

岩体结构、岩体质量及可利用性研究

YANTI JIEGOU YANTI ZHILIANG JI KELIYONGXING YANJIU

● 聂德新 杨建宏 崔长武 李树森 著

地质出版社

国家自然科学基金 (40072090)

成都勘测设计研究院“溪洛渡坝基岩体工程地质研究”项目资助

岩体结构、岩体质量及 可利用性研究

聂德新 杨建宏 崔长武 李树森 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以我国第二大水电站溪洛渡坝基岩体为研究原型,以丰富的第一手资料,深入地介绍了岩体结构现场调查技术、研究方法;以岩体结构、岩石介质、岩体波速、岩体完整性、岩石质量指标、结构面的切割程度等多项量化指标研究了岩体风化的综合分带,研究了河谷岩体卸荷。用多因素指标对坝基岩体质量进行分级,较为深入地分析了高拱坝地基可利用岩体的基本标准,用多项指标对拱坝建基面的位置进行了评价。

本书可供工程地质、岩土工程和工程建设的科技人员、高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体结构、岩体质量及可利用性研究/聂德新等著.
北京:地质出版社,2008.1
ISBN 978-7-116-05578-0

I. 岩… II. 聂… III. 坝基-岩体-结构-研究
②坝基-岩体-质量-研究 IV. TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 008692 号

责任编辑:孙亚芸

责任校对:韦海军

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324569(编辑部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京长宁印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:14.75

字 数:350 千

印 数:1—700 册

版 次:2008 年 1 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:42.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-05578-0

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

目 次

1 绪 言	(1)
2 岩体结构研究	(5)
2.1 概 述	(5)
2.2 结构面分级	(6)
2.2.1 国内结构面分级概况	(6)
2.2.2 溪洛渡坝址结构面分级	(8)
2.2.3 不同等级结构面的研究方式	(9)
2.3 溪洛渡坝基、坝肩岩体结构面精测及基本要素的获得	(9)
2.3.1 结构面现场精测	(9)
2.3.2 现场测量资料的处理	(10)
2.3.3 结构面工程要素的获得及特征	(11)
2.4 岩体结构划分方案	(15)
2.4.1 国内外岩体结构分类概况	(15)
2.4.2 溪洛渡岩体结构分类方案	(19)
2.5 两岸坝肩岩体完整性、裂隙间距变化特征及对应性	(20)
2.6 岩体结构分类各量化指标间的关系及主要指标的选择	(25)
2.7 两岸坝肩岩体结构及空间变化特征	(26)
2.8 坝基岩体结构	(28)
2.8.1 338 ~ 330m 高程段河床及坝基的岩体结构	(29)
2.8.2 330 ~ 320m 高程段河床及坝基的岩体结构	(31)
3 河谷岩体风化、卸荷的研究	(34)
3.1 国内外风化岩研究概况	(34)
3.2 风化岩体代表性特征指标及关系分析	(38)
3.2.1 风化岩体代表性特征指标的选取	(38)
3.2.2 风化岩体几个主要代表性特征指标间关系的研究	(39)
3.3 岩体风化的渐近性分析	(42)
3.4 岩体风化带划分界线指标的确定	(44)
3.5 河谷两岸及河床岩体风化综合分带	(45)
3.5.1 右岸斜坡(坝肩)岩体风化综合分带	(45)

