

国 土 资 源 部
岩土工程开放研究实验室

坡体平面旋转 机理及稳定性研究

赵法锁 等著

西安地图出版社

序

根据研究滑坡 50 余载的经验,在滑坡研究领域里见到这部研究坡体平面旋转变形活动的专著时,确实令人欣喜。坡体主要在重力作用下,由上而下运动,或快或慢,或动或停,都是容易理解的,但其平面旋转变位,以前很少看到这方面的报导,更没有深入研究的成果。作者所著关于近 30 万字的坡体平面旋转活动专著,系统、深入、理论与实际密切联系地研究坡体平面旋转活动,在国际上也属首部。青年科技工作者的这种刻苦钻研、勇于探索、攀登科学高峰的新事物,值得欣慰。

坡体平面旋转活动是近年新发现的一种斜坡变形形式。平面旋转坡体与过去习惯上研究的那些在以重力为主的荷载作用下,坡体自上而下的同步下移、崩落等形式的变形破坏完全不同。因此,在产生条件、形成机理、稳定性分析评价、变形破坏预测预报及防治等方面的问题,非过去传统的理论方法所能解答。然而,令人遗憾的是,迄今为止国内外就坡体平面旋转活动的理论研究,还是空白,即使这种现象的报导,也极少见;所以,这方面能够借鉴的成果资料更是罕见。坡体平面旋转变形是一个十分复杂的问题,其研究难度远远超出常规滑坡问题的研究。作者能够结合重大实际工程做出如此全面、系统、深入且提高到理论上的研究,实在不易。这项研究成果,是理论联系实际的典范;而且,还充分反映出该论著在该项研究领域中所特有的前沿性、探索性和突破性。

总之,该论著结构合理,层次分明,内容丰富,富有探索性、前沿性和创新性。反映了作者工作扎实,知识面宽广,采用技术方法先进,资料翔实,论据充分,在理论上有新的建树和突破;该论著的理论意义很大,实用价值极高,是一部滑坡理论研究领域中取得的最新成果,对坡体变形与破坏方面的研究,做出了开拓性贡献。该论著的出版,填补了滑坡研究领域中对坡体平面旋转活动研究的空白,它将对滑坡体研究理论的提高、发展与应用,起到促进作用。



1999 年 10 月

前 言

人类的历史,从某种意义上讲就是同自然界作斗争的历史,是在不断地认识自然、利用自然、改造自然,同自然灾害作斗争的过程中发展起来的。斜坡地质灾害就是与人类的生存发展极为密切的,且最为严重的地质灾害之一。由于它的岩性组成及其结构的复杂性及外部环境条件的多样性、多变性,使人们难以掌握其所有的变形破坏规律,给人类的生命财产造成严重的损失和破坏,并越来越突出地制约着国民经济的发展。

作者从事滑坡研究 20 余年,对在以重力为主的荷载作用下,坡体只能由上而下以不同形式或方式,或快或慢地向下滑移或崩落——即斜坡的平动变形与破坏,或均质土坡绕水平轴沿圆弧滑面转动。这种思想在作者头脑中应该说是根深蒂固的。但在 1997 年~1999 年期间,作者在主持西安引水工程黑河水库大坝右坝肩高边坡稳定性研究(杜东菊教授、彭建兵教授为课题负责人)过程中,通过大量的地面调查、钻探、坑槽探、硐探的揭露、地震 CT 勘探、现场多种方法的原位测试、变形监测及大量岩、土样的各种物理力学指标实验,微结构电子显微扫描,能谱分析及全矿物组成分析等综合手段的系统研究,发现有足够证据表明黑河水库右坝肩高边坡变形体为较典型的平面旋转坡体。这种坡体在平面上产生旋转活动,过去很少看到这方面的报导,更不可能有什么研究成果,能够借鉴的成果资料更是罕见。通过阅读大量的国内外有关的文献资料,发现这种坡体滑动形式客观存在,国内外有关专家学者有意无意地对这种现象有所发现,如 E·П 叶米里诺娃(1972)、李明生等(1988)、喻学文等(1996)、王振铎(1997)、孙红月等(1999)。应该说这方面发现是很珍贵的,但都是零散的、孤立的现象描述。坡体平面旋转活动作为一个概念清楚的名词最早提出的,还是我国的王振铎教授。作者在 1998~1999 两年也公开发表了一系列关于坡体平面旋转变形研究的论文,本著就是那些论文的组合。

坡体平面旋转运动是近年来才发现并提出的一个新的斜坡变形形式。经分析研究发现,平面旋转坡体在岩性组成、物质分布、结构特征、边界条件、运动方式及形成机理、变形破坏预测预报、防治等方面与过去习惯上认识的那种以重力为主的外荷作用下,坡体自上而下的同步下移、崩落或绕水平轴立面旋转变形破坏的斜坡完全不同。因此,在产生条件、形成机理、稳定性分析评价、变形破坏预测预报及防治等方面的问题都非过去的传统理论方法所能解答和解决。作者针对黑河重大工程的实际问题作了全面系统的分析研究,阐述了坡体平面旋转的地质标志、监测依据,建立了平面旋转坡体的变形模式,利用多种数值方法模拟了平面旋转坡体的形成,根据平面旋转坡体的活动与悬臂梁工作原理类似的特点,用解析法推导出平面旋转坡体的稳定系数计算公式,阐述了平面旋转坡体的形成条件,确定了平面旋转变形坡体变形与破坏阶段划分的依据,根据平面旋转坡体的稳定性一般高于平动斜坡及其独特运动特点,提出了拱墙抗滑桩与斜布锚索抗滑桩的防治方案,减少了大量的工程投入。因此,可以说该论著具有十分重要的理论意义和实际应用价值。

