

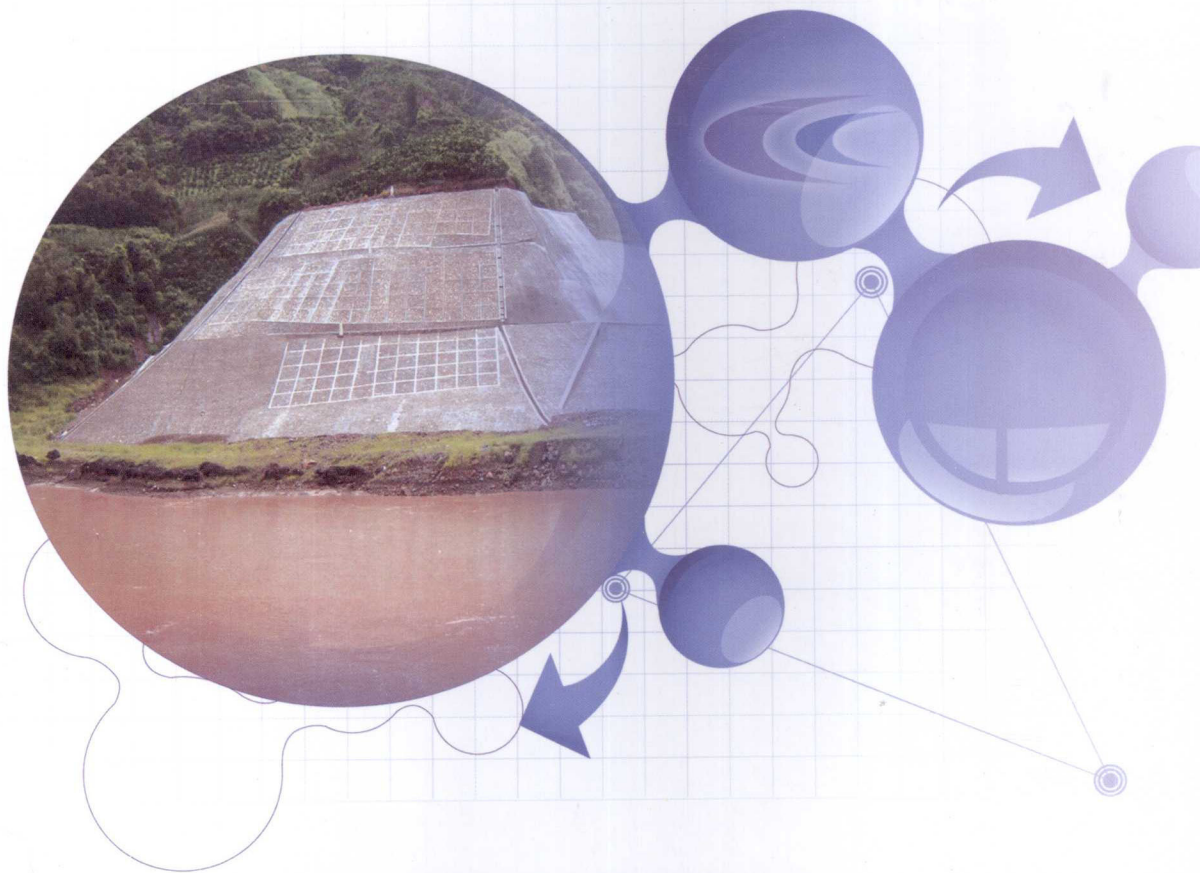


中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION

水电技术专著系列

水电站工程 滑坡及特殊边坡研究

万宗礼 刘 昌 聂德新 张应海 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



中国水电顾问集团西北勘测设计研究院
HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION

水电技术专著系列

水电站工程 滑坡及特殊边坡研究

万宗礼 刘 昌 聂德新 张应海 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书第1篇系统介绍了水电站工程中滑坡及特殊边坡勘察、岩土试验研究、稳定性计算分析、监测预报及工程治理的相关内容,重点探讨了特殊边坡、新的滑坡及特殊边坡分类、滑带土试验研究及参数取值、稳定性计算方法的适应性、不同位置滑坡及边坡的评价内容、工程运行后滑坡及特殊边坡稳定性复核验证等方面;第2篇汇编了一批水电站工程中滑坡及特殊边坡研究的实例资料。

本书内容系统、全面,实例众多,对从事水利、水电、土木、交通和矿山工程等领域的科研、设计和施工人员具有较高的实用价值,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站工程滑坡及特殊边坡研究 / 万宗礼等编著