3.5.2	左岸斜坡(坝肩)岩体风化综合分带	(60)
3.6	河谷两岸斜坡岩体卸荷分带的研究	(72)
3.6.1	用岩体裂隙发育程度及波速对左岸坝肩岩体卸荷带深度 进行评价	(73)
3.6.2	用裂隙发育程度和纵波速度对右岸坝肩岩体卸荷带深度 进行评价	(78)
3.7	河谷下切岩体应力变化的数值模拟及其与岩体风化、卸荷的关系研究	(82)
3.7.1	模型的建立	(83)
3.7.2	现今区域应力场条件下河谷形成过程中河谷应力的数值 模拟研究	(83)
3.7.3	最大主应力垂直河流时谷坡应力状态的数值模拟	(88)
3.7.4	坝址河谷应力状态对岩体工程地质特性的影响评价	(92)
3.7.5	河床岩体卸荷程度分析	(93)
4	软弱结构面空间展布特征	(95)
4.1	两岸地表出露层内错动带的空间展布特征	(95)
4.1.1	地表出露层内错动带的产状	(96)
4.1.2	地表出露层内错动带的长度	(97)
4.1.3	层内错动带的间距	(100)
4.2	平硐揭露的层内错动带的空间展布特征	(100)
4.2.1	平硐揭露层内错动带的产状	(101)
4.2.2	平硐中层内错动带的间距	(102)
4.2.3	平硐内层内错动带的长度	(104)
4.3	坝肩层内错动带的性状、物质组成及水文地质特征分析	(107)
4.3.1	坝肩部位层内错动带的性状特征	(107)
4.3.2	坝肩层内错动带的地下水特征	(108)
4.3.3	坝肩部位层内错动带的粒度组成	(109)
4.4	坝基岩体中层内错动带的空间展布规律	(110)
4.4.1	坝基岩体层内错动带的产状	(110)
4.4.2	坝基岩体层内错动带的间距和条数	(111)
4.4.3	坝基岩体层内错动带厚度分布特征	(112)
4.4.4	坝基层内错动带的粒度组成	(113)
4.4.5	$P_2\beta_3$ 和 $P_2\beta_4$ 中层内错动带长度	(115)
4.5	层内错动带的空间组合模式探讨	(116)
4.5.1	溪洛渡水电站坝址层内错动带模式及空间位置方程	(116)
4.5.2	层内错动带展布特征的数值模拟	(122)
4.6	层内错动带对岩体工程特性的影响	(126)

4.6.1	层内错动带对岩体弹性波速度的影响	(126)
4.6.2	层内错动带对坝址区岩体强度的影响	(128)
4.6.3	层内错动带对岩体变形特性影响研究	(131)
5	坝基岩体质量研究及分级	(142)
5.1	概 述	(142)
5.1.1	国内外代表性坝基岩体质量分级或分类	(142)
5.1.2	小结与讨论	(155)
5.2	溪洛渡水电站坝基岩体质量分级方案	(157)
5.3	溪洛渡坝基岩体质量分级主要要素的选择及关联性分析	(158)
5.3.1	分级主要要素的选择	(158)
5.3.2	各要素的关联性分析及界限值的确定	(158)
5.3.3	岩体质量分级各要素的关联性分析	(160)
5.4	坝基岩体质量分级定性指标和各要素指标的确定	(161)
5.5	岩体质量单因素、多因素分级图件表示的同一性研究	(163)
5.5.1	具有较好对等性条件下单因素和多因素岩体质量分级图示的 同一性	(163)
5.5.2	用实测各因素值对岩体质量等级进行图件表示的同一性	(166)
5.6	坝址岩体质量分级指标三维数据库的建立	(169)
5.7	图形切割	(170)
5.8	坝址各主要剖面岩体质量分级、分区	(172)
5.9	坝址各主要剖面岩体质量综合评价	(183)
5.10	溪洛渡坝基岩体质量综合分级与岩体地质力学分类 (RMR) 的对应性	(184)
6	坝基可利用岩体及建基面选择的工程地质研究	(187)
6.1	概 述	(187)
6.2	建基面选择应考虑的主要条件和国内外高拱坝建基岩体概况	(188)
6.3	拱坝建基面选择中几个控制因素及其与岩体风化带的关系分析	(191)
6.3.1	岩石介质强度及其随风化带的变化	(192)
6.3.2	岩体变形参数及其随风化带的变化	(193)
6.3.3	岩体强度参数及其随风化带的变化	(194)
6.3.4	岩体风化、岩体完整性、岩体结构、岩体变形、强度参数等基本 因素的代表性指标的选择	(195)
6.4	溪洛渡拱坝两岸嵌深选择的工程地质评价	(199)
6.4.1	从岩体结构方面选择拱坝坝肩嵌深	(200)
6.4.2	用岩体完整性选择拱坝两岸嵌深	(202)
6.4.3	按照岩体卸荷程度评价拱坝两岸嵌深	(203)