本专著是以杜东菊教授、彭建兵教授为项目负责人的研究课题为基础,具体分工是:绪论、第三章、第五章、第六章、结论由赵法锁执笔,第一章由赵法锁、程谦恭执笔,第二章由赵法锁、胡高社、胡夏蒿执笔,第四章由赵法锁、毛彦龙执笔,第七章赵法锁、门玉明执笔,最后,由赵法锁统审核定。

此外,胡广韬教授、刘玉海教授、杜东菊教授、彭建兵教授、肖荣久教授、王恭先教授、王兰生教授、李智毅教授、韩文峰教授、宋克强教授、关文章教授级高工、王泰书教授级高工、王芝银教授、黄元谋高工等专家审阅了初稿,其中胡广韬教授、刘玉海教授、杜东菊教授、彭建兵教授、王恭先教授等提出了很有益的具体修改意见。在此,向以上各位专家教授表示真挚的感谢。

由于时间仓促,作者水平有限,错误和谬误难免存在于文中的字里行间,恳请各位读者批评指正。

著 者

1999年10月于西安

目 录

绪言

0.1 国内外研究现状及评述	1
0.2 课题的由来及研究意义	3
0.3 研究的思路及技术路线	4

第1章 研究区工程地质条件..... 7

1.1 自然地理及工程概况	7
1.2 区域地质背景	9
1.3 岩土类型.....	24
1.4 地形地貌.....	26
1.5 地质构造.....	28
1.6 水文地质条件.....	32

第2章 斜坡岩体及结构特征

2.1 工程地质岩组类型.....	33
2.2 岩体结构面及其特征.....	35
2.3 岩体结构分类.....	42
2.4 岩体的物理力学性质.....	43
2.5 岩体质量分级及评价.....	54

第3章 坡体平面旋转的特征与标志

3.1 变形体的形态特征.....	57
3.2 变形体的边界条件.....	59
3.3 变形体底界面的微结构特征.....	63
3.4 变形体底界面带的全矿物分析.....	70
3.5 坡体平面旋转的地质标志及特征.....	73
3.6 坡体平面旋转的监测依据及规律.....	75
3.7 坡体的地震 CT 勘探与成果解译.....	80

第4章 平面旋转坡体的形成机理与仿真模拟

4.1 变形体的组成结构.....	87
4.2 坡体平面旋转的模式与机制.....	89
4.3 坡体平面旋转仿真模拟原理.....	93
4.4 坡体平面旋转的有限元模拟.....	99
4.5 坡体平面旋转的离散元模拟	108

第5章 平面旋转坡体的稳定性研究——悬臂梁理论分析法..... 117

5.1 平面旋转坡体的稳定性分析方法讨论	117
----------------------------	-----

5.2	平面旋转坡体稳定性的塑性极限法分析	118
5.3	平面旋转坡体稳定性的悬臂梁理论分析	121
5.4	平面旋转坡体稳定性的三维有限元分析	125
5.5	平面旋转坡体稳定性的综合分析评价	126
第6章	平面旋转坡体的形成条件	131
6.1	平面旋转坡体的变形与破坏	131
6.2	平面旋转坡体形成的内在条件	132
6.3	影响坡体平面旋转的外部因素	133
第7章	平面旋转变形坡体的防治思路与建议	139
7.1	滑坡防治的系统措施	139
7.2	平面旋转坡体的防治思路	144
7.3	平面旋转坡体的防治建议	147
结论		151
图版		154
参考文献		165

Catalogue

Introduction

0.1	History and present research at home and abroad	1
0.2	Put forward the subject and its research significance	3
0.3	Thinking and technological way in research work	4
Chapter 1	Engineering geology condition in research area	7
1.1	Natural geology and engineering generalization	7
1.2	Regional geology background	9
1.3	Type of rock and soil	24
1.4	Topography and landforms	26
1.5	Geologic formation	28
1.6	Hydrogeology condition	32
Chapter 2	Slope rock mass and its structure characteristic	33
2.1	Engineering rock composition type	33
2.2	Rock structure surface and its characteristic	35
2.3	Structure division of rock mass	42
2.4	Physics and mechanic character of rock mass	43
2.5	Rock mass quality in grades and its evaluation	54
Chapter 3	Slope plane rotation characteristic and its signs	57
3.1	Deformation body and its characteristic	57
3.2	Boundary condition of deformation body	59
3.3	Micro structure characteristic of deformation bottom boundary	63
3.4	Whole mineral analysis of deformation bottom boundary	70
3.5	Geological symbol of slope plane rotation	73
3.6	Control accordance of slope plane rotation	75
3.7	Seismic CT exploration and its explanation to the slope	80
Chapter 4	Forming mechanism and analogy of plane rotation slope	87
4.1	Structure composition of deformation body	87
4.2	Mode and mechanism of plane rotation slope	89
4.3	Analogy theory of plane rotation slope	93
4.4	Finite element analogy of plane rotation slope	99
4.5	Discrete element analogy of plane rotation slope	108
Chapter 5	Stability research of plane rotation slope	117
5.1	Stability analysis method discussion of plane rotation slope	117

