

长江三峡工程

岩石边坡卸荷岩体 工程地质研究

——永久船闸陡高边坡岩体力学研究（一）



中国建筑工业出版社

长江三峡工程
岩石边坡卸荷岩体工程地质研究
——永久船闸陡高边坡岩体力学研究（一）

哈秋舫 刘国霖 著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

运用系统工程的理论与方法,研究三峡工程永久船闸陡高边坡节理岩体卸载的应力应变,是理论上的创新。针对工程实际的工程地质研究,是系统工程研究的基础,是系统工程的重要环节。本书第一部分,叙述系统工程中地质研究的指导思想与技术思路。第二部分,论述成岩建造与构造改造对岩体损伤的地质背景与演绎,形成岩体力学各向异性的特征。第三部分,针对永久船闸陡高边坡特点,讨论复杂地质环境下地应力变化规律;提出工程优势面与渗流优势面对工程影响的清晰概念。第四部分,研究地质力学分类,运用霍克—布朗准则,进行岩体力学各向异性参数的定量研究,并对岩体力学参数的卸荷衰减作了系统深入的分析。

本书可供工程地质工作者及水利、交通、地下工程等技术人员阅读和参考,也是高等院校师生的重要参考资料。

* * *

长江三峡工程

岩石边坡卸荷岩体工程地质研究

——永久船闸陡高边坡岩体力学研究(一)

哈秋龄 刘国霖 著

*

中国建筑工业出版社 出版、发行(北京西郊百万庄)

北京顺义板桥印刷厂印刷

*

开本:850×1168毫米 1/32 印张:3½插页:1 字数:92千字

1997年9月第一版 1997年9月第一次印刷

印数:1—1,050册 定价:8.10元

ISBN 7-112-03058-7

TU·2346 (8589)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

三峡工程永久船闸，具有长、大、陡高边坡的特点，世界上尚无先例，是三峡工程建筑中的关键技术课题。船闸结构对变形要求高，而两侧边坡岩体又具有卸荷后复杂多变的特点。本书应用系统工程方法，按照全面充分地认识岩体，保护岩体，有效而适时的支护岩体，全过程有针对性地监测岩体的四项工作方法准则进行研究。工程地质属认识岩体的基础工作，在认识岩体过程中，与各专业紧密协同进行，从地史演变过程入手，研究成岩建造与构造改造，了解岩体的缺陷与损伤，查明岩体的各向异性特性；经地史演绎研究，明确了区域主应力场的变迁情况及现在的构造主应力场方向为北西西。工程范围的地应力，因地形刻切与构造切割，已调整为二次应力场，有释放，也有集中，具体实测数值不适合于作数值回归分析。采用宏观与微观相结合的分析方法，建立应力梯度方程，获较佳成果。由地史演绎，紧扣工程特点，注意和强调工程优势面，以及地下水渗流活动中的渗流优势面，重视地应力、工程优势面、渗流优势面三者耦合对边坡的劣化。在工程研究中，注意影响岩体力学特性的诸多因子，明确诸地质因素对工程岩体力学各向异性系统参数值的影响，运用宾尼沃斯基的岩体分类和霍克-布朗的岩体强度破坏准则，进行了适当补充与修正，使之适用于岩体各向异性参数值及其劣化演变值的求算。这一修正，更有利于应用经验方法，对岩石边坡工程的岩体宏观力学参数值研究、岩体力学试验、岩体节理渗流分析作出有效的贡献。运用本理论，进行地基与地下洞室研究，亦有实用的指导意义。

本著作在研究和写作过程中，得到了潘昭汉教授、陈先明工

程师、樊昌斌高级工程师、刘建鸣工程师在素描、制图和软件编制工作等方面的帮助，并获得蒋镇华、赵洪、刘建茹诸女士的全力帮助和支持，在此一并表示感谢。

著 者

1996.12

目 录

第1章 绪论

1.1 三峡工程永久船闸陡高边坡概况	1
1.1.1 工程简介	1
1.1.2 工程特点	3
1.2 工程地质研究	5
1.2.1 工程地质研究概况	5
1.2.2 我国工程地质研究的现状	6
1.2.3 本书的技术思路与特点	8
1.2.4 研究方法特点	10
1.3 研究内容与说明	12
1.3.1 基本研究内容	12
1.3.2 关于研究中的一些说明	12

第2章 地史演泽与区域构造研究

2.1 成岩环境与演变	15
2.2 构造环境	15
2.2.1 大地构造格局	15
2.2.2 构造体系	16
2.3 构造运动与演变	17
2.3.1 成岩过程中的构造与演变	18
2.3.2 晋宁变动期末的构造环境	19
2.3.3 澄江变动	19
2.3.4 印支变动	20
2.3.5 燕山变动	21
2.3.6 喜马拉雅山变动	22