— 北京:中国水利水电出版社,2012.6

(中国水电顾问集团西北勘测设计研究院水电技术专著系列)

ISBN 978-7-5084-9900-0

I. ①水… II. ①万… III. ①水力发电站—滑坡—研究 IV. ①P642.22②TV74

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第134271号

书 名	中国水电顾问集团西北勘测设计研究院 HYDROCHINA XIBEI ENGINEERING CORPORATION 水电技术专著系列 水电站工程滑坡及特殊边坡研究
作 者	万宗礼 刘昌 聂德新 张应海 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 39印张 925千字
版 次	2012年6月第1版 2012年6月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	168.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《水电站工程滑坡及特殊边坡研究》

编写人员名单

万宗礼	刘 昌	聂德新	张应海
吕生弟	王志硕	杨天俊	杨永明
黄民奇	赵志祥	罗志刚	陆栋梁
曹 曦	马福祥	沈启湘	张富荣
李树武	李少平	巨广宏	赵海营
苟富民	任光明	符文熹	宋彦辉

前言

滑坡是自然界常见且分布广泛的地质现象，不但地质历史时期已形成了规模不等、类型各异、成因不同的大量滑坡，现今也随时会发生滑坡自然灾害。人类对滑坡的认识和研究从未停止，其最终的目的是防灾减灾。当滑坡与水电站工程有关时，滑坡可能带来的灾害就显得更为突出，因而对其的关注程度也应更大。自然条件下的滑坡，无论规模、形成机制等如何不同，其稳定条件和致灾程度均受天然地形条件、滑坡结构条件、降雨和流水及地震等天然条件控制。而当一个滑坡与工程特别是水利水电工程发生关系时，滑坡的稳定和致灾程度则主要受控于工程开挖、蓄水及渗透、泄洪雨雾等人为因素，特别是水的因素。因而水电站工程滑坡与其他工程（公路、铁路、矿山等）滑坡最大的差别是有水与无水的差别，也正是这一差别，导致水电站工程滑坡在研究方法、内容、深度、可靠程度等方面显著不同于、也复杂于其他工程滑坡。

新中国成立 60 多年来，伴随中国水电站工程的长足发展，与水电站工程有关的滑坡研究在我国也得到了很大的发展，研究的深度和广度不断加大，不但保证了大批水电站工程的安全施工和运行，也使滑坡研究的理论和实践水平达到了国际领先的程度。西北院在 50 多年的水电站工程勘察设计实践中，遇到了大量的滑坡和特殊地质体（即非滑坡也非原岩的倾倒体、变形体、塌滑体等）边坡，这些滑坡和特殊边坡有的位于库内、有的位于坝前近坝、有的位于坝后，具有不同的位置、不同的影响因素和不同的稳定性及致灾程度。几代西北院人为这些滑坡劳神费思，付出了汗水和心血。由于时代的不同，对滑坡的研究程度也是不同的，但随着时代的进步、科技的发展，滑坡研究的程度和水平也在不断提高。50 多年来，西北院在不同时代对众多各类型滑坡研究中积累了大量的理论和实践经验，研究和治理了大量不同的复杂滑坡和特殊边坡，为水利水电工程和滑坡学科进步做出了贡献。国内水电站工程勘察设计业者众多，参与科研者甚多，均在水电站工程滑坡研究的不同方面和领域取得了相应的高水平成果，但系统地归纳总结、提炼和深化的综合性成果未见多少，特别是对前期和运行期进行复核验证、综合对比的成果更是少有。

基于上述情况，本书的目的就是通过对水电站工程滑坡的系统归纳总结，

建立滑坡勘察—试验研究—机制分析—影响因素和边界条件确定—计算分析方法—未来趋势预测—治理措施—运行期复核验证的系统勘察研究工作思路和体系；通过前期和运行期的复核验证，检索出适合、正确、可行的前期理论和方法；力争使本成果成为勘察设计人员在滑坡研究和治理方面的参考工具书。