5.2	Stability plastic limit analysis method of plane rotation slope	118
5.3	Stability analysis of cantilever beam theory of plane rotation slope	121
5.4	Three dimensional finite element analysis of plane rotation stability	125
5.5	Comprehensive analysis and evaluation of plane rotation stability	126
Chapter 6	Forming condition of plane rotation slope	131
6.1	Deformation and destroy of plane rotation slope	131
6.2	Inside condition of plane rotation slope forming	132
6.3	Outside effect factor of slope plane rotation	133
Chapter 7	Prevention and cure way and advise to plane rotation slope	139
7.1	Systematic way for slide prevention and cure	139
7.2	Prevention and cure way for plane rotation slope	144
7.3	Prevention and cure advise for plane rotation slope	147
Conclusion		151
Plate		154
Reference document		165

绪 言

0.1 国内外研究现状及评述

斜坡包括天然斜坡和人工开挖的边坡,是自然界或工程活动场所具有露天侧向临空面的地质体。它的存在形式和演变,与人类生产、生活及生存发展有着极为密切的关系。正是由于斜坡的出现和存在,大地才环山抱水,奇峰秀峦;各种经济~工程活动才在斜坡地带广泛展开,才有千差万别的工程修建在斜坡附近、斜坡上或坡体内。也正是由于斜坡的存在与它的变形破坏,给人类带来了无穷无尽的烦恼,给人类的生命财产造成严重的损失和危害。

坡体平面旋转运动是近几年才被发现并提出的一种新的斜坡变形破坏形式。平面旋转坡体在岩性组成、物质分布、结构特征、边界条件、运动方式及形成机理等方面与过去习惯上认识的那种以重力为主的外荷作用下,坡体自上而下同步下移、崩落或绕水平轴立面旋转变形破坏的斜坡完全不同。因此,在产生条件、形成机理、稳定性分析评价、变形破坏预测预报及防治等方面的问题都非过去的理论方法所能认识和解决。然而,令人遗憾的是,不仅该方面的研究不多,而且国内外有关的报道也很少,能够借鉴的成果资料更是罕见。但这种不大容易被人理解的坡体运动方式确是客观存在的,人们对这种客观现象也早有发现并进行过尝试性研究。如前苏联著名滑坡专家(Е. П. 叶米亚杨诺娃)1972年在描写伏尔加河右岸的伏尔格勒滑坡体的运动特点时所说“位移量是这样的分布,表明滑体几乎就是固定于其东侧下部的悬臂梁似的水平面上弯曲起来,亦即其弯曲的部分灾变滑动的位移面切断了层理面。”我国对斜坡的这种变形破坏方式进行有意无意描写的也可见到。如:“特别是27号砌石坎延伸方向由原来的南西247°逐渐扭转为南东130°,转角达117°,显示以27号测点为圆心的转动特性”(李明生、徐卫亚等,中国典型滑坡,1988);“浅层旋转滑坡”(喻学文等,工程地质学报,1996, No. 1);“沿上游边界拉裂的旋转破坏型滑坡”(孙红月、尚岳金,工程地质学报,1999, No. 2)。物质分布不均及结构面的组合与坡面的关系会影响坡体变形破坏方式。1977年E. Hoek等人的研究表明:倾向坡外的破坏面与坡面夹角在20°以内,坡体以平动方式变形破坏;当两者夹角大于20°时,如果坡体破坏则要以平面旋转方式为主。1990年王兰生教授等通过物理模拟试验研究表明:当岩层走向与斜坡走向夹角等于零度或接近零度时,坡体产生平动破坏;当两者夹角超过20°时坡体产生平面旋转滑移——拉裂破坏。由上述不难看出:这些发现和探讨都很珍贵,但都是零散的、孤立的现象描述。坡体平面旋转作为一个概念清楚的名词最早被提出的,还是铁道部成都勘察设计院的王振铎教授,他根据铁道边坡的一些特殊变形破坏方式,提出坡体平面旋转运动概念,并对坡体的受力特点作了初步探讨。作者在1998、1999年也连续公开发表了一系列关于坡体平面旋转研究的论文。

从以上资料不难看出,坡体平面旋转变形作为斜坡变形破坏的一种新的形式是近两年才被发现和提出的,其研究工作还刚刚开始。因坡体平面旋转和坡体平动同属斜坡灾害,为

了在平面旋转坡体研究上少走弯路,便于借鉴和比较研究,在此,把近年来斜坡平动变形破坏的研究现状做一简述。

斜坡平动破坏以滑坡最为典型,也最为普遍。滑坡研究可以说由来已久,比较详细的研究自1903年巴甫洛夫的滑坡分类、1927年瑞典圆弧法的滑坡稳定性分析至今已近一个世纪。近一个世纪,尤其是半个多世纪以来,滑坡的研究无论是在勘察技术、机理研究、稳定性分析计算评价方法、预测预报理论还是防治等方面都取得了极其丰硕的成果,研究水平得到空前的提高与完善。作者以我国有关的主要刊物为主,同时参阅少量的外文期刊,对1989~1999年十年来有关滑坡研究公开发表的论文进行了不完全的统计与分析,从这些文献中可以粗略看出目前滑坡研究的内容与理论水平。共粗阅论文近1160篇。按照论文的主要内容(以题目为主)可归类为滑坡勘察技术、斜坡变形破坏规律与形成机理、斜坡稳定性分析评价、斜坡变形破坏监测与预测预报、斜坡变形破坏的加固处理以及综述、评述等,其中最多的是稳定性分析评价方面(406篇,占35%),依次为规律与机理研究(220篇,占19%),监测与预测预报(174,占15%),勘察与技术方法(162,占14%),加固处理(116篇,占10%),其它(81篇,占7%)。