6.4.4	按岩体风化程度选择拱坝两岸嵌深	(204)
6.4.5	用坝基岩体质量等级选择拱坝坝肩嵌深	(208)
6.4.6	用不同指标(方法)选择拱坝两岸嵌深的综合分析	(217)
6.5	溪洛渡电站河床部位拱坝坝基建基高程的工程地质分析	(218)
6.5.1	从岩石 <i>RQD</i> 、岩体结构上选择拱坝较好的建基面位置	(219)
6.5.2	从坝基岩体完整性选择建基面	(221)
6.5.3	从坝基岩体质量等级的优劣选择建基面	(224)
6.5.4	坝基下层内错动带发育状况对建基面的影响	(224)
6.5.5	拱坝河床地段建基面的比选	(225)
6.6	建基岩体的变形强度参数分析	(225)
6.6.1	坝基岩体的承载力	(226)
6.6.2	坝基岩体变形参数	(226)
6.6.3	用国内外建在玄武岩上的大坝地基岩体的变形模量分析溪洛渡 建基岩体的变形模量	(228)
6.6.4	坝肩岩体强度参数	(228)
参考文献		(229)

1 绪 言

岩体是工程地质、岩土工程学科的重要研究方面,我国西部山地面积大,地形起伏大,大部分为岩石分布区,众多大型水电站、铁路、公路、矿业开采工程都直接面对岩体。由于“岩体是经历过变形、遭受过破坏的地质体的一部分”^[1],它们既是地质构造长期作用的产物,又是后期经历内外动力地质作用的对象。因而研究岩体的结构特征和类型,研究岩石遭受风化作用的程度及分带,对不同结构、不同风化程度和不同力学属性的岩体进行综合分类分级,评价它们的可利用性,就成为岩体工程地质研究的主要方面。本书选择有较强代表性的溪洛渡水电站高拱坝坝基岩体工程地质研究成果,系统介绍中国水电顾问集团成都勘测设计研究院和成都理工大学于1999~2001年共同开展此方面研究的技术方法和成果。

岩体结构是我国工程地质界在20世纪的重大理论成果之一,自谷德振学部委员于20世纪70年代提出“岩体结构”理论以来^[2],由于这一理论能够表征岩体的质量、岩体的力学属性,在岩体稳定性评价方面具有重大的理论价值,因而在岩石分布地区兴建大型、巨型工程中有广泛的应用和实践^[3~6],但在应用中也有一些需要进一步研究的问题,例如,岩体结构研究的主体,结构面要素的调查、统计方法,划分岩体结构时结构面分组和优势结构面的选择,在覆盖层和水体下的岩体不能获得结构面间距时替代指标的选取,用多指标划分岩体结构的对应性等问题,本书作者均作了较多的实际研究,开发了有关的程序和数据库。

岩体(或岩石)风化的研究虽然是一个较老的课题,因这一术语长期以来流行于地质质和其他学科中^[7~9],尽管它存在较多的人为因素和不确定性(或不够准确),但由于在实际工作中通过肉眼观察和地质锤的敲击声去进行判断方便、经济、快速,使其至今仍为工程技术界所使用。从历史和发展的角度来认识岩体的风化带划分问题,既尊重以往“风化分带”在工程地质评价中所起的作用,又客观地揭示风化分带存在的问题,在运用中加入新的量化“指标”去表征岩体风化的强弱,使岩体的风化分带既能表征岩石物质成分发生变异的程度,又能较准确地反映风化作用对岩体结构、岩体工程特性的影响程度。让岩体的风化分带成为既可反映岩体的风化、完整程度、岩体结构,又能概括岩体的工程特性的综合分带,是工程地质研究中一个值得重视的方向,本书在这方面作了较多的研究。

坝基岩体质量分级是岩体质量分类或分级的一种,岩体质量分级是根据岩石介质的工程特性和岩体的完整程度、岩体工程特性的优劣程度而进行的分类^[10,11]。因而,坝基岩体质量分级,应是将其坝基作用和影响范围内的岩体按照它们的完整性、工程特性的优劣及其对建坝的适宜程度而进行的等级划分。由于构成岩体的岩性、岩相、构造、风化程度、岩体的完整程度、岩体所处的环境条件、岩体的工程特性、岩体的水稳性等的不同,因而使得岩体的质量相差较大^[12]、岩体的稳定性也各不相同。坝基岩体的稳定性不仅受上述多个因素的影响,而且还受工程类型及荷载的大小影响。研究和评价上述因素对岩体质量