本次总结研究确定的技术路线是：

(1) 尽可能收集国内外水电站滑坡及特殊边坡研究、治理的工程实例资料，以掌握此领域的动态、进展和方向。

(2) 系统汇总整编西北院数十年来在此研究领域的成果资料，重点考察不同时段滑坡及特殊边坡勘察研究和评价的方法、思路和结果。

(3) 总结滑坡及特殊边坡勘察、研究和评价的内容和方法，探索成功的事例和不足的教训。

(4) 从水电站工程滑坡和特殊边坡的特点和特殊的环境条件入手，着重考虑对其的研究和评价内容，建立适合水电站工程的滑坡及特殊边坡的分类方法。

(5) 确定常规、可行、有效的滑（边）坡勘察方法和要点，确定对不同位置、不同性质滑（边）坡的勘察深度和要求的把握原则。

(6) 通过收集整编资料，系统归纳分析滑坡研究中滑体、滑带物质试验工作内容、重点试验项目、主要指标论证方法、取值原则等，找出普遍方法、特殊方法及适应性。

(7) 从滑坡形态、物质组成和结构类型的具体条件分析认定入手，探讨不同类型滑坡稳定计算的方法，即对滑坡稳定分析计算方法的适应性进行研究。

(8) 从地质背景、河谷岸坡形成演变历史、重力、构造应力、结构面及边坡结构等条件入手，分析探讨深部变形体、倾倒体、塌滑堆积体等特殊边坡的形成机理和过程，研究其变形程度、稳定现状、未来变形破坏趋势、影响因素及其与工程建筑物的关系等，提出对此类边坡的研究方法、稳定性评价、工程处理措施等。

(9) 在对水电站工程滑坡及特殊边坡按所处位置进行分类的基础上，探讨不同位置滑（边）坡应研究的内容及深度，同时对不同位置滑（边）坡研究时应考虑的不同边界条件进行分析。

(10) 分析整理水电站工程滑（边）坡的综合治理方法，系统归纳分析监测和增稳两方面的综合措施，并对其适应性、可靠性等进行评价。

(11) 系统整理、汇编一批滑(边)坡工程实例,对有条件者进行蓄水或运行后的稳定现状调查复核,并与前期分析计算结果进行对比,验证前期趋势预测、机理分析、参数取值、计算方法等,并系统总结。

经过三年的努力,顺利完成了本次专题总结研究,内容、深度上达到了预定的目标,提出了水电站工程滑坡分类、特殊地质体边坡、滑带土参数研究与选择、计算方法适应性评价、运行期复核验证等新的概念和内容。第1篇为水电站工程滑坡及特殊边坡研究的内容及方法,贯穿了勘察、试验研究、评价内容、参数选择、计算方法、运行期复核验证的主线;第2篇为滑坡及特殊边坡工程实例,侧重资料性汇总和研究细节。相信本成果对勘察和设计人员能起到较好的参考和指导作用。

本项研究西北院给予了充分的重视,组织院内地质专业众多技术骨干参加,充分吸纳高等院校的教授、博士和硕士研究生参与,吸收了庆祖荫、李天扶、刘钊等西北院专家的思路和成果,保证了专题的顺利进行和最终成果质量。研究过程中,也得到了西北院领导、科技处领导和同事的广泛支持和帮助,在本书出版之际,向高校老师、西北院老专家、院领导和部门领导表示真诚的谢意!

本书第1、2、3、4、8、9章由万宗礼执笔,第5、6章由聂德新执笔,第7章由万宗礼、聂德新、吕生弟执笔。第二篇由刘昌、张应海主编,分章执笔者为:王志硕、杨永明、杨天俊、陆栋梁、罗志刚、黄民奇、赵志祥、马福祥、曹曦、沈启湘、张富荣、李树武、李少平、苟富民、任光明、赵海营、符文熹、宋颜辉等。全书由万宗礼、刘昌统稿,文字、图表处理由李树武、林伟风完成。

作者

2012年5月10日

目 录

前言

第 1 篇 水电站工程滑坡及特殊边坡研究的内容及方法

1 绪论	3
2 水电站工程滑坡及特殊边坡研究现状	14
2.1 勘察的要点及现状	14
2.2 滑坡成因及滑动机制	18
2.3 稳定性计算分析方法	25
2.4 滑坡涌浪研究及预测	26
2.5 滑坡及特殊边坡治理	30
3 水电站工程滑坡及特殊边坡分类	32
3.1 滑坡分类	32
3.2 水利水电工程滑坡专门性分类	38
3.3 特殊边坡分类	48
4 滑坡及特殊边坡的工程地质勘察要点	56
4.1 工程地质调查和测绘	56
4.2 勘探	62
5 滑带物理力学特性研究及参数取值方法	67
5.1 研究意义	67
5.2 滑带基本物理特性研究	67
5.3 滑带土强度参数的取值方法及原则	70
5.4 滑带土物理力学指标相互关系研究	93
5.5 滑体的主要物理力学参数	98
6 滑坡及特殊边坡稳定性分析计算方法及其适应性研究	101
6.1 概述	101
6.2 滑坡及特殊边坡稳定性计算方法	101
6.3 滑坡及特殊边坡稳定性计算方法的适用性研究	111
7 不同位置滑坡和特殊边坡的评价内容及必须考虑的边界条件	128
7.1 滑坡及特殊边坡的形成机制	128
7.2 水库、坝前及近坝库岸滑坡和特殊边坡重点评价内容及边界条件	156

