

三峡水利枢纽工程

几个关键问题的应用基础研究丛书

岩石高边坡的 变形与稳定

主 编 张有天

副主编 周维垣



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

三峡水利枢纽工程
几个关键问题的应用基础研究丛书

岩石高边坡的变形与稳定

主 编 张有天

副主编 周维垣



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

该书为中国长江三峡水利枢纽工程重大项目研究的专著。全书共有 12 章,全面系统地论述和总结了岩石高边坡稳定与变形分析的研究成果及其在三峡船闸高边坡设计和施工的应用,主要包括:三峡船闸高边坡岩体宏观力学参数,船闸高边坡及闸室边墙最不利水荷载,船闸高边坡失稳机理与稳定分析方法,边坡分析数值方法新进展,爆破对高边坡稳定的影响,高边坡岩体弹粘塑性时空效应,高边坡锚固作用机理与分析方法,高边坡开挖卸荷机理与稳定变形,高边坡施工性状监测与反馈分析。

该书内容丰富,资料翔实,学术观点新,理论上有所创见,其研究成果在国内外具领先水平。

该书可供从事水利、水电、铁道、公路、桥梁、矿山、建筑等的工程设计、施工、科研人员和有关高等院校的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石高边坡的变形与稳定/张有天主编.-北京:中国水利水电出版社,1999.5

(三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究丛书)

ISBN 7-80124-995-X

I. 岩… II. 张… III. 三峡工程-船闸-边坡-研究 IV. TV882.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 07300 号

书 名	三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究丛书 岩石高边坡的变形与稳定
作 者	主编 张有天 副主编 周维垣
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京密云红光照排厂
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 22.5 印张 520 千字
版 次	1999 年 4 月第一版 1999 年 4 月北京第一次印刷
印 数	0001—3400 册
定 价	39.00 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

国家自然科学基金委员会
中国长江三峡工程开发总公司

联合资助重大项目

项目编号：59493600

总资助金额：910 万元

起止年限：1994 年 7 月～1998 年 12 月

项目负责人 林秉南 陈济生 哈秋舫

项目学术领导小组

组 长 潘家铮

副 组 长 林秉南 陈济生 哈秋舫

成 员 (以姓氏笔画为序)

朱伯芳 吴中如 张有天 周维垣

须清华 董哲仁 储传英 潘庆葵

项目办公室

主 任 董哲仁 高季章

成 员 陈华康 朱光裕 邓湘汉 李雪蕖

序

1994年,在国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司的联合资助和领导下,在学术组长潘家铮院士的指导下,开展了题为“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究”的研究工作。由于这项研究是结合三峡工程建设进行的,在选题时我们根据自己的认识尽可能以三峡工程建设的需要为准。这本书是四年半来研究成果的总汇,有一部分成果已得到三峡开发总公司的采纳。

本项研究是三峡工程研究的补充。不言而喻,解决工程问题必须按既定的时间表进行,因而通常只能根据现有的知识来解决问题。知识之海浩浩荡荡,现有知识犹如沧海一粟,而复杂的工程问题无不错综复杂,现有知识是远不足以给出完备解答的,因此,对工程问题的解答通常只能是近似的。早期常将运转条件和物理过程简化,进行相对简单的试验和计算,并加入个人经验判断,从而给出答案。近代模型试验技术有很大发展,试验范畴也得到扩大,计算机的应用又使大规模的数字计算成为可能,两者共同构成强有力的模拟技术,包括实体模型模拟和数值模拟。应用现代模拟技术可以计入较多的影响因素和较复杂的运转条件及物理过程,特别是不恒定或非定常的过程,为工程师提供较齐备的设计依据。在这方面应提一下国外数值模拟技术目前存在的问题。以泥沙运动的模拟为例,1998年12月曾在香港举行第七次河流泥沙国际讨论会,会上主题报告人是新西兰的娄达奎韦(A. Raudkivi)教授,他指出,目前许多泥沙数学模型成果是计算机软件人员的产品,他们对泥沙运动规律等专业知识是不甚清楚的;他们的研究成果不是基于事实而是基于信念;只是根据他们的计算成果打印出来的图像美丽动人,具有“催眠”作用,这才打动了一些顾客。他还指出,泥沙知识是不完整的,其中还存在着许多“灰色地带”(即规律不清楚的领域),需要进一步研究。对此,笔者深有同感。但应说明,我国的数学模型和泥沙模型试验都是以实测资料和已知的泥沙运动规律为基础的,模拟方法大都是经过实测资料验证的。这是由于我国几十年来进行了大量的水文观测,取得了大量的宝贵资料可供使用。例如为葛洲坝进行的枢纽和水库泥沙模型试验,在葛洲坝建成运转后都得到了良好的验证。然而学无止境,我国的模拟技术还需要进一步提高。目前,为了解决同一问题而建立的若干模型所给出的成果也