稳定性分析以条分法极限平衡计算及其改进为主,如怎样选择参数或进行参数的分析,如何求安全系数最小可能滑面,如何考虑条间力,变形过程中的塑性变形及能量消散的影响,稳定性分析对地下水数据的敏感性等。其次为概率分析和可靠度分析法的一些论文。还有一些为物理模拟和数值模拟斜坡从变形到失稳的过程,部分还考虑了地震力等外荷的作用。还有两篇是用地质分析和工程类比判断斜坡稳定性的。

斜坡变形破坏规律与机理研究也较多。斜坡变形破坏规律,主要是区域性变化特点、规律,有时间的危险性预测评判,也有空间上的稳定性分区等。机理多以用数值方法模拟斜坡变形破坏的过程为主,还有一个特点是关于坡体高速运动的机理研究方面文献较多,而胡广韬教授的临冲弹性冲击、坡体波动振荡、临冲峰残强降、滑体势动转化、滑床气垫擎托、滑体触变液化及碎屑流滑等高速滑坡机理的总结基本上能概括各论文的研究。

斜坡变形破坏的监测与预测预报研究,这部分可分为两大块:一块是监测技术与方法的研究,一块是预测预报理论与预测预报较为成功的实例报道。斜坡变形破坏监测仍以地表网点监测和钻孔测斜为主。比较先进的是GPS和紫外监测。再有就是如何用计算机检索、筛选、处理和分析监测的大量数据。斜坡变形破坏预测预报自从1965年日本学者斋藤根据岩土蠕变破坏特性提出一种斜坡破坏时间预报方法以来,我国的很多学者、专家、教授也分别从理论、试验和实践等方面对滑坡破坏时间预报理论和方法进行了研究和探讨,代表性的有黄金分割预报理论(黄润秋、张倬元,1991),灰色控制系统增长曲线模型法(晏同珍,1994)及滑体变形功率理论法(徐峻龄、廖小平,1996)。目前,预测预报理论水平是很高的,只要能对斜坡投入监测,其预报的准确率很高,时间也很准确,除1985年5月12日新滩滑坡的成功预报外,还有甘肃永靖黄茨滑坡等也都得到非常精确的预报(表0-1)。

滑坡勘察及技术方法方面的文章除大型滑坡勘察的条件分析评价实例外,大多体现了宏观更宏、微观更微的特点,如用遥感技术大范围勘察,地震CT的斜坡结构勘察及电子显微镜的微结构分析与矿物组成及其形貌特征、排列研究等。此外,一个较为突出的特点是:在滑坡(或变形斜坡)勘察中,与过去相比,变形监测显得较为突出。

表 0-1 滑坡发生时间预测预报表(滑体变动速率法,据徐峻龄 1998)

滑坡名称	滑坡类型及结构特征	发出险情预报时间	预报滑动时间	实际滑动时间	备 注
黄茨滑坡	上覆厚层黄土的顺层岩质滑坡	1995.1.27	1995.1.31 至 1995.2.7	1995.1.30 凌晨 2 时 30 分	提前 1 天
青藏铁路关角隧道东口滑坡	上覆残坡积层的破碎岩石滑坡	1995.8.22	1995.8.24 中午 13~14 时	1995.8.24 中午 13 时 52 分	在 1 小时内
碳化硅厂滑坡	黄土及下伏卵石层沿基岩顶面滑动	1996.2.4	1996.2.5 至 1996.2.6	1996.2.6 凌晨 3 时 51 分	在当天
焦家村滑坡	黄土沿下伏卵石层顶面滑动	1996.2.12	1996.2.13 凌晨 1 时	1996.2.13 凌晨 1 时零 8 分	错后 8 分钟

加固处理方面的文章以处理方案与具体防治工程的设计较多。防治处理的途径与具体措施方法用国际工程地质协会滑坡委员会划分的 4 种途径 32 种具体方法措施能够概括(第 7 章将专门讨论)。目前,在滑坡治理上,耗资最大的要属新西兰 Cromwell 峡谷 Clyde 库岸滑坡,耗资总额达 2.34 亿美元;我国在滑坡处理上耗资也达近亿元,如南昆线八渡站滑坡,治理费用 9000 多万元,四川云阳鸡扒子滑坡治理费用 8500 万元,陕西韩城电厂滑坡治理费用 5000 多万元。

其它方面,主要包括综述和具体的滑体灾害报道及滑坡灾害防治的法规等。

0.2 课题的由来及研究意义

人类的历史,从某种意义上讲,就是同自然界做斗争的历史,是在不断地认识自然、利用自然、改造自然、同自然灾害做斗争的过程中发展起来的。斜坡地质灾害就是与人类生存发展极为密切的且最为严重的地质灾害之一。由于它组成结构的复杂性及外部环境条件的多样性、多变性,使人们难以掌握其所有的变形破坏规律,它给人类的生命财产造成严重的损失和破坏,并继续制约着国民经济的发展。