2.4	损伤面形成概况	25
2.5	缺陷与损伤对岩体均一性的影响	25
第3章	永久船闸区的工程地质研究	29
3.1	地质简况	29
3.1.1	基岩	29
3.1.2	断裂节理	30
3.1.3	岩体风化	32
3.1.4	水文地质概况	33
3.1.5	岩石的物理力学特性	34
3.2	主要的工程地质问题	36
3.2.1	地应力	36
3.2.2	工程优势面	53
3.2.3	渗流优势面	64
第4章	工程地质力学研究	71
4.1	影响岩体力学的诸因素	71
4.2	岩体宏观力学参数研究	73
4.2.1	几种岩体分类	73
4.2.2	霍克-布朗准则	86
4.2.3	三峡工程永久船闸陡高边坡区岩体力学研究	91
第5章	地质研究成果对边坡稳定分析的影响	97
5.1	成岩的建造与改造所形成的工程地质特性	97
5.2	地应力规律及其变化	98
5.3	工程优势面	98
5.4	渗流优势面	98
5.5	影响岩石力学特性的诸因素	99
5.6	结语	100
参考文献		

第 1 章 绪 论

1.1 三峡工程永久船闸陡高边坡概况

1.1.1 工程简介

三峡工程永久船闸是国内外最大的通航建筑物，是我国黄金水道川航的人工咽喉，是三峡工程建设中难度最大的工程项目之一。它布于坝址左岸距长江 1600 多 m、高程 260m 以上的大山体中。采用轴线方向为 111° 的双线五级连续船闸，单级闸室有效尺寸为 280m（长） $\times$ 34m（宽） $\times$ 5m（水深），五级船闸总长 1617m，加上上游引航道长 2113m，下游引航道长 2712m，人工航线总长 6442m。在三峡工程枢纽区，长江为一 110° 的河曲地形，左岸为凸岸，布设的永久船闸航线，可与上下游长江航线直线相接；横贯于大山体内的船闸深槽，其两侧边坡坡度，在全、强风化带为 1:1.5~1:1，弱风化带为 1:0.5，微风化带为 1:0.3，闸室部分 40~50m 高的边墙为直立，边坡部分最大的开挖深度达 170m，形成人工边坡长、高、陡的特点。（图 1-1、1-2、1-3）

