一定的研究。截至 2012 年 6 月，在建的旁多水利枢纽工程，海拔 4 000 ~ 4 200 m，有相关岩土的实验设备，可以作为现场研究一个重要的依托点。室内寒冻作用实验可以依托中科院国家冻土工程重点实验室，同时，其他部分实验可以依托武汉大学水利水电国家重点实验室，保证本研究实验的顺利完成。

另外，在理论上，以系统科学的思维为指导，结合周创兵教授等提出的岩体耦合理论，对边坡变形破坏的各因素进行耦合，找出它们之间存在的耦合关系，从理论上为高寒地区的边坡治理提供理论依据和指导。

总之，从实践和理论上看，进行高原高寒地区边坡变形破坏机制研究和综合治理技术的研究是可行的。

2 青藏高原高寒地区边坡特征

青藏高原被称为“世界屋脊”，平均海拔 4 000 m 以上，日照时间长，年温差和日温差大，是东半球的气候调节器。同时，它有着很多终年不化的雪山，被称为“世界水塔”。青藏高原是 65Ma 年前，印度板块与欧亚板块相碰撞，古特提斯洋封闭隆起形成的，快速上升主要在 2Ma ~ 3Ma 年前至今的时间内。在形成过程中，又受到太平洋板块的影响，因此，地质独特而复杂。

同时，青藏高原空气稀薄，干湿交替快，紫外线和阳光辐射强，年温差和日温差极大，高寒缺氧，生态环境脆弱，施工环境恶劣，地质条件复杂，在工程建设上，属于典型的复杂高寒严酷地区。

2.1 西藏的地理位置

西藏自治区位于青藏高原的西南部，是青藏高原的主体部分，地域辽阔，东西最长处相距 2 000 km，南北最宽处相距 1 000 km。西藏北与新疆维吾尔自治区、青海省毗邻，东隔金沙江和四川省相望，东南部在横断山区和云南省相连，西部和南部与印度、尼泊尔、不丹、缅甸等国接壤，边境线长约 4 000 km，是中国西南边陲的重要门户。西藏自治区面积约 120 多万平方千米，占全国国土总面积的 1/8，仅次于新疆维吾尔自治区，居全国第二位。全区一共有 7 个地级市（区），分别为拉萨市、日喀则、那曲、阿里、山南、林芝、昌都等。其中拉萨是自治区的首府，是全区经济、政治、文化、宗教和交通的中心。

西藏自治区被誉为“世界水塔”和东半球的“气候调节器”，我国和东南亚的众多河流多发源于青藏高原。西藏自治区的资源十分丰富，区内的原始森林、大型牧草、多种矿产、野生动物、地热、农耕土地、旅游资源等很丰富且十分独特。例如：林芝地区等东部的原始森林，是我国的重要天然林之一；羌塘草原牧草茂密，牛羊成群；羊八井地热资源丰富，被誉为“地热博物馆”；雅鲁藏布江、澜沧江等水力资源十分丰富。此外，雅鲁藏布江及其支流两岸土质肥沃、雨水较为充沛，是区内的粮食产地。西藏独特的宗教哲学、民间艺术等传统文化底蕴深刻，自然景观有雄伟的喜马拉雅山、数不胜数的神湖、终年不化的雪山、一望无际的大草原、稀有珍贵的野生动物、淳朴的藏族民风民俗等无一不吸引着众多中外游客。

2.2 交通状况

西藏自治区地处中国交通相对落后的西部地区，由于高海拔和严酷的自然环境，截至 20 个世纪末自治区交通发展一直很慢。进入 21 世纪以来，随着西部大开发的进行，交通有了长足的发展和进步。目前，全区以拉萨为中心，构筑立体的交通网络，其中公路以青藏公路、川藏公路、新藏公路、滇藏公路和中尼公路为骨干网络，已经建成了高原高速公路（拉萨到贡嘎机场）、一级、

二级等等级公路,林芝—墨脱县公路于2012年6月通车,实现了县县通公路。青藏铁路二期工程格尔木至拉萨全长1120 km,于2007年7月正式通车,结束了西藏无铁路的历史。目前拉萨至日喀则的铁路正在建设之中,拟于2013年6月通车。西藏自治区已建成了贡嘎机场、日喀则机场、林芝机场、昌都机场、阿里机场等。可见西藏自治区已经在西部大开发中构筑了自己的立体交通网络。截至2011年,公路有区道15条、20条县道、157条乡村道路、152条专用公路,基本实现了地级市有油路,73个县超过40个实现有油路,乡镇和行政村的通车率分别在95%和80%以上,航班开通了北京、成都、上海、重庆、西安、西宁、兰州、广州、深圳、昆明、香港等地,国际航班有尼泊尔加德满都航线。总之,西藏的交通在快速发展。

2.3 环境特征

西藏地区的高原环境特征主要有:

(1)日照时间长。年日照时间为2500~3300 h,太阳辐射强,如拉萨太阳年辐射量约为7900 MJ·m²,阿里地区的狮泉河约为8300 MJ·m²,日喀则地区的绒布寺则高达8700 MJ·m²,辐射量基本是内地城市的1.5~2.5倍。

(2)干湿交替快,相对湿度很低,空气干燥。气压低,一般为0.5~0.7个标准大气压,氧分压也随之较低,一般只有内地的0.5~0.7倍,特别在冬季氧分压会更低,往往缺氧严重。

(3)温差大。西藏地区的日温差和年温差均较大,根据相关统计,正负气温交替多,平均一年约有180个冻融循环。以我部施工的唐古拉山南麓的青藏铁路19标段为例,年最高气温28℃,年极端低温-45℃,平均年冻融循环超过180个。