的影响程度,在获得一定的量化关系的基础上,综合各因素的影响权值,对岩体进行质量分级,不仅可以较好地反映多个因素对岩体质量的影响程度,而且可以用简单的类型级别表达岩体对工程建筑物的适宜性及稳定性^[13,14],将复杂的地质体用简单的信息传递给工程设计人员,成为工程地质人员与工程设计人员进行技术交流的共同“语言”。因此岩体质量分级是当前岩体工程地质评价中一个重要的方面,是工程地质人员将复杂的地质原型抽象为合理的物理模型,进而按照岩体的工程特性转换为力学模型的较好方式。尽管当前在进行岩体质量分级时,大多仅能做到岩体优劣程度的“质”的分级,尚难做到以较全面的工程特性参数予以精确量化,从而使得岩体质量的分级既可以表征岩体的优劣程度等级,又有与之相对应的可靠力学参数予以量化的真正的“质”、“量”分级。本书在岩体质量分级中,以岩体结构为主线,纳入了岩体风化程度等各项因素,既注重多因素的分级,又特别关注各因素间的对应性和相关性。在岩体质量分类或分级方面进行了新的尝试。

高拱坝可利用岩体的选择,主要是拱坝建基面的选择,一旦建基面的位置确定下来,下部便是地基岩体或建基岩体,拱坝建基面的选择与房屋建筑地基砌置深度或位置的选择一样,是选定建筑地基的重要工作,建基面的选择包括拱坝两岸坝肩的嵌深和河床地段建基面的位置两个方面。可建拱坝的大型水电站,大多位于深切峡谷中,不仅坝高,拦蓄水体巨大,而且100m以上坝蓄积巨大的水体产生的静水荷载多在数百万吨,高的可以达到千万吨,巨大的荷载传递至两岸坝肩岩体,必然会引起坝肩岩体的变形,甚至因岩体存在的一些缺陷而出现稳定性问题。过大的变形也会导致拱坝开裂、失事。由于水坝建筑物基本上是属于建筑在地壳表部岩体的建筑物,因此,地基岩体不可避免地要遇到各种风化程度的岩体,另一方面由于高的大坝,大多修建在高山峡谷地区,这些深切河谷是较长的地质史中河流侵蚀作用及其他外动力地质作用形成的,河谷斜坡岩体的风化是不可避免的,通常在河谷斜坡会形成具有分带现象的全风化→强风化→弱风化→微风化→未风化岩体。因此位于谷坡表部或河床表部的岩体因风化程度较重,不仅风化较强的岩石因风化蚀变抗压强度降低,承载力很低,而且风化岩体中裂隙增多、开度增大,岩体完整性变差,抗变形和抗滑稳定能力变差,不能满足大坝对地基岩体的要求,因此这部分风化较强的岩体必须予以挖除。对于不同的地区、不同的河谷和不同的岩性、不同构造的岩体,由于风化程度的差异所导致的岩体质量类型和工程特性参数的不同,因而能够满足作为拱坝地基的岩体的埋藏深度也不同,也就造成开挖深度的不同或建基面的位置不同。由于岩体的风化,对于一定地区而言,当岩性相近、经受构造运动改造大致相同时,岩体风化程度和不同风化带的厚度在一定程度上具有对应性,因而按照这种规律或特征可以从“面”上去选择适合拱坝建基的岩体。另一方面,由于岩体中存在大的断层或结构面,它们不仅对拱坝的变形、稳定性带来很大的影响^[15,16],而且有时会成为潜在地震的发震带,因此,在一个坝址或某一坝段,它们既是控制建筑物选址的决定性因素,又是选择拱坝建基位置的控制性因素,对于这些个案问题,在选择拱坝建基面以前,必须首先予以评价,认定对建坝的影响,大多列入专题进行论证,在解决这些个案后,一般意义上的拱坝建基面选择,应是整个坝基在经济、技术、工程地质条件、设计、安全性方面的最佳组合,才是拱坝建基的位置。本书从工程地质方面开展了拱坝建基面的选择研究,从岩性、岩体风化程度、岩体的完整性、岩体结构、岩体工程特性、岩体的水文地质特征等基本条件及其对大坝稳定、

安全的影响等多个因素研究了拱坝较为合理的建基位置。

溪洛渡水电站坝高 278m，装机容量 12600MW，是我国第二大水电站，坝高较三峡大坝高 100 余米。电站坝址区为二叠系玄武岩，由 14 个岩流层构成（图 1.1）。