7.3 建筑物区及坝后泄洪雨雾区滑坡和特殊边坡重点评价内容及边界条件	194
8 滑坡及特殊边坡的监测和工程处理	218
8.1 监测的前提条件	218
8.2 监测的内容	219
8.3 监测方法	220
8.4 监测等级划分	224
8.5 变形监测网的布设	225
8.6 变形破坏预报	229
8.7 滑坡及特殊边坡治理	238
9 工程运行期间滑坡及特殊边坡稳定状况的复核验证	244
9.1 水库区滑坡蓄水后的稳定状况调查复核	244
9.2 坝前滑坡蓄水后的稳定状况调查复核	254
9.3 近坝库岸滑坡及特殊边坡蓄水后的稳定状况调查复核	268
9.4 建筑物及坝后区滑坡和特殊边坡稳定状况复核调查	273

第2篇 水电站工程滑坡及特殊边坡研究的工程实例

10 水库滑坡及特殊边坡工程实例	287
10.1 公伯峡库区Ⅶ号滑坡	287
10.2 黄河积石峡水电站库区戈龙布滑坡	296
10.3 里底库区江外南各统滑坡	319
10.4 里底库区巴迪滑坡	327
11 坝前及近坝库岸滑(边)坡工程实例	335
11.1 龙羊峡水电站近坝库岸稳定性分析评价	335
11.2 李家峡坝前Ⅰ号滑坡	361
11.3 古什群右岸倾倒变形体	375
11.4 小峡左岸坝前石坪台滑坡	385
11.5 苗家坝沙圈坝滑坡	407
11.6 羊曲滑坡	414
11.7 乌弄龙坝前堆积体	431
12 建筑物区滑坡及特殊边坡工程实例	439
12.1 拉西瓦水电站Ⅱ号变形体	439
12.2 巴贡水电站溢洪道引渠古滑坡	457
12.3 茨哈峡水电站右岸溢洪道部位Ⅰ号滑坡	469
12.4 陕西岚皋蔺河口水电站垭口滑坡	479
13 坝后泄洪雨雾区滑坡及特殊边坡工程实例	491
13.1 黄河龙羊峡虎山坡滑坡	491

13.2	李家峡水电站坝后左岸Ⅲ号滑坡·····	493
13.3	公伯峡水电站压力钢管道右侧古风化岩高边坡·····	532
13.4	黄河积石峡水电站坝下Ⅰ号滑坡·····	544
13.5	苗家坝水电站 F12 断层上盘变形体 ·····	563
13.6	茨哈峡水电站右岸坝后深卸荷边坡·····	571
13.7	四川九龙河溪古水电站梅铺堆积体·····	590
参考文献 ·····		613

第 1 篇 水电站工程滑坡及特殊边坡 研究的内容及方法

1 绪论

滑坡是自然界普遍的物理地质现象之一，滑坡不但发生在陆地上，也发生在洋底。自从地球上有人类以来，陆地上的滑坡就对人类产生着不同程度的影响。进入农业文明和工业文明时代以后，人类的活动反过来又对滑坡的产生起到诱因的作用。滑坡的产生有各种特定的内外动力地质条件，控制着滑坡发生的岩体结构条件、岸坡临空条件、岸坡结构条件及松动变形条件等。而这些内外动力地质条件所对应的作用，则是如构造运动作用造成特定的构造结构面，决定着岩体的结构组合。地壳上升、沟谷深切造成临空岸坡和具潜在失稳趋势的岸坡结构；风化、卸荷引起的松动松弛作用为地下水侵蚀弱化结构面、岩体变形起加速作用；暴雨、地震、人类工程活动等则对滑坡的变形起到了诱发或触发作用。