还存在一定的差异，原因是人们对有关的规律了解得还不够。要缩小这个差异，便须对一些规律性问题进行研究，以缩小所谓的“灰色地带”。在本课题的所有专题研究领域，都存在着不同程度的“灰色地带”，有待大力缩小。只有不断缩小这些“灰色地带”，才能不断提高水利工程技术水平。这是开展本课题研究的一个原因。

其次，除了上述的规律性探讨外，开展本课题研究的另一个重要原因，便是努力为当前三峡工程建设中提出的一些比较困难的工程课题提供解答或解答的依据。根据工程的规划进度，这些工程课题在开题时还有一定的时间，可用以进一步搜集资料 and 进行较深入的研究。建筑物监测系统设计、反馈设计、船闸输水系统、船闸岩基开挖高边坡的稳定性、特殊混凝土和特殊水泥的研制等便是一些例子。这方面的研究或受众多因素的影响和控制，或涉及多种复杂的物理过程，或各阶段都需要现场资料的印证，或要求在取得现场最新资料后能快速作出反馈设计等。总之，问题是复杂的，工作中遇到的困难是较大的，取得成果是不易的。值得高兴的是，部分研究成果已得到工程建设单位的采用。

该套丛书收入了五部分研究的成果，它反映了我国在水利研究方面的一些新进展。希望这些新进展对其他水利工程建设也有一些参考价值。

在本项研究中，国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司及时而有效地在各方面给予了支持和便利，使工作得以顺利进行。笔者在此谨代表全体人员表示深切的谢意。

中国水利水电科学研究院
国际泥沙研究中心

林秉南

1999年1月

目 录

序

1 概 述	1
1.1 研究岩石高边坡的变形与稳定的意义	1
1.2 岩石高边坡变形与稳定研究的主要内容	2
1.3 本书的简要介绍	2
2 三峡永久船闸施工期地质条件综合评价	5
2.1 前言	5
2.2 前期勘测设计阶段的基本结论	5
2.3 一期工程施工期的地质验证	9
2.4 二期工程施工期的地质条件分析	15
2.5 结论	19
3 岩石高边坡岩体宏观力学参数	21
3.1 总论	21
3.2 岩体及结构面力学参数试验的综合分析	23
3.3 岩石和结构面蠕变特性和本构模型的研究	30
3.4 高边坡岩体结构概化模型的研究	36
3.5 岩体宏观力学参数的计算模拟实验研究	43
3.6 高边坡岩体分析及力学参数的研究	48
3.7 岩体力学参数的应用和检验	54
3.8 结论	61
4 岩石高边坡及闸室边墙最不利水荷载	63
4.1 三峡船闸高边坡稳定分析中的荷载问题	63
4.2 持续降雨对边坡稳定的影响	63
4.3 三峡永久船闸边坡水文地质条件分析研究	66
4.4 三峡永久船闸边坡防渗排水设计简述	71
4.5 降雨过程岩体非恒定渗流分析模型	73
4.6 三峡船闸高边坡裂隙网络及其主要参数	74
4.7 三峡船闸高边坡降雨非恒定渗流分析	79
4.8 三峡永久船闸闸室混凝土衬砌最不利外水压力研究	84
5 岩石高边坡失稳机理和分析方法	86
5.1 前言	86
5.2 边坡稳定极限分析方法的理论基础	86
5.3 二维边坡稳定分析的上限解和下限解	94