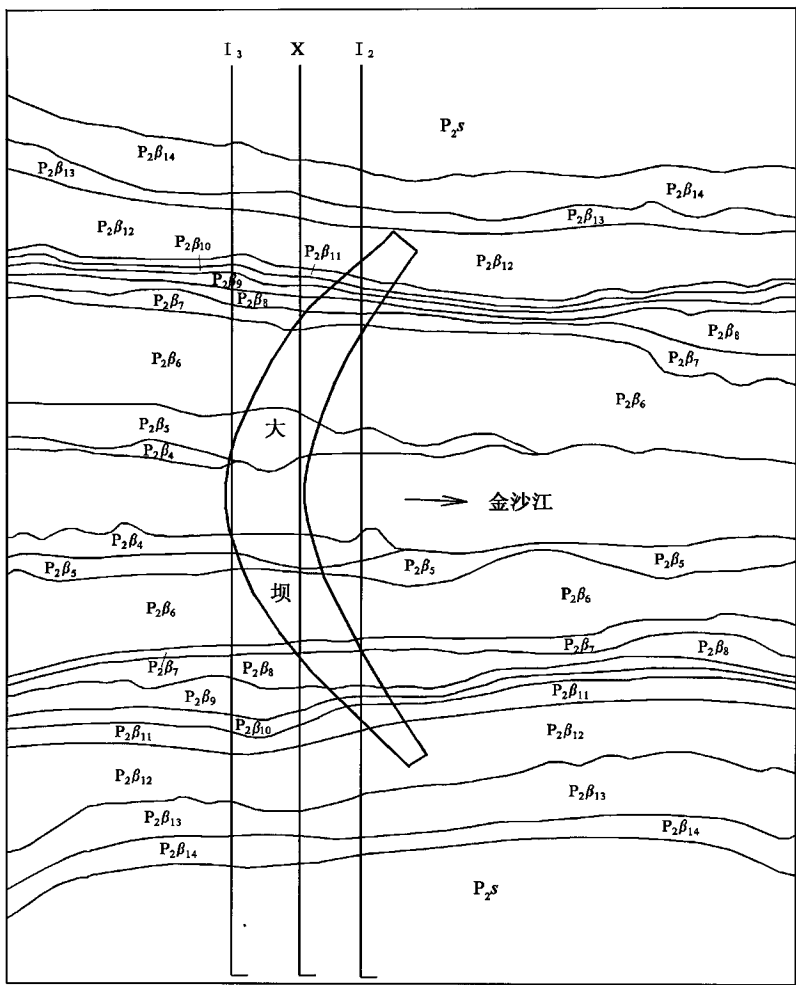


图 1.1 溪洛渡坝址玄武岩分布情况

坝址处峡谷深切，300 余米高陡峡谷的地形地貌条件及岩石条件，是修建拱坝的较理想地形条件（图 1.2）。块状的玄武岩由于岩流层似层面的分布，在客观岩体上又有层状岩体的一些特征。因此研究溪洛渡坝址的岩体结构、岩体风化、岩体卸荷，及岩体质量分级和可利用岩体评价，有较广泛的代表意义。

溪洛渡坝址位于地壳稳定程度较好的地带，经现场地应力测试成果的计算分析，坝址区构造应力场最大主应力方向为 NW 向，平行河流方向，量值在 9MPa 左右，河谷地应力场的特征与最大主应力垂直河流方向的峡谷有明显的不同，它们对河谷岩体的影响也具有明显的特征，本书较深入地研究了这一问题。

本书是成都理工大学和成都勘测设计研究院共同研究的成果，成都理工大学聂德新、李树森、刘高、韩爱果、刘惠军、冯庆祖、巨广宏、李建斌、余仁祥、任光明、李勇、符

文熹、唐良琴参加了研究，成都勘测设计研究院杨建宏、崔长武、张佑庭、张绍成、陈奎、张世殊、陈春文、杜明视、邓忠文、胡跃飞等参与了研究。在十分艰苦的条件下，甚至是冒着巨大的危险，大家在现场和室内都做出了很大的努力。