(4)植被少,风沙大,大风日多。例如,拉萨市多年平均大风日为26.3 d(8级以上或者风速17 m/s以上为大风)。由于很多地方植被稀少,一般每天都有5级以上的风,且带着沙尘,尤其在下午和晚上大风多。

(5)紫外线强,日平均总量在80~150 J/cm²,是内地的1.5~2.5倍。

(6)冰雪天气多。有些地方全年均可能下冰雪,以唐古拉山南麓的扎加藏布河谷(海拔4800~4950 m)为例,2003年冰雪天为44 d,2004年7月13日上午下了雪,2005年8月22日也下了大雪。

(7)西藏有些河流和部分地区的地下水存在腐蚀性物质,如SO₄²⁻离子和Cl⁻离子等。

(8)极端天气特别多,大风、暴雪、暴雨、冰雹等多发、频发。

总之,特殊的地理位置和特殊的气候特征,造成了西藏的多数地区高寒缺氧、生态脆弱、环境恶劣。

2.4 地貌气候特征

西藏地区的地形地貌多种多样,山脉东西横亘、河流众多、湖泊星罗棋布,高山峡谷,气势磅礴,高原、平原等,景象万千。尤其是被誉为神山和圣湖的地方不胜枚举,更增添了不少神秘色彩。西藏美景令游客流连忘返,吸引着许多学者去探秘,揭示那神秘的面纱。

西藏地貌大致可分为喜马拉雅高山区、藏南山原湖盆谷地区（主要为印度洋水系分布区）、藏北高原湖盆区（主要为内陆水系分布区）和藏东高山峡谷区（主要为太平洋水系分布区）4个自然地理景观区。

其中，藏布高原湖盆区主要为冈底斯山—念青唐古拉山以北的南北羌塘山原湖盆地和昆仑山等地区，平均海拔在4 500 m以上，特别是唐古拉山的平均海拔为5 000 m，被誉为“世界屋脊的屋脊”。该区面积约 $8 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，占全区面积的2/3。该区域是我国最大的高原多年冻土分布区域，植被稀少，区内以冻融剥蚀、风蚀、盐渍地貌为主要特征，湖泊星罗棋布，丘陵和山地舒缓，高差100~500 m，气候干燥、阳光充足、太阳辐射极强，无外来水系，主要是内陆水系，是盐湖的形成和保留的有利场所，是我国盐类湖泊最为集中的地区之一。藏东高山峡谷区即著名的横断山脉，位于那曲以东，山脉逐渐由东西走向转变为南北走向。区内高山峡谷，主要的河流有怒江、澜沧江和金沙江，地势由中国的第一阶梯过渡到第二阶梯，地貌复杂，北高南低。北部平均海拔为5 200 m，山顶平缓；南部海拔在4 000 m以下，山势陡峻，山区受到海洋性湿润气流的影响，气候差异明显，山麓和山腰有森林和田园风光，山顶则是白雪皑皑。

喜马拉雅山区主要是喜马拉雅山及以南的地区，山脉东西向展布，高山多，主脊在6 500~7 000 m，海拔8 843.13 m的世界第一高峰——珠穆朗玛峰就高耸在中尼边境上。该区南边受到印度洋季风的影响，气候湿润，北部受到季风影响，空气干燥，南北差异较大。

藏南山原湖盆谷地区有许多宽窄不一的河谷盆地和盆湖谷地，主要是拉萨河、年楚河、尼洋河等的河谷平地。本区地势相对平坦，水系发达，沟渠纵横，土质肥沃，美丽富饶，为自治区主要的农业区。另外，主要的湖盆谷地有羊卓雍湖高原湖泊区、札达盆地等。

青藏高原复杂多样的地形地貌，形成了独特的高原气候。总的来讲，与中国大部分地区相比，西藏地区的空气稀薄，含氧量低；日照充足，辐射强烈；气温较低，降水较少。除呈现西北严寒干燥，东南温暖湿润的总趋向外，还有多种多样的区域气候和明显的垂直气候带。从东南到西北依次出现了热带、亚热带、温带、亚寒带、寒带以及湿润、半湿润、半干旱、干旱等气候类型。全区可以分成八个气候区，即喜马拉雅南麓热带湿润气候区、喜马拉雅山南麓亚热带湿润气候区、藏东南温带半湿润气候区、藏南温带半干旱高原季风气候区、阿里亚寒带干旱高原季风气候区、那曲寒冷半湿润高原季风气候区、藏北寒冷半干旱高原季风气候区和昆仑寒带干旱高原季风气候区。青藏高原每立方米空气中只含氧气150~170 g，相当于平原地区的62%~65.4%，冬季更低。水的沸点，大部分地区也降至84~87℃。西藏自治区是中国太阳辐射能最多的地方，比同纬度的平原地区多一倍或三分之一日照时数，也是全国日照时数的高值中心，如拉萨市的年平均日照时数达3 005 h，比同纬度的东部地区日照总时数多1 000 h左右。

另外，西藏地区的气温年变化小、日变化大，区内各地降水的季节分配不均，旱季和雨季的分界非常明显，而且多夜雨。

藏东南为多雨带，年降水量在1 600 mm以上；东部和中部为半湿润带，年降水量为400~800 mm；藏北内陆河区为干旱带，年降水量在200 mm以下，是全区最干旱的荒漠区。

西藏又是全国冰雹日数最多的地区，那曲平均年冰雹日35.9天，多为小冰雹。

高原上的巨大山岭普遍发育着终年不化的雪山和现代冰川，雪山及冰川的融水是长江、雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、印度河等主要大河的源泉之一。同时，降水也是西藏河流径流的另一个主要来源。此外尚有地下水补给，其补给量占各河年径流量的比例有所不同。河流补给类型大体分布是：西部、北部河流以地下水补给为主；中部和东南部的河流以降水补给为主；帕隆藏布以