1996 年 10 月 4 日,陕西省水电工程局的施工人员,正在黑河水库右坝肩开挖清除 2[#]滑坡体时(此时 2[#]滑坡体上缘段 3.9 万方土石已被搬走),发现高出设计坝顶 30~180m,斜长 260m,宽 150m 的百余万方坡体产生显著变形,在山体斜坡 710~779m 高程范围内出现一系列弧形和羽状山体裂缝,最长的连续裂缝可达 400m,裂缝宽度 10~150cm 不等,缝壁直立,深不见底。自发现第一条裂缝起,变形不断快速发展,至 11 月 30 日,不连续弧形裂缝已达 14 条之多,其分布范围之广,发展速度之快,实属罕见。这高悬于引水洞口、溢洪洞口所位于的右坝肩肩顶 100m 多(上顶 190m,下缘 30m 多)的不稳定山体不仅影响水库大坝及附属工程施工,而且还可能影响到能否建坝及将来整个工程的安全运营。由于在大坝选址、初勘、详勘近 20 年的勘察工作中,除发现所选坝址右坝肩的 2[#]滑坡外,并没有发现右坝肩有任何明显变形或不稳定的坡体,清除 2[#]滑坡是为了保证右坝肩的安全稳定,孰知为除小患,却引大患,这是人们所始料不及的。显然这种意外对于竣工有期、截流按倒计时安排、并被陕西省委省政府列为陕西重中之重的基础设施工程的黑河引水工程指挥部决策者来说,不能说不是一件十分头痛的事。当指挥部将此紧急情况向省委省政府汇报后,省委省政府主要领导指示,不惜一切代价,聘请专家或有关科研生产单位分析研究原因,尽快尽早寻求最佳处理方法,决不能因此而影响截流和拖延竣工期限。为此,黑河指挥部将黑河水库右坝肩高陡边坡

变形破坏原因及处理方案设专项开展研究,并以招标方式公开寻求合作单位。经过论证与答辩,杜东菊教授、彭建兵教授为项目负责人的课题组中标,获得该研究的经费资助。我们通过大量的现场勘探、测量、室内实验,根据坡体变形破坏的特点、边界条件特征及标志层的变化和监测资料所反映的变形规律,经深入细致的分析研究,认为黑河水库右坝肩边坡高陡变形体属于较为典型的平面旋转坡体。

尽管我们对平面旋转坡体的认识还很不成熟,但它的确是客观存在的(表 0—2)。由于平面旋转坡体在物质分布、岩性组成、结构面组合、边界条件及运动方式等都不同于平动和绕水平轴的立面转动。因此,在形成机理、稳定性分析评价、预测预报及防治工程使用与布置等方面也完全不同于平动变形破坏斜坡。如坡体的变形破坏模式非平动斜坡的二维模式能够表示出变形特点的;稳定性分析问题是平动变形破坏的分析理论方法所不能解决的,如所研究坡段按传统方法稳定系数在 0.5~0.85 之间(不同断面、不同方法的范围值)。按此稳定系数坡体早已破坏,但它仍较牢固地位于原地。因为传统的稳定性评价方法都是研究坡体的纵向稳定问题,而平面旋转坡体要解决的是坡体的横向稳定问题。正如清华大学周维垣教授在黑河水库右坝肩变形体如何处理的专家会诊会上所说的:“这是我遇到的第二种怪现象,我曾在黄河上游某水电站遇到这种类似情况,位于大坝左坝肩 30 余万方的岩体,怎么算它都将不复存在,但它却非常稳定,用几个水泵抽水从后缘缝中灌入,企图促使它下滑,结果,怎么灌水也无济于事,最后,还是放炮开挖将其取之”;一些变形破坏的预测预报理论方法也同样,与平面旋转坡体不相适应,不论何种预测理论,都根据坡体纵向变形规律,如果进入加速蠕变阶段,斜坡将要破坏,而平面旋转变形坡体后缘裂缝经过快速的加速蠕变且达一定变形量后,斜坡非但没有破坏,反而变形又减慢并停止。由此可见,在理论上对坡体平面旋转这一新的斜坡变形形式进行研究,不仅可以丰富滑坡研究理论,提高滑坡研究水平,推动滑坡学的发展,更主要的实际意义是人们认识了这种客观现象后,能够在勘察中重视它,在稳定性分析评价方面用相应的分析计算公式,在治理上,能对症下药,可经济有效地解决生产中其它理论方法难以解决的重大工程实践问题,使“瞎子摸象”尽可能避免,减少人类的生命财产损失。

0.3 研究的思路及技术路线

该课题研究具有对具体工程负责,以解决重大实际工程问题为主的特点,主要是根据黑河工程实际,通过科学研究,解决黑河水库右坝肩高陡边坡变形体的稳定性与最佳处理方案的这一重大关键技术难题。因此,在研究过程自始至终坚持理论联系实际,为了研究工作有一个扎实的基础,课题组十分重视现场调查、勘探、测试工作,掌握收集第一手资料,同时为了研究的精度和深度,也进行了大量的室内实验,利用现代科学的新理论、新方法,引入系统工程学、非线性科学的思维方法和数值模拟技术,以自己的第一手资料为主,从宏观到微观,从定性到定量,从历史分析到模拟再现等的全面的系统研究。研究的具体内容与技术路线见图 0—1。