滑坡在地质历史的不同时期就应有之，而后期的海洋进退、地壳变迁使得前期的滑坡严重改造或不复存在。而现今地球洋陆相对稳定，水系格局形成、陆地定形，大概也只是数百万年的事。就中国版图内而言，青藏高原的隆起是现今中国地貌轮廓形成的标志性事件，中国主要江河水系格局的定形也是在此标志性事件背景下约 200 万年以来的事。由此可以推论，中国境内陆地上现存的滑坡，最古老者也可能不超过 200 万年。黄河上游青藏高原区，喜马拉雅运动的第三幕使得早期的黄河袭夺了若尔盖草原的水系，至此，黄河水系格局定形。因而，现今黄河上游河谷两岸不同高程的滑坡，最古老者也在中更新世初期，时间约 100 万年。

除了地质历史上的古老滑坡，进入人类社会以来，滑坡也是无时不在，无处不在，中国古籍中多以“岩崩”、“山崩”记载，且多与地震活动的记载相伴。人们认识滑坡、研究滑坡，从科学的、自然的角解释滑坡，只是近代 100 多年以来的事。在这期间，人们不但调查研究滑坡，甚至目睹过滑坡发生的过程和结果。

在中国，广泛、系统、全面地研究滑坡，应是新中国成立以后伴随大规模的农业、工业建设而开始的。特别是铁道、公路、矿山、水利水电工程领域，拉开了滑坡研究的序幕，涉及自然地理学、地质学、工程地质学、力学、计算科学等众多学科。建设的蓬勃发展，带动了滑坡研究工作的逐步深入，研究方法的系统化和规范化。不但研究滑坡的自然形态特征、物质特性、形成机理等天然条件，而且分析评价滑坡各种条件下的稳定性，更重要的是从避免或减少灾害的角度，研究滑坡的工程治理。至此，中国在滑坡的研究上，方法和理论基本与国际同步，欠缺的只是计算手段。

在世界水利水电工程史上，1963 年意大利瓦依昂坝前滑坡造成涌浪翻坝，并造成下游人民生命和财产的重大损失是一次惨痛的教训。湖南柘溪塘岩光滑坡、云南漫湾水电站边坡失稳，也是水电工程中的典型滑坡事例。人们认识到，水利水电工程中的滑坡或山体失稳，不但具有与其他工程中所遇滑坡天然条件的共性，而且具有与水关系密切的显著个性：坝前的滑坡、潜在不稳定体很可能受库水浸泡；大坝建筑物区的滑坡和潜在不稳定体易受渗透压力作用而失稳；坝后泄洪雨雾对易失稳地质体起到类似暴雨而又强于暴雨的作用。由此，水利水电工程滑坡的研究，从研究内容、方法、考虑的边界条件、敏感因素等方面已大大不同于其他工程。

中国的水利工程古已有之，古人是否研究和治理过水利工程中的滑坡，无从可考，水力发电工程在新中国以前更是凤毛麟角。中国人自行勘察设计、建造现代水利水电工程起始于20世纪50年代，大兴于改革开放后21世纪初。近60年来，中国的水利水电事业得到了长足的发展，也使得业界在滑坡研究和治理方面逐渐深入，逐步成熟，形成了勘察—研究—治理的科学有效的规范体系。在勘察上，除传统的地形图测绘外，遥感地质解译等高科技手段在滑坡勘察上也得到广泛应用；在研究上，滑坡物质的物理力学特性、形成机制、应力应变特征、稳定性计算分析，更是百花齐放，理论和方法层出，给多方法对比研究、相互验证、敏感分析提供了广阔的空间；在治理上，人们不再立足于传统的挖除，而是挖、锚、挡、压（脚）、抗（抗滑键、抗滑桩）、排（排水）等并用，且立足于高科技手段的遥感遥测、预警预报也广泛使用。

滑坡只是水利水电工程中边坡问题的一个方面。除已形成的滑坡外，尚有既非原岩又非滑坡的特殊地质体边坡，本书称之为“特殊边坡”，如特定结构面控制的已发生过松动松弛、蠕滑拉裂的变形体；受层面或反倾密集结构面控制的向临空方向倾倒、折断变位的倾倒体；无统一底部滑面控制，浅表层松动、张裂、架空的松动体；受不同底滑面控制，逐渐失稳破坏累积的塌滑堆积体；半成岩的高陡土状边坡、强度和结构再生的古全风化岩边坡等。这些特殊地质体，有些实际是滑坡的前期（如大规模的变形、倾倒体等），有些虽不可能形成大规模的滑坡，但对工程的危害也很大，从数量和分布上，往往较多、较普遍。除大型滑坡、工程建筑物区的变形体外，其他特殊地质体则很难避让，因而也是工程勘察中必须重视的问题。