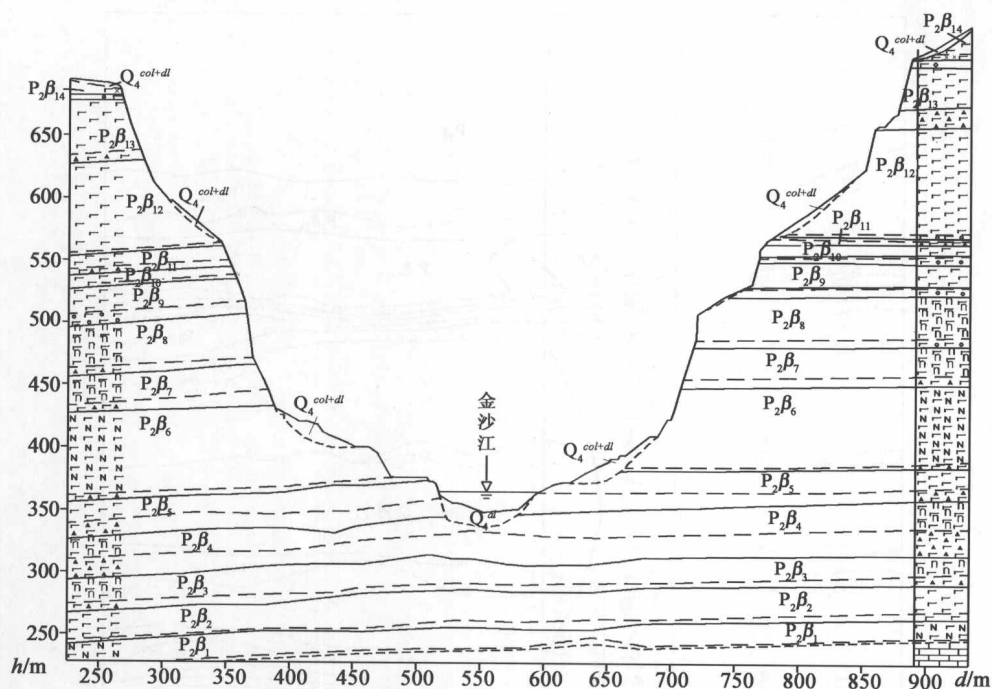


图 1.2 坝址剖面地形及岩流层分布状况

研究工作中得到了张倬元教授、勘察大师刘克远、王仁坤总工程师、溪洛渡设计总工程师肖白云教授、李文刚勘察大师等的指导和关心，借此机会，向他（她）们表示衷心的感谢。

本书的成果虽大多来自实际的资料，但也难免有个别不当之处，敬请各位同行、读者予以指正。

2 岩体结构研究^①

2.1 概 述

“岩体结构是一定地质条件下由结构面和结构体（单元岩块）共同组合的一种地质结构形式”，这一概念是 20 世纪 60 年代谷德振教授提出的，1979 年谷德振教授在《岩体工程地质力学基础》一书作了比较全面的论述。经过多年的研究和发展，“岩体结构”已成为评价岩体工程地质特性、岩体稳定性的重要基础理论和方法。岩体结构的基本要素是结构面和结构体。结构面是指各种成因不同、特性不同的地质界面：层面、节理裂隙面、断层面、不整合面，它们中规模大的可以切穿一个构造层或一个至多个时代的地层，小的仅切割同一岩石，改变岩石的完整性。目前工程地质领域所涉及的岩体结构，由于定义的“整体状结构”的结构面间距才 $1 \sim 3\text{m}^{[3,4]}$ ，具有这种间距的结构面既不可能是区域性大断裂（这种结构面的间距一般在数十千米），也不可能是中、小断层（其间距也大于 3m ），而应当是岩体中大量的随机分布的裂隙。作者们认为应称之为“工程岩体结构”，它们在工程作用力的作用下的响应或反应，取决于岩体的物质组成和结构特征。对于坚硬岩石而言，由于岩石的强度、抗变形能力强，在荷载下结构体的稳定性不会出现大的问题，因而结构面和架构的岩体结构便成为控制岩体力学性能的主导因素。因此研究岩体结构，既要重视岩性（物质组成），更应重视结构面的研究，做好结构面的分级，研究表征结构面特征的基本要素：①结构面产状；②结构面间距（密度）；③结构面连续性及其延展性；④结构面的起伏、粗糙性；⑤结构面的充填状况及结合情况，还应特别注意研究岩体所处的环境条件，特别是地应力环境条件，地应力的高低将改变岩体的介质属性（表 2.1）。

表 2.1 岩体的三种力学介质与岩体结构、岩性和地应力的关系

岩 性	地应力 (围压)	岩 体 结 构				
		块裂结构	碎裂结构	散体结构		完整结构
				粗碎屑	细碎屑	
坚硬岩类	低	块裂介质	碎 裂 介 质			
	高					
软弱岩类	低		连 续 介 质			
	高					