表 0-2

坡体平面旋转变形的若干实例

名称	地点	斜坡条件			坡体变形破坏特征			备注
		地貌	地质	水文	时间	规模	特征简述	
右坝肩边坡	西安黑河水库	坡高 300 余米,近 SN 向的坡面,北各有一向 NE、NEE 山梁,高出中部凹地 20~30m	坡体以绿泥石片岩、云母石英片岩为主,局部由含块石粘土覆盖。发育 3 组结构面:①片理及片间断层产状:倾向 190°,倾角 30°;②断层(F ₄₀)产状:倾向 230°,倾角 36°;③构造节理产状:倾向 330°,倾角 75°	黑河从坡脚流过,地下水位较深,坡体中沿倾向坡外层的新层带(F ₄₀)形成上层滞水	1996 年 10 月	长 260m,宽 160m,厚 30~25m,体积约 130 万 m ³	顶缘有明显的裂缝,高程 775m,顶缘北侧及北侧形成张扭和张剪裂缝,裂缝宽度在北上缘为 40cm,南侧上缘裂缝变窄,或逐渐消失,坡体片理面倾角自南而北变缓,各点位移方向不同,总体左旋转动	半扭式(左旋)
火烧寨斜坡	陕西陇县	斜坡右侧有一深 40m 冲沟,左侧沟深 20m,坡面下陡上缓	岩性以砂岩、页岩为主,下为厚层的块状灰岩,表层覆盖有坡残积物。岩层缓倾右侧,倾角 30°左右	坡体右侧沟泉,左侧深沟无水	1981 年	长 150m,宽 200m,厚 20m 左右,总方量 50 余万 m ³	坡体右上方已产生严重变形,错位 20~30cm,几户人家房屋被毁;左上侧远距离滑动,滑距 40m	半扭式右旋
白田坝边坡	宝成线	坡高 120 余米,下陡上缓,总体坡度不足 25°	以砂岩、粘土岩及炭质页岩为主,表层为残坡积层。基层为单斜构造,倾向左下侧,倾角 25°左右	清江从坡脚通过,坡体在雨季常形成上层滞水	1981 年 8 月	长 200~260m,宽 190m,厚 15m,总体积 50 万 m ³	在变形体右上端发育一组弧形张扭裂缝,向左上端逐渐收敛,撇开端形成裂缝带,每条裂缝宽 20~40cm,收敛端仅为一条宽 5~10cm 的裂缝。坡体上的木结构房屋,因坡体扭动而与基础完全分离	全扭式(右旋)
狮子山边坡	成昆线 K ₁₉	坡脚由成昆线通过,相对坡高 20 余米,左角 25°,坡面左凹右凸	变形体以雅安砾石层和成都粘土为主,底界面为白垩系紫红色页岩,母体为页岩,层面平缓,倾角右下倾	坡体中色红紫页岩,长于潮湿态	1974 年	长 40m,宽 80m,厚 15m 左右,体积约 4.5 万余 m ³	变形体右侧有一张扭性旋卷面,撇开端在 K ₁₉ +440 处与线路相交,收敛端在坡体上方,弧形裂缝距线路的距离由右向左增大,宽度变窄,显示左旋转动特点	半扭式(左旋)
伏尔加河右岸滑坡	(苏)伏尔加格勒	变形体顶缘较为平坦,变形体表面较平缓,平均坡度约 16°,具有自坡脚向上一缓一变的特点,第二陡坡段高 10m,坡度 50°	表层为厚度不大的坡积亚粘土,坡体以赫瓦伦粘土为主,次为哈查尔阶砂土,粘土层中含有明显的水平层理,下部为巨厚的察里津阶砂岩	坡体前缘陡下为伏尔加河	1962 年 5 月	长 81m,宽 130~145m,厚 20m,体积 22 余万 m ³	坡体左侧移动了 65~70m,右侧则仅移动 6m,平均转动角 25°左右	半扭式(右旋)