中国水电顾问集团西北勘测设计研究院（以下简称西北院）是中国水利水电工程专业的勘测设计研究单位，自1950年建院以来，在黄河上游、白龙江流域、四川、云南、西藏、新疆等江河上完成了大量水利水电工程的勘测设计，已建成运行和在建工程有数十座，现从事前期勘测设计的工程近百。在滑坡及特殊边坡的勘察研究上，经历了漫长的时间，取得了丰富的经验，汇集了几代人的智慧。典型的实例有：龙羊峡坝后虎山坡、近坝前半成岩高陡岸坡（6号、7号地段），李家峡坝前后滑坡，公伯峡近坝库岸滑坡及倾倒体，古风化岩边坡，拉西瓦Ⅱ号变形体，小峡坝前石坪台滑坡，汉坪嘴坝前滑坡，伊朗塔里干溢洪道出口变形体，马来西亚巴贡溢洪道进口滑坡等。这些滑坡及特殊边坡的条件不同、性状不同、成因多样、稳定性各异，对工程的影响有别，故研究的内容也不尽相同。由于各实例研究的时代不同，因而在勘察、研究方法上差别较大、深度不一。近几年来，中国水电工程进入黄金时代，各大江河、支流水系的水电开发迅猛发展，坝越来越高、库越来越大，滑坡及特殊边坡等工程地质问题也越来越多，复杂程度也越来越高。工程建设中对滑坡及特殊边坡研究、治理的要求也在不断提高。因此，水利水电工程中滑坡及特殊边坡勘察、研究、治理工作面临着广阔的前景，也面临着学科及技术进步的机遇和挑战。西北院在近60年的工程实践中，在滑坡及特殊边坡的勘察、研究和治理方案设计上有着漫长的阅历、丰富的经验，也有事后良多的遗憾。将这些总结、提炼、反思并展望是当代西北院人应尽的责任和义务。通过这种总结性研究工作，为后来的工作和后来人提供经验、提供指导、开阔思路，也是科技工作的必须、科技进步的需要、工程实际的切盼。为此，我们组织西北院众多的科技人员进行这项研究，从研究内容和方法、工程实例两条线路的

多个方面进行总结和提炼,形成本书,主要内容如下述。

1. 水电工程滑坡及特殊边坡的研究现状

以西北院黄河上游各工程滑坡、白龙江、四川、云南、新疆等地水电站工程滑坡和特殊边坡研究成果为基础,收集国内外其他工程的研究实例,对水利水电工程中滑坡研究的内容、方法及现状水平进行详述,以期了解滑边坡研究的历史沿革和现今趋势。

传统上,滑坡区地形是人工测绘完成的,再经过野外地质填图,技术人员所具有的平面资料就是一张在地形图基础上形成的滑坡平面地质图。滑坡整体的立体概念仅局限在野外调查时实地看到的片段在大脑里的印象集合,若不甚清晰的摄影照片。而现代的大范围、高分辨率(1m分辨率已投入商业使用)、轮廓清晰、细部可视的卫星数字图片在滑坡地形成图、地质解译等方面在国外已有了较大的发展,而国内尚在起步阶段。

对工程有较大影响的滑坡、特殊边坡必须勘探,而勘探的方法从传统到现代仍是钻探、硐探和物探,辅之以坑槽探和竖井勘探。分析其原因,一方面是涉及岩土의勘探技术很难突破,另一方面可能是现行的勘探方法仍是最直接、可靠、易行的方法,地质测绘调查、遥感地质解译等只能解决滑坡地表的地形地质问题,而无法确知滑坡深部的特征。滑坡的深部特征,一是滑坡不同部位的厚度或深度,二是较为确切的深部边界范围,三是控制性边界结构面的性状特征。从勘探方法的适应性上,钻孔、坑槽、物探均是查清厚度及边界条件的有效方法,且最易实施。而平硐、竖井勘探除同样可用来查清边界外,更重要的是用来直观地了解控制面的性状条件和便于取原状试样。地质调查和勘察为后续的分析研究和治理提供基础资料。从这个意义上讲,滑边坡的地质调查、勘探可能是任何时候都无法替代的基础性勘察工作,而有待改进的很大程度上是勘探技术本身和勘探工艺及效率。