5.4	楔形体稳定分析的上限解·····	102
5.5	边坡稳定的三维极限分析·····	108
6	边坡分析数值方法新进展·····	117
6.1	自适应有限元方法·····	117
6.2	DEM 方法·····	128
6.3	DDA 方法·····	144
6.4	FLAC 方法·····	154
6.5	数值流形方法·····	163
6.6	界面元方法·····	176
6.7	人工神经网络分析方法·····	189
6.8	岩体裂隙网络非恒定渗流分析方法·····	205
6.9	岩体三维数字模型·····	214
7	爆破对高边坡稳定的影响·····	228
7.1	概述·····	228
7.2	爆破荷载的分析模型·····	228
7.3	三峡船闸高边坡爆破监测及爆破荷载统计分析·····	231
7.4	三峡船闸高边坡的爆破稳定分析·····	236
8	边坡岩体弹粘塑性时空效应研究·····	241
8.1	绪论·····	241
8.2	三峡工程微新花岗岩三轴卸荷应力—应变全过程试验分析·····	243
8.3	三维粘弹塑性原理及其有限元方法·····	247
8.4	三峡永久船闸高边坡三维粘弹塑性有限元分析·····	261
8.5	结论与探讨·····	270
9	边坡锚固作用机理及分析方法·····	273
9.1	边坡岩体系统锚杆加固作用的物理模拟研究·····	273
9.2	加锚断续节理岩体断裂损伤模型及其工程应用·····	283
9.3	裂隙岩体脆弹塑性损伤三维本构模型与加锚分析·····	293
10	高边坡开挖卸荷机理和稳定变形研究·····	303
10.1	概述·····	303
10.2	弹塑性加卸载准则与开挖的加卸载分析·····	304
10.3	三峡船闸高边坡开挖过程分析系统·····	306
10.4	三峡船闸高边坡岩体裂隙计算机处理及岩体力学参数分析·····	307
10.5	三峡船闸高边坡损伤及流变断裂分析·····	316
10.6	三峡船闸高边坡反分析及变形趋势预测·····	325
10.7	三峡船闸高边坡加固优化措施·····	331
11	三峡船闸高边坡施工性状监测和反馈分析·····	334
11.1	监测系统布置原则和要求·····	334
11.2	监测系统概况和位移监测成果综述·····	335

11.3	边坡位移反分析·····	338
11.4	边坡应力、变形分析及趋势预测·····	344
11.5	结语·····	344
12	总结·····	346
12.1	工作目标·····	346
12.2	工程问题的主要分析结论·····	346
12.3	基础理论方面的进展·····	347

1 概 述

1.1 研究岩石高边坡的变形与稳定的意义

穿过大坝左岸山体的三峡永久船闸为双线五级船闸,其轴线方位角为 $110^{\circ}58'$ 。船闸及上下引航道线总长 6442m。单级闸室尺寸为 $280\text{m}\times 34\text{m}\times 5\text{m}$,开挖最小宽度 38m(闸首处为 58m)。自第一级上闸首至第五级下闸首结构总长 1607m。两线船闸间岩石隔墩宽度为 36~56m,开挖最大深度为 170m。

船闸区地形复杂,沟谷发育。基岩为闪云斜长花岗岩,内含范围不大的片状捕虏体,并有后期侵入的酸—基性岩脉。岩体较完整,弱风化岩石抗压强度大于 100MPa,裂隙不很发育且多闭合,主要断层均与船闸轴线斜交。边坡设计开挖坡度为:闸室微新岩体为直立坡,闸室以上弱—微新岩体为 1:0.3,全强风化岩体大于 1:1。对岩石条件相同,开挖坡度相同的一般人工边坡,只要采取适当支护就可保证边坡足够稳定。但三峡船闸是在山体中深开挖而形成的,直立坡高近 70m,最大坡高 170m。被开挖部位的岩体有量级 10MPa 的水平地应力,约为岩体自重产生垂直应力的一倍。边坡开挖过程就是地应力大范围卸荷过程,由此而带来一系列的一般人工边坡(贴坡开挖的人工边坡由于开挖前一侧临空,垂直边坡的水平地应力已基本释放)所不存在的重大技术问题。三峡船闸闸室边墙采用薄衬护结构,各闸首还有对变形有非常严格要求的闸门。边坡的变形,特别是随时间而发展的变形,将威胁船闸施工期及运行期的安全。尽管对三峡船闸高边坡已进行了包括“七五”、“八五”攻关在内的大量科研工作,但对上述问题或是尚未研究,或是研究深度远不满足工程建设的需要。原因之一是这些问题都是难度很大的基础性问题。国家自然科学基金委与中国长江三峡工程开发总公司决定设立并联合资助的重大基金项目“三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究”,“三峡船闸高边坡若干基础理论研究”列为其中的第三课题,组织国内科研力量从解决岩石高边坡基础性问题,特别是人工岩石高边坡的变形与稳定问题入手,来解决三峡船闸高边坡的重大关键技术问题,为顺利地建成三峡工程做出贡献。众所周知,长江航道通航能力相当于 40 条铁路的运输量,是世界著名的黄金水道。三峡船闸设计最大通过能力为单向 5000 万 t/a,是世界上最大的船闸。三峡永久船闸高边坡的重要性远远超过一般的边坡工程。双线船闸因深开挖形成的受大卸荷影响的四条长、陡、高边坡其工程规模和技术难度都是前所未有的,国内外均无成熟的实践经验可资借鉴。尽管在岩体损伤力学、高边坡稳定分析方法、边坡锚固机理、岩体宏观力学参数、边坡变形机制及岩体渗流分析等方面国内外均有一定数量的研究成果,可作为本项研究的基础。但上述成果均未涉及深开挖、大面积卸荷特定情况下的人工岩石高边坡的变形与稳定问题,这是本项研究所要解决的重大基础性问题。完成这一研究,不仅可以较好地解决三峡船闸高边坡的实际工程问题,而且可将岩石力学理论水平提高到一个新高度,有着巨大的社会效益和显著的