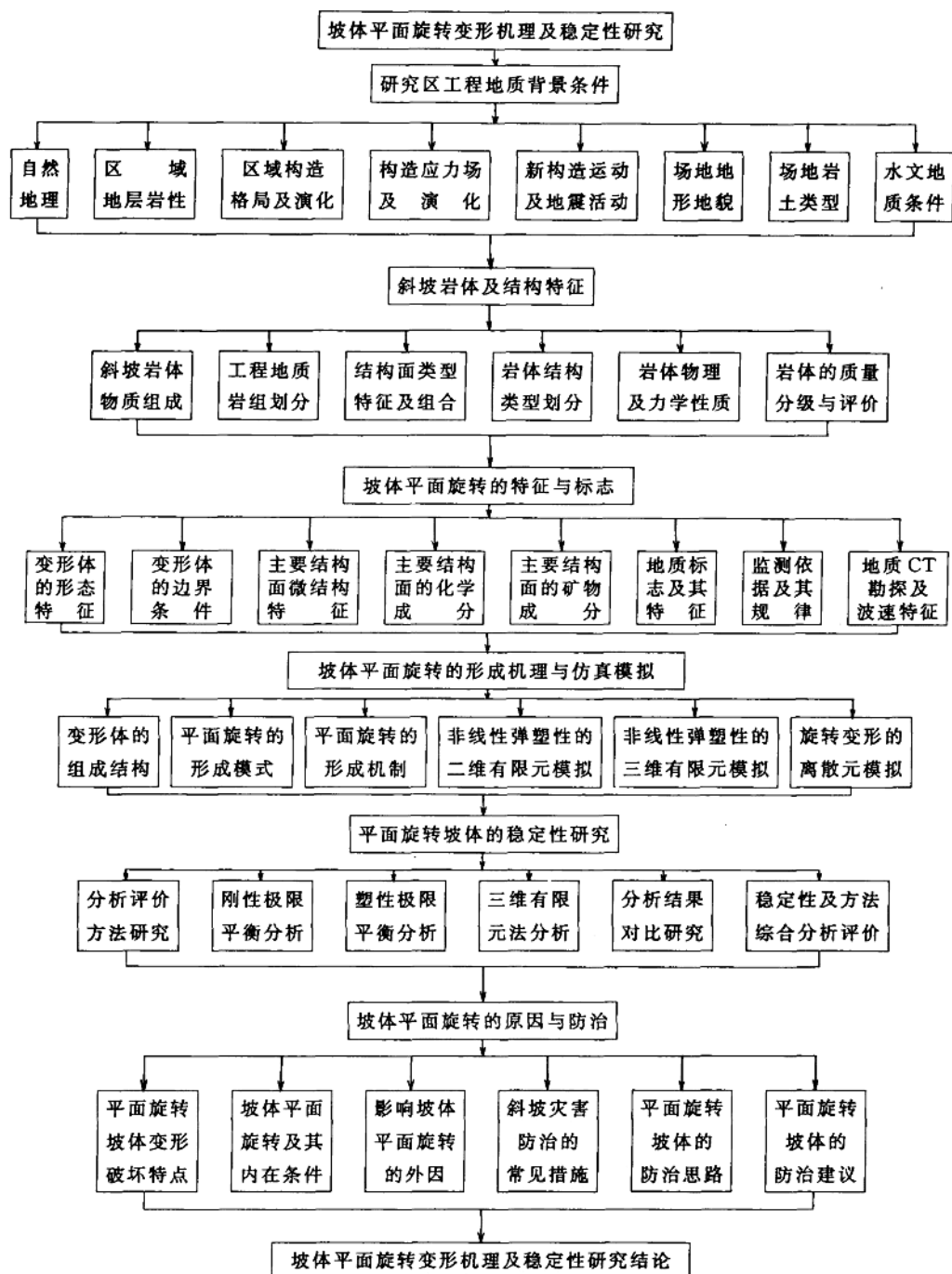


图 0-1 研究内容与技术路线框图

第1章

研究区工程地质条件

1.1 自然地理及工程概况

1.1.1 自然地理

黑河水库是西安市黑河引水枢纽工程的主要组成部分,水库大坝位于秦岭北麓周至县境内的黑河峪口,距西安 93km(图 1-1)。沿山前有蓝(田)一周(至)南环公路、西(安)一宝(鸡)310 国道两条东西向主干公路;正北 20 余 km 为陇海铁路;另有周(至)一汉(中)108 国道沿黑河左岸横穿秦岭,沟通关中与陕南,交通十分便利。

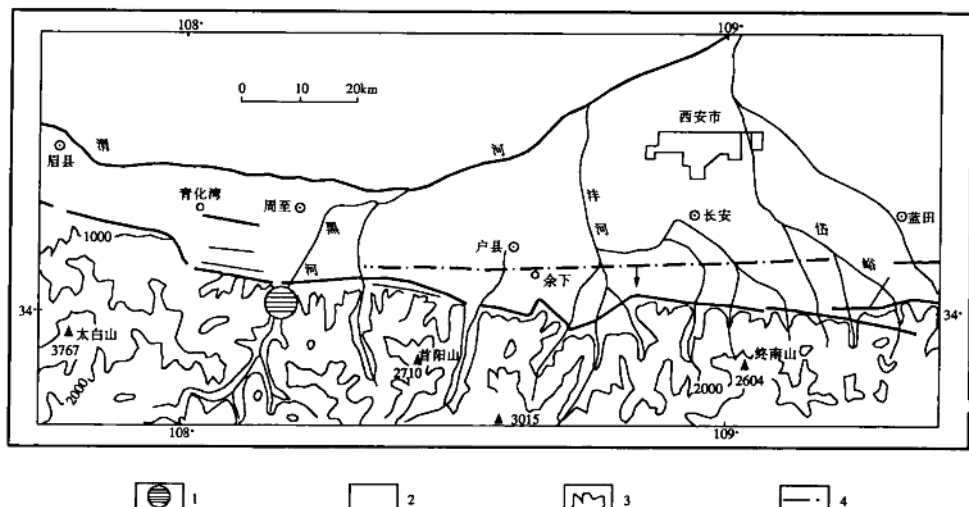


图 1-1 黑河水库地理位置图

1. 在建黑河水库; 2. 渭河断陷盆地; 3. 秦岭隆起山地; 4. 断裂或隐伏断裂

黑河发源于秦岭最高峰太白山主峰拔仙台北两侧第四纪冰川湖泊——大爷海与二爷海,向北穿过蜿蜒曲折的秦岭中部山地,于马召镇东南的武家庄出山,流入渭河。黑河总长125.8km,流域面积2258km²。黑河河道峪口以上的上游河段,比降大,水流急,河源至峪口高差2537.2m,河长96.7km,河道比降3.53%。流域内地形起伏大,地势西南高东北低。北部渭河冲积平原,以东西向的断层为界,与秦岭山地断然分开,两者分界处为河道纵断面变化转折点(图版I)。