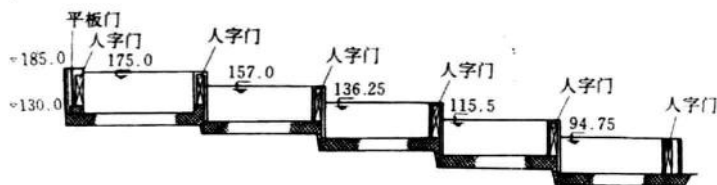


图 1-2 三峡枢纽连续五级船闸剖面图

1.1.2 工程特点

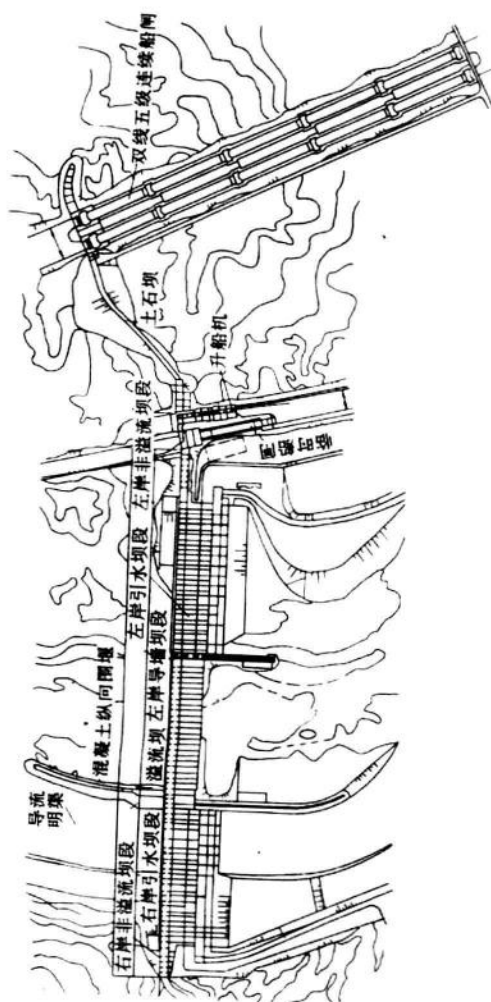


图 1-1 三峡枢纽平面布置图

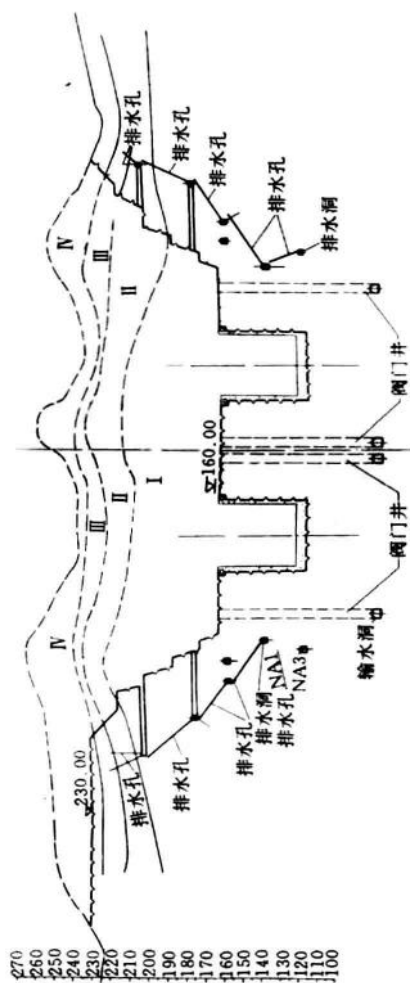


图 1-3 16号剖面断面图



图 1-4 永久船闸 170 高程以上的北坡全景

三峡工程永久船闸，位于自然状态稳定、应力状态平衡的大山体中，经深切开挖所形成的开敞式深槽内，其南北两侧为长、高、陡边坡。边坡岩体的应力自平衡体系遭严重破坏，呈现卸荷区域大，卸荷程度复杂，岩体变形模量呈非线性蠕变的劣化过程。它不同于应力已长期缓变释放，并处于暂稳状态的自然边坡，也不同于应力调整形成自然拱的一般地下洞室。被多组陡倾节理切割的边坡岩体，在大量开挖卸荷下，基本无侧限条件，加上在边坡内还要布设一系列井洞，造成对岩体的一定程度伤害，所以其稳定与变形问题十分突出。船闸区在实施与运营过程中，有人类的频繁活动和大型船队通过，不允许陡高边坡岩体有任何大的定位块体和小的随机块体发生失稳；在闸首部位，有巨型金属闸门与其配套构件以及机电设备等，它们对边坡变形要求很严，不允许有过大的时效变形。可见，工程在实施此岩体陡高边坡时，限制性要求高，技术难度大，国内外尚无先例（图1-4）。

1.2 工程地质研究

1.2.1 工程地质研究概况

三峡地区三大岩类齐全。有大面积元古代的酸性岩浆岩和小的酸、中、基性岩脉；有太古代崆岭群深变质岩系，也有元古代神农架群浅变质岩系；沉积岩则自震旦纪至第三纪的地层出露较完整，各类接触关系齐全，是一完整的地质博物馆。我国一些著名地质学家，自本世纪20年代起，先后在这一地区进行了许多有价值的基础地质研究。建国以来，先后有全国知名度较高的数十个生产、科研和教学部门参加了三峡工程的工程地质研究，资料极为丰富。鉴于陡高边坡的挑战性难题，国家科委针对需研究的一系列关键技术问题，制定了“七五”与“八五”重点科技攻关任务。本书主要是85-16-03-05（03）专题三峡工程永久船闸陡高边坡工程关键技术研究课题的第一子题：“三峡工程永久船闸陡高边坡区的地质背景与演变及地质工程态势特征研究”的成

果。面对举世瞩目的三峡巨型水利水电工程，引起众多外国人的关注。在 1979~1995 年期间，先后有美、法、意、日、澳、瑞典、挪威、加拿大等国家机构、国际组织、世行及私人公司等知名专家和学者，参与了三峡工程有关地质问题的技术咨询、交流与合作。对三峡永久船闸工程，他们有许多好的经验，但是也无特殊思路。解决三峡永久船闸陡高边坡的关键技术难题，仍需作全面研究。

1.2.2 我国工程地质研究的现状

经过建国以来几十年的工程建设实践与经验总结，在水利水电建设中，总结了如下宝贵经验，并基本为工程建设各个专业所共识。这一经验是“在水利水电建设这一利用自然、改造自然的过程中，要利用有利，改变不利，变不利为有利”，这是一高度概括的正确原则。但在专业分工较细，专业间职责分明，相互了解渗透不够的情况下，彼此间对原则的理解与认识有差距，也就难于达到认识上的真正统一，所以工程实践中基本未能达到最优效果。