经济效益。

1.2 岩石高边坡变形与稳定研究的主要内容

为了能较好地、全面地解决三峡船闸高边坡由于深开挖、大面积卸荷而产生的变形与稳定重大工程问题，经分析和论证，设立以下 5 个专题（6 个研究内容）：

- 三峡船闸高边坡岩体脆弹粘性时空效应及对工程稳定影响研究
- 边坡失稳机理及三峡船闸对高边坡稳定分析方法的研究
- 三峡船闸高边坡饱和/非饱和渗流分析及排水布置优化研究
- 三峡船闸高边坡锚固机理和布置方案优化研究
- 三峡船闸高边坡岩体分级和宏观力学参数研究
- 三峡船闸高边坡开挖卸荷变形机制及其应用研究（包括爆破影响）

“三峡船闸高边坡若干基础理论研究”课题的负责单位为中国水利水电科学研究院和清华大学。课题负责人为张有天和周维垣，长江水利委员会陈德基为本课题特聘顾问。第一专题由同济大学承担，负责人为孙钧，参加研究的人员有凌建明、张子新、曾德顺、吴刚、袁勇、冯紫良、陶履彬、夏才初、胡玉银、程鸿鑫、曾小清、陆益民、邱柏华、何之民、支国华、杨太华、程桦、黄宏伟、蒋宇静、张晓岳、王如路、杨更社。第二专题由中国水利水电科学研究院承担，河海大学参加。负责人为陈祖煜、张有天，参加研究的人员有汪小刚、王玉杰、何传永、贾志欣、金建文、吴铭江、陈平、刘中、窦铁生、徐昕（中国水科院）、卓家寿、章青、邵国建、扬海霞（河海大学）。第三专题由中科院武汉岩土所承担，武汉水利电力大学参加。负责人为朱维申，参加研究的人员有李术才、陈卫忠、张强勇、任伟中、程峰、邓庞哲、申明晋、白世伟、张玉军、李铀、王拉才、邱祥波、井兰如（中科院武汉岩土所）、陈胜宏、熊文林、张君禄、王劲松、陈尚法（武汉水利电力大学）。第四专题由长江科学院承担。负责人为董学晟，参加研究的人员有夏熙伦、柳赋铮、邬爱清、盛谦、丁秀丽、周火明、徐平、李云林、郭玉、徐春敏、刘雄贞、吴盖华、韩贝传、蔡斌、李端有、李迪、刘允芳。第五专题由清华大学承担，中科院地质研究所、武汉水利电力大学（宜昌）参加。负责人为周维垣，参加研究的人员有张楚汉、杨若琼、王光伦、杨强、金峰、寇晓东、尹健民、肖洪天、强天池、崔玉柱、杜广林、吴荣宗、吴瑞婷、王刚、徐艳杰、赵吉东、鲁军、剡公瑞、任允涛（清华大学）、张菊明、杜永廉、王思敬、刘大安（中科院地质所）、徐卫亚、谢守益、蒋晗、姜平（武汉水利电力大学）。

1.3 本书的简要介绍

“三峡船闸高边坡若干基础理论研究”是国家自然科学基金重大项目“三峡水利枢纽工程关键技术问题应用基础研究”的第 3 课题，也是该项目中资助强度最大，参加研究的单位最多，参加人员最多的课题。1994 年 7 月～1998 年 12 月，经四年半的联合攻关研究，硕果累累。课题所属各专题所出各种类型的主要研究报告和论文总字数估计超过 300 万。这是本专著的基础。所有研究成果都是以基础性研究为出发点，同时结合三峡船闸高边坡的

与变形与稳定有关的实际工程问题。因而又是理论联系实际成果，是具有实用价值的成果。由于三峡船闸高边坡工程规模巨大，问题复杂，关键技术问题难度高，远远超出了当前的水平。必须在当前国内外最高水平的基础上作进一步的开发和突破，可以认为，所取得的成果代表了当前这一领域最先进的水平。