勘察完成后,滑坡及特殊边坡的形成机制、变形破坏趋势、不同工况下的稳定性计算分析是滑边坡研究主题,而正是在这方面表现出百花齐放的态势。学术界、工程界从各种立意出发,借助现代发达的计算技术和手段,进行了全方位的、创新性的理论探索和实践验证。滑坡形成机制上,张倬元教授等提出了著名的蠕滑拉裂型、滑移—压致拉裂型、弯曲—拉裂型、塑流—拉裂型和滑移—弯曲型等变形破坏形式;按滑坡变形、位移起始的部位关系,也曾有流行的牵引式和推移式之说。除上述滑坡形成或斜坡变形破坏机制的研究外,滑坡的稳定性研究及失稳的预测预报方面,更是百家争鸣、方法多样、理论层出。稳定性计算除流行的萨尔玛法、毕肖普法、简布法等外,各种有限元、离散元方法也普遍采用。而在滑坡失稳预测预报方面,除早期的斋藤法、统计预测法、灰色理论外,新近更有分形理论、分数维理论、耗散理论、可靠度、神经网络等理论和方法面世;同时,斜坡变形、破坏,失稳后的滑坡运动等的研究也步入辉煌时期。最为著名的理论可能当属碎屑流说,将失稳后高速运动的土石体视为由自身转化而成的流体——高速散体状流体。也有学者进一步在此基础上提出了“气垫”说,即在滑面与碎屑流的界面上,高速碎屑流压缩了该界面空间的空气,形成气垫,加速了碎屑的流动,而在具体的滑坡滑动速度计算的理论和方法上,目前仍未突破国外学者的“能量法”和中国两院院士潘家铮先生所创立的“潘家铮法”。

相比滑坡形成机制和稳定性研究,滑坡治理方面的研究和实践则显得单调而冷清。多

年来的治理措施上仍未突破传统的方法,进步只体现在所用材料、施工方法和工艺上,或许这也就是岩土工程本身的复杂性和不确定因素多所决定的。而作为滑坡治理措施之一的监测,则在近年有较大的进步。除传统的地表大地测量监测网监测、地下埋设各种仪器监测外,以卫星数据为基础的合成孔径雷达干涉及差分技术对地表微位移监测已在国外应用,国内也正在起步,预计对大范围的水库滑坡、塌岸等监测有广阔的前景,甚至可以做动态观测。

2. 滑坡及特殊边坡的分类

滑坡的分类较为纷杂,不同学者的分类其定义和含义也不尽相同。归纳起来,滑坡的分类大致有如下几种:

(1) 按滑坡物质组成分类:是一种按滑坡体岩土类型的分类,在铁道部门广为使用(《岩土工程勘察手册》,林宗元主编,1996年,辽宁科学技术出版社)。分为堆积层滑坡、黄土滑坡、黏土滑坡、膨胀岩(土)滑坡、风化带滑坡、断层带滑坡及岩层滑坡等。实际上前3类为土质滑坡,后3类总体应为岩质滑坡。

(2) 按成因机制分类:分类的主要依据是形成机制,如土质滑坡的碎屑流,岩质滑坡中的溃屈型、滑移型、倾倒折断型、楔形滑动型等,亦为滑移—弯曲型、蠕滑—拉裂、滑移—压致拉裂型、弯曲—拉裂型等。也有人进一步细分为单面滑动型、双面滑动型、弧面型等。有时候人们将“成因”和“机制”混在一起,即有了“成因机制”一词,但有学者认为“成因”与“机制”是不同的。按机制对滑坡分类已如前述,而滑坡分类也有单独以“成因”分类的,分为“自然滑坡”和“工程滑坡”(人类工程活动引起的)。

(3) 按滑动力学特征分类:这种分类是以滑坡的始滑位置的不同而分类的,当滑动起始点在滑坡前缘,逐渐牵引导致中部和后缘破坏,称为牵引式;当滑动起始点在滑坡后缘,逐渐向前递进时,称为推移(动)式;为滑坡滑面的前、中、后缘多点同时滑移时,称为平移式。只按前两种分类的以《岩土工程勘察手册》为代表,按3种分类的以陆兆溱编《工程地质》(1989年,水利电力出版社)为代表。

(4) 按滑面形态分类:滑坡的滑动面的形态不仅涉及滑坡形成的机制,而且也反映滑坡的稳定状态,因而在滑坡分类中引人关注。已见诸文献的分类主要有:直线型、折线型、圆弧型等,也有更形象化的船底型、椅子型、倒椅子型等。实际上前3种滑面形态已基本能概括自然界所见的主要滑面形态,或是3种形态的组合。张倬元教授在《工程地质分析原理》(1994年,地质出版社)一书中,依据滑动面或破坏面(Surface of Rupture)纵剖面形态,只划分为平滑型(顺层)滑坡(Translational Sliding)和弧形或转动型(切层)滑坡(Slump 或 Rotational Sliding)两种类型。