我国工程建设各专业间的一般联系形式如下图所示：

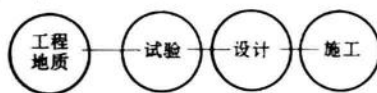


图 1-5 联系框图

所以在各专业分割的情况下，在工程实施中不能获满意结果。随着工程实施过程经验教训的积累，不少单位已注意到各专业间的紧密协调，其联系形式发展如下图。



图 1-6 联系框图

显然，后者的相互联系与渗透已有很大进步。

随着国民经济的迅速发展与中西部的改革开放，黄河上游、三江地区、红水河等能源基地的兴建加快，岩体边坡工程在国民经济建设中，占有日益重要的位置，但在中高山区的水电建设中，重大事故频繁，经济损失巨大，教训深刻。如漫湾水电站的坝基开挖，引起左岸严重的岩体滑移，为避免引起更大范围的岩体失稳，被迫减少一台装机。天生桥水电站（Ⅱ级）厂房为避开原有不利地质条件，将厂房平移至 50m 高的背斜小山包处，因开挖切去了岩体支撑，造成 150 万方后山体滑移，以及南坡应力释放所形成的折倒、松弛与崩坍，增加处理工作量和延长了工程工期。五强溪水电站的左山坡，开挖边坡接近原有自然边坡坡度，许多科研单位均参与研究，采用了各类计算方法，所得安全系数值较高，但基础开挖后，边坡出现明显的鼓胀开裂，其长期效应令人担忧。隔河岩水电站厂房后边坡最外侧的引水钢管部位，发现岩体开裂现象，现正进行补强研究。还有安康、龙羊峡等工程的边坡问题，已有专著与论文详细报导，故不再多述。当这些工程出现上述岩体边坡问题时，工程地质工作者承受了巨大压力，但在这些大型工程中，负责进行工程地质勘测研究的技术领导与参与指导的技术专家，都是经验丰富、工作仔细、认真有名望的地质工作者，在研究中，洞井与槽坑工作量大，钻孔密度远高于世界各国，地球物理勘探钻孔电视等先进手段多已广泛采用，俗语称之为剥皮掏心，早已达透视程度，描述性地质工作，已达较完美程度。但面对高山区所出现的一系列失败教训，表明原有工程地质的技术思路，并未全面理解工程地质的真正内涵。所以目前的工作状态可能难于突破所面临的永久船闸陡高边坡稳定这一挑战性课题。

工程地质的原有概念是：研究工程地区原有的自然地质环境，并预料在施工及工程运营中岩土将发生的一些变化，推测建筑物与地质环境的相互作用。现在一般都按此概念进行研究，既进行定性描述，又进行初步定量研究，但是计算结果往往与实际

不符。有的工程研究结论为安全，却出现颓变；有的工程认为有问题，但运营后能屹立无恙。究其原因，都是将复杂问题表面简单化所致，没有真正认识和掌握问题的实质与内涵。

1.2.3 本书的技术思路与特点

工程地质的内涵——土木建筑工程，须利用和依托自然地质体，故必须认识和了解自然地质体的形成和历经过的构造运动演变，现在所处地质环境的状态、工程施工与运营中可能发生的变化和发展。即工程地质要研究岩体的成岩建造缺陷与后期经历各期构造运动改造所造成的损伤，现在所处的地质环境与应力状态，工程实施与运用期，自然环境变异所引起的颓变演化等。它属于土木工程大系统工程中的一个子系统工程，它不单与试验科学紧密融合，还须与设计施工及监测等相互渗透。其与各学科的联系形式如右图。

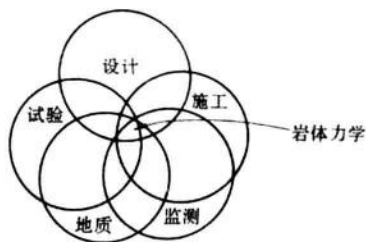


图 1-7 联系框图

由上图可知，在岩体工程中各专业的共同挈领区是岩体力学。

运用系统工程的理论与方法对涉及多学科的岩石工程的研究是十分必要的，其总原则是充分利用岩体自身的承载强度。其实施步骤：

(1) 首要的具体任务是全面深入研究和认识岩体的自身特性和各种力学条件。

(2) 注意充分利用岩体自身强度和条件。所以从勘测设计至工程实施的全过程，要尽力保护岩体，不使它受到过多伤害。

(3) 由于岩体受成岩建造和构造改造所造成的一些损伤和缺陷，在实施工程中，经历降维变态形成新的工程地质环境以前，应有效而适时的进行支护，必要时应在工程实施前，预先进行加固处理。