岩石高边坡的变形与稳定在宏观上虽主要属于岩石力学范畴，但实际上涉及包括工程地质、弹性力学、塑性力学、数值方法、爆破力学、施工力学，以及岩石力学等各领域深层次的问题，因此，不可能由一个或几个作者完成撰写工作，必须分工编撰，再合成整体。为了使本专著保持系统性和完整性，必须打破原有专题的框框，通过讨论形成章节大纲，分工写作，再由课题负责人统稿。

经研究，本书的章节安排及编写人如下：

1 概述	张有天		
2 三峡永久船闸施工期工程地质条件综合评价	陈德基		
3 岩石高边坡岩体宏观力学参数	董学晟	邬爱清	盛 谦
4 岩石高边坡及闸室边墙最不利水荷载	张有天	陈 平	窦铁生
5 岩石高边坡失稳机理和分析方法	陈祖煜	汪小刚	
6 边坡分析数值方法新进展			
6.1 自适应有限元方法	陈胜宏	熊文林	
6.2 DEM 方法	金 锋	崔玉柱	
6.3 DDA 方法	王如路	孙 钧	
6.4 FLAC 方法	蒋宇静	张晓岳	
6.5 数值流形方法	强天池	肖洪天	
6.6 界面元方法	卓家寿	章 青	
6.7 人工神经网络分析方法	徐卫亚		
6.8 岩体裂隙网络非恒定渗流分析方法	张有天	刘 中	
6.9 岩体三维数字模型	张菊明	杜永廉	
7 爆破对高边坡稳定的影响	张楚汉	王光伦	徐艳杰
8 边坡岩体弹粘塑性时空效应研究	陆益鸣	孙 钧	冯紫良
9 边坡锚固作用机理及分析方法	朱维申		
10 高边坡开挖卸荷机理和稳定变形研究	周维垣	杨若琼	杨 强
11 三峡船闸高边坡性状监测和反馈分析	李端有	董学晟	
12 总结	周维垣		

本书以工程地质和岩石力学开篇，导引出有关岩石边坡荷载、稳定和变形的各种分析方法，以监测和反馈分析结束。这种安排是想表明本书以基础理论的阐述为核心的紧密结合实际工程的基本思路。工程地质条件及其体现——岩体宏观力学参数是最重要的基础数据。针对三峡船闸深开挖大卸荷的特点，深入地探讨了岩体结构的变化所引发的力学性质变化。除第 2、第 3 章外，其余各章也多有这方面的研究，如第 9、第 10 章。降雨在边坡内引起的暂态水荷载及爆破荷载对边坡稳定十分关键。书中不仅提出了理论方法，而且还针对三峡工程作了具体分析（第 4、第 7 章）。边坡稳定及变形分析方法是本书的主要内容。

既有传统分析方法在理论上和实用上的突破(第5章),也包含了各种岩石力学数值分析方法的最新进展(第6章)。第8、9、10章从不同的方法对三峡船闸高边坡稳定和变形作了全面的分析。以第3章的岩石室内及现场流变试验为基础,第8章进行了边坡开挖时空效应研究,给出了工程所关切的边坡长期流变位移可能范围。第9章专门进行了加锚节理岩体力学特性的研究,为正确的锚固设计提供了理论依据。三峡船闸在开挖过程中不仅有卸载作用,而且也有加载作用。第10章研究了既有卸载又有加载情况下岩石力学性质的变化,提出了理论上和实践上解决这一问题的方法。监测资料是边坡施工及运行期工程性态的综合反映,也是检验基础理论研究成果的重要依据。应该说明的是直到本书撰稿,边坡开挖工程仍在进行。第11章对1998年8月为止的边坡变形资料作了简要分析。本书各章节都分别引用相关断面相关项目的前期监测资料对理论分析作了论证或修正。在这个基础上,对正常施工状态条件下工程完工及今后运行期的工程状态进行了预测。从这个意义上说,本书对三峡船闸高边坡的设计和施工都有前瞻性的重要参考价值,同时本书也将接受今后施工和运行监测资料的检验。

综上所述,本书是一本高边坡工程理论与实践的系统性专著,是结合三峡船闸高边坡攻关研究的基础理论成果的汇总。可以毫不夸张地说,本书把岩石力学理论及其应用推进到一个新的高度。但由于本书是集体研究的结晶,参加本书编写的人员达30余人,内容难免有重复和遗漏,同时又由于主编水平及知识面的局限,本书一定还会存在某些缺点和不足,敬请读者指正。