1.1.2 工程概况

西安黑河引水工程是建国之后西安市兴建的规模最大、投资最多、关系长远的一项跨世纪的城市基础设施建设重点工程。西安是一个严重缺水的城市,黑河引水工程是以解决西安城市供水为主,兼以农田灌溉及水力发电的综合性水利工程(图 1-2)。其中水库大坝为重

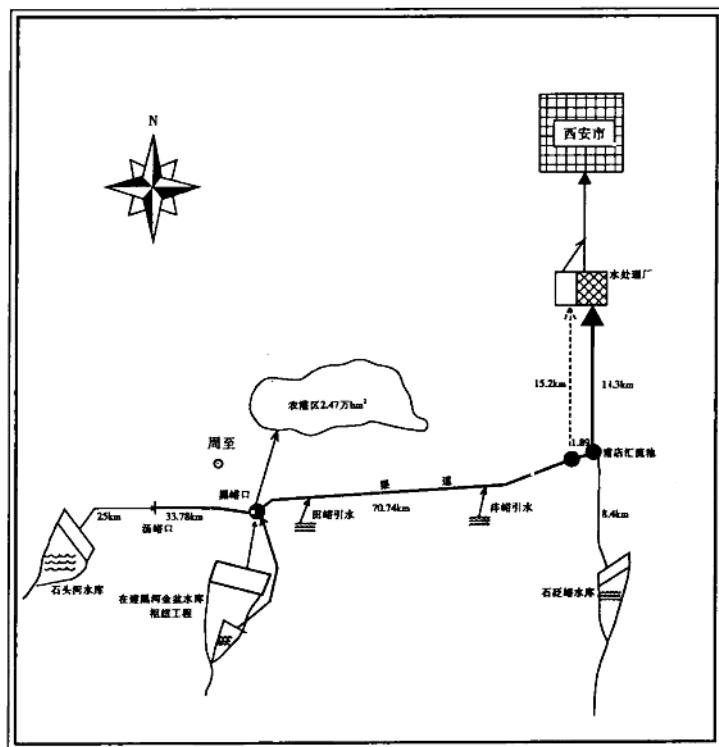


图 1-2 黑河引水工程平面示意图

土石坝,坝高 122m,总库容 1.73 亿 m^3 ,有效库容 1.4 亿 m^3 。黑河水库建成后,向西安市年供水量可达 3.05 亿 m^3 ,平均日供水 74 万 m^3 ,最大引水量 11.5 万 m^3 ,供水保证率为 95% 左右,能够解决长期以来西安市存在的严重缺水状况,同时可灌溉农田面积 37 万亩(约 2.47 万 hm^2),年发电 5696.13 万千瓦小时。因此,黑河引水工程是陕西省近年来建设工程中的重中之重,是功在当代、利在千秋、造福子孙后代的千秋伟业。

1.2 区域地质背景

1.2.1 区域地层

区域出露地层主要为前震旦系宽坪群。宽坪群是北秦岭构造活动带的主要组成部分,在区域上总体呈北西向延伸,横贯本研究区。宽坪群自下而上分为甘峪湾组、大镇沟组和汤峪组(图 1-3),坝址区和库区主要发育前两组地层(表 1-1)。

表 1-1 库坝区主要地层简表

地 层		代 号	厚 度 (m)	主 要 岩 性 特 征
太 镇 沟 组	上段	$Pt_{1-2}d^3$	1988.2	二云斜长石英片岩夹钠长阳起片岩及石英大理岩
	中段	$Pt_{1-2}d^2$	773.6	绿帘钠长阳起片岩和二云石英片岩
	下段	$Pt_{1-2}d^1$	860.2	二云斜长石英片岩为主,夹钠长阳起片岩
甘 峪 湾 组	上 部	$Pt_{1-2}gn^{2-2}$	110.5	绿帘斜长阳起片岩
			5.68	石英大理岩夹含磁铁石英岩
			9.23	绿帘阳起斜长绿泥岩
	段	$Pt_{1-2}gn^{2-1}$	20.4	条带状石英大理岩、石英岩
			10.2	绢方绿泥斜长片岩夹薄层石英岩
			4.87	石英大理岩
			9.49	钙质片岩夹绢云石英片岩
			19.7	绢云石英片岩
			8.2	层纹状石英岩夹绿泥绢云石英片岩
			6.94	石英岩
			9.59	钠长阳起片岩
			39.30	硅化白云质石英大理岩,碎裂石英岩
			45.27	绿帘斜长阳起片岩,绢云石英片岩
	下 段	$Pt_{1-2}gn^1$	51.67	石英岩、磁铁石英岩、白云质大理岩夹绢云石英片岩
			585.5	钠长绿帘阳起片岩

黑河剖面以甘峪湾组为核部,大镇沟组为两翼组成早期复背斜,包括桃园子背斜、望长沟向斜和光秃山背斜,剖面上总体称甘峪湾复背斜(图 1-4)。

研究区宽坪群具有明显的三分性,各岩组均为整合接触。据原岩恢复,甘峪湾组以基性火山岩为主,中上部夹硅镁质碳酸盐岩;大镇沟组以陆源碎屑岩为主,中上部夹基性火山岩