(4) 岩体是较复杂的自然介质，具有诸多不确定性的岩体力

学特性，就是经验十分丰富、造诣很深的专家，所给出的确定性解，也不会十分准确，因而必须采用有效手段，针对岩体在工程中应力应变状态，进行全过程监测，以检验认识与论断在工程实施中的正确程度，出现不利的特殊情况时应进行必要补救。

这是系统工程理论中，正确逻辑思维与工作步骤的四项工作准则。以此原则和方法，指导引滦入唐部分工程，获较完美效果；以此指导岩体边坡工程，亦可获得与一般理论研究结论不同但与实际情况接近的成效。

在系统工程运筹过程中，工程地质研究是总体的基础，在进行宏观与微观地质研究中，均具工程针对性的特色；对工程地质的认识，既不能满足于定性的一般描述，更不能局限于一般原理的定量研究，应具岩体力学与工程的研究理论水平，使工程地质更具明显的力学性质。应该认为岩体力学是工程地质的重要组成部分。许多从数学与力学方面着手来研究岩石力学的学者，将岩体描述为“复杂多变”，认为“在岩石力学研究领域中的多种问题，既有随机性，又有模糊性，而且更多的是非线性”，这种精辟的概述，阐明了岩石力学的不确定性。但在具体工程中，要求有确定性解，特别是巨型工程，必须确定出影响安全与经济的巨大隐患。工程地质肩负着参与解决这一问题的艰难基础性任务。面对上述任务，要求工程地质工作者，不仅有系统的地质工程概念，还须有科学试验、工程及力学方面的清晰概念，即要求工程地质人员要有一定的技术素质，能与有关学科融合为一体，使研究内容具有整体性。

工程地质的首要任务是：在区域地质环境中，要找出构造中的安全岛，作为建筑物基础。在建筑物范围区，面临着主体建筑物的基础稳定、洞室稳定、边坡稳定的难题，其判别标准，则依据建筑物不同特性所提出的不同要求而异。边坡稳定标准，一般是指发生溃决与崩滑灾变的可能性与安全系数值。但三峡工程永久船闸陡高边坡的下部，安装有尺寸很大，精度要求很高的金属结构闸门等设备，所以有不允许闸门位置出现过时效变形的极

度严格要求。不测事故将造成巨大的经济损失。紧紧围绕这一特殊的严格要求进行地质工作，可显示此工程地质研究，更具有工程针对性的特色。

要解决大面积开挖所形成的人工陡高边坡的崩滑稳定与变形稳定问题，工程地质首先须明确这种边坡卸荷区域大，卸荷程度复杂，卸荷过程中基本无侧限条件。对组成边坡的花岗岩体，既有坚硬完整的盘石概念，又须注意成岩建造中的缺陷和构造改造中的损伤对盘石劣化的情况。对造成岩体损伤的宏观结构面的发育与空间展布情况，应有清晰的立体概念。岩体力学指标是宏观完整岩体受损伤后的残余强度值，其各项具体的力学指标，取决于岩体中结构面的发育，以及结构面与作用力的性质和方向的关系，具有明显各向异性特性。在确定顺坡向岩体力学的量化值时，要依据实地的地质条件和试验中所取得的宝贵信息。采用地质力学指标研究法，又称经验法，结合监测成果的反演来综合确定，并研究和预测工程实施中岩体力学的动态变化与劣化演变。工程地质研究如上述那样紧密融合于岩体工程的系统研究中，则使其更具力学性质。

1.2.4 研究方法和特点

遵循常规的科学方法，突出工程针对性特点。

(1) 充分利用原有资料，博览尽一切可能得到的前人有关三峡地区的丰富地质成果，特别是长江水利委员会的初步设计报告和永久船闸工程地质勘察报告及有关论文，汇集各种学派论述的观点，针对工程特色和工程岩体力学特性的实际要求，进行筛选。在慎思、明辩和实际验证中，取其真实信息，去其不当的推测与论断，做到取其精华，使其在三峡工程永久船闸陡高边坡研究中发挥作用。

(2) 研究区域地史，研究岩体的宏观缺陷与损伤及地应力变化规律

从地史发展研究花岗岩体的成岩建造与历次构造运动作用改造造成岩体的成岩缺陷与宏微损伤。研究中依据宏观素材，由岩