2 三峡永久船闸施工期地质条件综合评价

2.1 前言

三峡工程永久船闸位于长江左岸山体内,具有线路长,边坡开挖深度大,建筑物结构复杂等特点,对地质条件的反映比较敏感。一期工程揭顶开挖自1994年4月动工,1995年基本完工;二期工程于1996年4月全面开始直立墙开挖,目前一、二、三闸室开挖已接近完成;四、五闸室则已全面进入入槽开挖。同时,按设计及地质要求,直立墙的各类锚固工程有待加快进行,整个工程处于关键阶段。永久船闸二期工程结构型式复杂,施工技术要求高、难度大。针对上述情况,对施工以来永久闸船区的地质情况做一综合分析评价,并与前期勘察成果进行对比以全面认识这一地区的地质条件是非常必要的。

2.2 前期勘测设计阶段的基本结论

2.2.1 基本地质条件

一、岩性

永久船闸区基岩与整个坝址区相同,主要为闪云斜长花岗岩,岩体坚硬完整。岩体中夹有众多酸—基性岩脉和一片岩捕虏体。

二、岩体风化

永久船闸位于左岸山坡地段,风化壳较厚。据统计,风化壳的平均厚度除二闸首、六闸首小于30m外,其他各建筑物地段均大于30m。风化壳底板受地形和构造的控制起伏较大。

三、断层

船闸区地表测绘,闸室段共发现断层77条;3008、3011两条平洞中与建筑物有关的部位,共揭露断层156条。这些断层中长度小于50m的裂隙性小断层约占总数的50%~60%;较大的断层,除 F_{215} 延伸长度较大、斜穿过南北两坡外,其余多出露在一个航槽至隔墩范围内。断层按走向可分为NNW、NNE、NE—NEE和NNW向4组。前两组较发育,占断层总数的64%,规模也较大,但构造岩胶结较好,与船闸轴线交角较大。NE—NEE组亦较发育,约占断层总数的22.4%。该组断层性状较差。走向与船闸轴线交角小于30°的断层分属NNW和NEE组,构造岩胶结较差,对边坡稳定最为不利。但该方向的断层发育程度较弱,占断层总数的14.1%,且规模较小。

四、裂隙

船闸区裂隙较发育。据统计,裂隙线密度一般为0.8~2.0条/m。3008和3011两平洞中平行边坡方向统计,长度大于5m的裂隙的线裂隙率一般为0.4~0.5条/m,较发育地段为1.6条/m(不包括断层影响带和裂隙密集带)。从地表探槽和平洞分别统计,地表和地下

裂隙展布规律和发育程度无明显变化（图 2.1）。裂隙按走向可分为 NEE、NNW、NNE、NNW 向 4 组，与断层相似，但最发育的一组为走向 NEE 组，与断层略有不同。

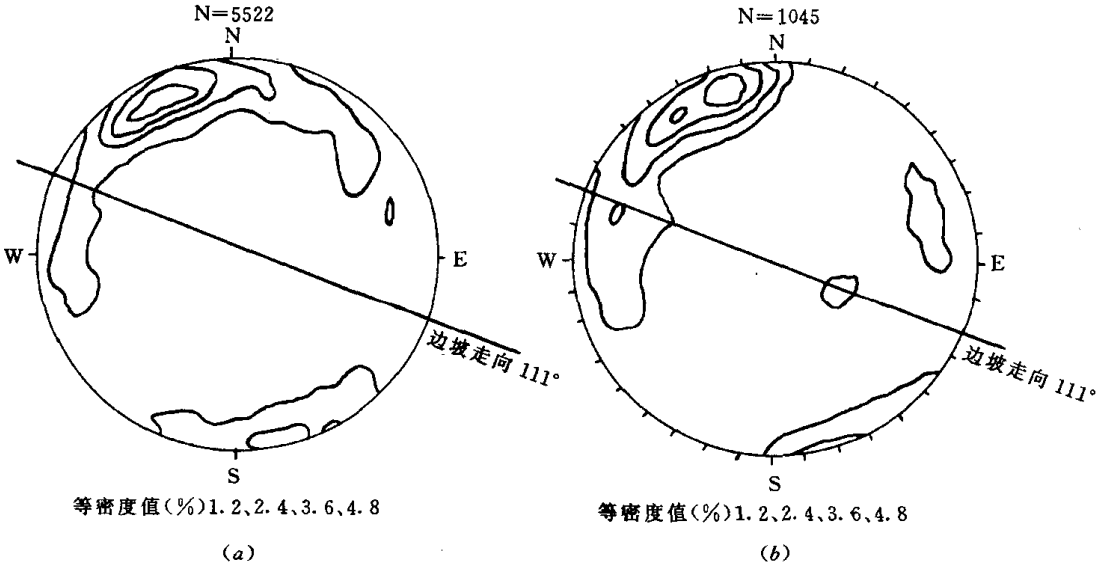


图 2.1 地表探槽与地下平洞裂隙方位统计对比图

(a) 探槽裂隙等密度图；(b) 平洞裂隙等密度图

裂隙的特征以平直稍粗型为主，占裂隙总数的 70.6%。微、新岩体中裂隙面闭合无充填或有钙质、绿泥石、长英质等硬性物质充填，基本上无松散或泥质物，均属性状较好的硬性结构面（表 2.1）。