(5) 其他分类。按滑体厚度分为:浅层滑坡($<5\text{m}$)、中层滑坡($5\sim 20\text{m}$)、深层滑坡($20\sim 50\text{m}$)、超深层($>50\text{m}$)滑坡;按滑坡形成的时代有古滑坡、老滑坡、新滑坡及现代滑坡之分;按滑坡的埋藏条件分为裸露滑坡(前缘出露)、埋藏滑坡(前缘滑面埋于地下)、覆盖滑坡(前缘滑面被后期堆积物覆盖)。

(6) 在总结各种分类的基础上,新颁布的 DL/T 5353—2006《水电水利工程边坡设计规范》中提出了规范性的滑坡分类表,其分类依据仍是成因、滑面特征、滑动机制、稳定状态、滑坡厚度、滑体体积等(详见 DL/T 5353—2006 表 c.2)。

由上可见,滑坡的分类没有统一的依据和标准。分类者仅是据其研究的目的和内容进行划分,有些分类侧重成因、有些侧重滑坡形成机制、有些重点是滑坡物质组成、有些则是侧重滑面的形态和滑动力学特征。如果研究的重点和目的不同时,滑坡的分类又会大不一样。例如,如果考虑与滑坡的冲击破坏力有关的滑速问题,则又可分出高速和低速滑坡;如考虑滑坡的起动、滑动和制动等运动学特征,又会有启程是否剧动、滑程是否加速、终程是否减速等的分别和差异;如果考虑滑坡失稳的外动力因素或触发因素,则有暴雨型、渗透压力型、地震型、人类工程活动型等。目前,我国的滑坡研究中前述的各种分类均有涉及,一些在进一步深化、细化,一些则鲜有进展,但无疑都对滑坡研究和治理起了积极的作用。

然而,前人的研究成果一方面在指导后人的研究实践,一方面后人在实践中又常感前人研究成果的全面性、与工程实际的切合性不足。滑坡分类的方法、理论、工程实际应用已较多、较纷杂,但在有些方面尚属空白,尚不能满足当今的工程实践活动。为此,本书以为水利水电工程服务为目的,就水利水电工程中所遇滑坡,提出了新的4项分类。

(1) 按滑坡与水利水电工程场址位置分类,可分为:

1) 水库滑坡。位于水库区,失稳后对水库周边居民村镇、农田、公共设施(路、桥等)等影响的滑坡。

2) 坝前及近坝库岸滑坡。位于坝前——坝上游近坝(10~15km)范围内的库岸滑坡,失稳后对大坝及临近建筑物造成破坏,产生水库涌浪破坏的滑坡。

3) 建筑物区滑坡。位于枢纽布置的建筑物区,失稳直接影响建筑物安全的滑坡。

4) 坝后消能区滑坡。位于坝后泄洪消能区,不直接影响枢纽建筑物,但失稳后造成附近附属建筑物破坏、堵塞河道、影响正常运行的滑坡。

(2) 按滑坡物质介质类型分类:不同的滑坡,受其原岩性状、滑动机制、运动状态的控制,介质类型完全不同,可分为:

1) 似连续介质。滑坡滑程短、启动后前缘受阻很快制动,滑体挤压密实,基本保留原岩层序,内部较少松动拉裂缝。

2) 不连续介质。滑动距离较长、滑动过程中无阻碍、原岩(土)解体充分、能量耗散后自行停止,滑体内松动、拉裂、架空普遍。

3) 过渡型。是前两种的过渡类型,滑体中部分保留原岩(土)的层序,较少松动拉裂缝,基本无架空现象,较密实。

对滑坡物质进行介质类型的研究和分类,对滑坡的稳定性计算分析、治理和利用是重要的一环。不同的介质类型对水、地震、暴雨及环境因素的敏感程度不同、稳定状态不同、相应的计算分析方法也应不同,进而影响到工程治理或工程利用的决策。

(3) 按滑体结构分类:工程实际中发现滑坡体的结构类型也具有多样性,除与原岩特性有关外,滑动过程和滑后的天然改造都对滑体结构产生影响,形成不同结构类型的滑坡体,这些结构类型对应着不同的介质类型,可分如下3种:

1) 松动架空结构。多产生在块状岩、厚层状原岩的滑坡中,滑坡解体充分,前缘无阻挡,物质块度大,多松动裂缝和架空,对应不连续介质。

2) 松弛松散结构。多产生在薄层状原岩的滑坡中,以溃屈破坏、蠕滑—拉裂破坏、