表 2.1 弱风化下带及微、新岩体裂隙充填物类型及裂隙面特征统计表

裂面特征	充填物类型	无充填	钙质	绿泥石	绿帘石	泥质
	%	36.8	37.8	23.2	2.2	0
	裂面形态	平直光滑	平直稍粗	微弯稍粗	起伏粗糙	
	%	5.3	70.6	23.9	0.2	

五、地下水

边坡岩体由四种水文地质介质组成，即全、强风化岩体组成的均质各向同性孔隙介质水文地质结构 (a)，弱风化上带岩体组成的非均质各向异性裂隙孔隙介质水文地质结构 (b)，弱风化下带及微、新岩体组成的非均质各向异性裂隙介质水文地质结构 (c₁, c₂) 及脉状均质各向异性裂隙介质水文地质结构 (d)。岩体渗透性具有非均质各向异性特征，不同方向裂隙及其组合的渗透性有较大的差别。从地表向下不同水文地质结构 a : b : c₁ : c₂ 的渗透性比值为 7268 : 183 : 3 : 1。

六、岩体结构与岩体质量

根据 3008 和 3011 平洞统计，永久船闸区岩体结构类型列于表 2.2。

表 2.2 各类岩体结构所占比例统计

类别 部位	各 类 岩 体 结 构 (%)			
	整体结构 (A)	块状结构 (B)	次块状结构 (C)	镶嵌结构 (D)
3008 号 6 支	27.9	51.9	16.5	3.7
3008 号 7 支	31.7	53.9	10.3	4.1
3011 主洞	25.7	58.4	10.6	5.3

注 表中数据均只统计弱风化下带及微、新岩体。

从表 2.2 可以看出,永久船闸弱风化下带及微、新岩体中以整体结构和块状结构为主,由二者构成的优、良质岩体占全部岩体的 80% 以上。

七、岩体物理力学参数

船闸区的岩性条件与整个坝址区基本一致,在坝址区历年来进行了大量的室内外试验。永久船闸线路选定后,在其北坡 3011 平洞内进行了一系列试验,综合上述试验成果,提出各类岩体(石)、结构面物理力学参数建议值如表 2.3、表 2.4 所列。

表 2.3 岩体(石)物理力学参数建议值表

岩石名称		风化带	岩体结构类型	岩石抗压强度(湿)(MPa)	容重(kN/m³)	岩体变形模量(GPa)	泊松比	岩体抗剪强度	
								F	C (MPa)
闪云斜长花岗岩		新鲜	块状	90~110	27	35~45	0.2	1.7	2.0~2.2
		微风化	块状	85~100		30~40			
			弱下		次块状	26.8	20~30	0.22	1.5
		弱上		块状	26.5		15~20	0.23	1.3
			强风化	碎裂		25.5	5.0~20	0.25	1.2
		全风化		散体	26.7		1.0~5		1.0
			强风化	碎裂		15~20	0.5~1	0.3	
		全风化	散体	1.0~2	25.5	0.02~0.05		0.8	0.1~0.3
断层构造岩	影响带	新鲜	镶嵌	30~90	26.7	10.0~20	0.22	1.0~1.2	0.9~1.2
		微风化	镶嵌	60~80		0.23			
		弱风化	镶嵌	30~60	26.5	5.0~10	0.25		
	碎裂岩	微风化	镶嵌	50~70	26.1	10.0~20	0.23	0.9~1.0	0.8~1.0
		弱风化	镶嵌	40~50	26	5.0~10	0.25		
	碎斑岩	微风化	镶嵌	50~70	25.8	10.0~15	0.23	0.9~1.0	0.8~1.0
	糜棱岩		镶嵌	25.6	5.0~10	0.25			
			碎裂		0.5~1	0.3			
	F215 软弱构造岩		碎裂散体		0.2~0.5				
闪云斜长花岗岩裂隙密集带		镶嵌	80~90	26.7	10.0~20	0.23			

表 2.4 岩体结构面抗剪强度参数建议值表

结构面类型		抗 剪 强 度		结 构 面 特 征
		F	C (MPa)	
硬性结构面	平直光滑面	0.55~0.65	0.05~0.15	小断层面, 以 3001 平洞 f11 为代表, 面平直光滑, 有时呈镜面
	平直稍粗面	0.65~0.70	0.15~0.20	小断层主断面, 宏观起伏差数毫米至 1cm
		0.70~0.80	0.20~0.30	一般裂隙面, 宏观起伏差数毫米至 1cm, 中型试件起伏差小于 0.5cm
	起伏粗糙面	0.80~0.90	0.30~0.50	粗糙裂隙面及有擦痕断层面, 宏观起伏差 1~2cm, 中型试件起伏差 0.5~1.0cm
	极粗糙面	0.90~1.00	0.50~0.70	卸荷裂隙面, 宏观起伏差大于 2cm
软弱结构面	破碎结构面	0.60~0.70	0.07~0.10	弱风化带上部的疏松-半疏松夹层
	夹软弱构造岩结构面	0.50~0.60	0.05~0.07	F23 糜岩及 NE、NEE 向断层胶结不良构造岩
	软弱构造岩	0.25~0.40	0.05~0.10	F215 断层的软弱构造岩, 强烈风化, 松软
	泥化面	0.25~0.32	0.03~0.05	NNW、NNE 向较大断层主断面中的泥化面及其他含泥化物的结构面

八、地应力

永久船闸地区前期勘测阶段曾进行过较多的地应力测量。各闸室底板处地应力值见表 2.5。较稳定的最大水平主应力的方向为 $N40^{\circ}W$ ，与边坡走向夹角 29° 。

表 2.5 闸室底板岩体地应力值

部位 项目	一 闸 室	二 闸 室	三闸室 (闸首)	四 闸 室	五 闸 室
底板高程 (m)	123.70	112.95	92.20	71.45	50.70
最大水平主应力 (MPa)	9.50	9.70	9.97 (10.65)	9.70	7.72
最小水平主应力 (MPa)	7.20	6.86	7.50 (7.69)	7.35	7.23

测试结果表明，各闸室底板处地应力水平相近，属中等偏低地应力水平区。

2.2.2 边坡稳定性评价

一、整体稳定性

船闸区具备形成高、陡边坡的岩性、构造、岩体结构和岩石力学特性等基本条件。结构物所在部位以微、新岩体为主，岩体完整，整体强度高；主要断层、岩脉等 II、III 级结构面的走向与边坡走向的夹角多大于 30° ，不具备形成边坡整体平面滑动的条件。IV、V 级结构面走向与边坡走向的夹角多大于 35° ，连通性差且中缓倾角结构面不发育，不具备追踪多组结构面形成平面或圆弧形整体滑动的边界条件；区内地应力、地震力水平不高，对边坡的稳定性影响有限；渗压力对边坡稳定性影响显著，但采取合理措施能有效降低高边坡内的水压力。

船闸区可能出现影响边坡整体稳定的破坏形式是少数近 EW 向的长大结构面在边坡出露，形成平面或双面滑动。平面滑动只有当顺坡陡倾角滑动面在临空面出露时才能产生；双滑面型则是由平行边坡的顺坡陡倾角与构成底滑面的中倾角结构面组合成折线形整体滑移。统计结果表明：走向与船闸轴线交角小于 30° 的断层只占闸室段断层总数的 14.1%，且基本上属于长度小于 50m 的裂隙性断层，多属 IV 级结构面；作为底滑面的中倾角断层出现概率更低。所以由近 EW 向的顺坡结构面形成的边坡整体滑移数量有限，规模也不大。

二、局部稳定性

边坡局部稳定性是指在高度和宽度上仅占边坡整个断面一部分的岩体的稳定性问题，主要由结构面组合形成的可动块体的数量和稳定性所决定。根据块体位置的确定程度将几何可动块体划分为定位块体、半定位块体和随机块体三类。

1. 定位块体

定位块体是指由断层与断层（或规模较大的岩脉）组合形成位置可以确定的可动块体。根据地表测绘、钻孔中揭露的断层，通过不同高程平切面图分析判断，共搜索出定位块体 8 个，体积在数百立方米至 1万 m^3 之间；利用 3008 和 3011 两平洞素描所确定的断层，推测至永久船闸边墙，确定在边墙出露的定位块体 3 个，体积在 $1000\sim 3000\text{m}^3$ 之间；经分析计算，上述定位块体在自重加全水头条件下都处于稳定和次稳定状态。

2. 半定位块体