（据孙广忠，1983，略加修改）

① 韩爱果、张世珠参与本章编写。

2.2 结构面分级

2.2.1 国内结构面分级概况

前人和国内一些大型工程对结构面分级已有较多的方案，这里作简要介绍：

1) 谷德振教授提出的V级划分（表2.2），涵盖了地质体中的大大小小的结构面，可以用于多种用途的岩体稳定性评价。

表 2.2 谷德振教授提出的结构面分级及其特征

级序	分级依据	地质类型	力学属性
I级	延伸数十千米以上，深度可切穿一个构造层，破碎带宽度在数米、数十米以上，在1:20万的地质图上有所体现	主要指区域性深大断裂或大断裂	属于软弱结构面，构成独立的力学介质单元
II级	延展数百米至数千米，宽度在1~5m之内，在1:5万的地质图上有体现	主要包括不整合面、假整合面、原生软弱夹层、层间错动、断层、侵入岩接触带及风化夹层等	属于软弱结构面，形成块裂体边界
III级	延展十米或数十米，宽度0.5m左右，仅在一个地质时代地层中分布；有时仅在某一种岩性中分布；一般在1:2000地质图上有所体现	各种类型的断层、原生软弱夹层、层间错动带等	多数属于软性结构面，参与块裂岩体切割
IV级	数米至数十米，无明显宽度，在1:2000地质图上无反映，为统计结构面	包括节理、片理、层理、劈理以及卸荷裂隙、风化裂隙等	硬性结构面，是岩体力学性质，结构效应的基础
V级	连续性极差，刚性接触的细小或隐蔽裂面，在地质图上均无反映，为统计结构面	包括微小节理、隐蔽裂隙及线理等，亦包括结合力差的层理	硬性结构面，是岩体力学性质，结构效应的基础

2) 黄河龙羊峡水电站结构面分级和李家峡水电站结构面分级，只列出了IV级，没有把区域性断裂纳入（事实上坝址并无此种结构面），如果考虑，其等级的划分与谷德振教授的方案具有对应性，龙羊峡坝基为花岗岩体，结构面为断层、裂隙（表2.3），分级中对各级结构面的延伸、力学属性作了明确的界定，概念清楚，工程意义明确^[13]。李家峡水电站坝址为层状岩体结构^[17]，结构面分级中考虑了层状岩石的特征，即层面、片理的存在。分级方案没有纳入区域性断裂，只分出IV级（表2.4），与龙羊峡水电站的分级相近。

表 2.3 龙羊峡电站坝址结构面分级

级 别	特 征	主 要 断 裂
I	延展长，贯穿坝肩或工区；破碎带宽，多含夹泥或全一强风化软弱岩石；抗剪强度低，有较大压缩变形；透水性较强；截断或错开II，III，IV级断裂，构成岩体力学作用的重要边界；除A ₂ 外，均为断层及软弱岩带	F ₁₈ ，F ₇₂ ，F ₇₁ ，F ₁₂₀ ，A ₂ ，f ₆ ，F ₅₈₋₁ ，F ₅₇ ，F ₂ ，G ₄ ，F ₇₋₁ ，F ₇ ，A ₁₉
II	延展较长，常被I级结构面截断；平缓断裂和NWW组有夹泥的直立裂隙；抗剪强度低；较大断裂构成渗水通道；构成滑动岩体边界；多属较小断层	F ₆₇ ，F ₃₂ ，F ₂₁₁ ，F ₁₈₇ ，F ₁₉₁ ，F ₁₃₅ ，F ₁₄₇ ，F ₁₂₆ ，F ₁₂₂

续表

级 别	特 征	主 要 断 裂
Ⅲ	在坝区普遍发育，一般不夹泥或夹少量泥膜；单条长 10 ~ 20m，首尾错列斜接延伸数十米，深部呈闭合状，基本不透水；构成块裂体切割边界；均为中—大裂隙，或小断层	NNW 向中陡倾裂隙和 NE 向直立裂隙 F ₂₁₅ ，T ₁₂ ，T ₂₅ ，T ₄₉ ，T ₁₆₈ ，T ₃₁₄ ，T ₁₂₃₉ ， T ₄₆₂ ，T ₆₆ ，T ₂₂₆₀
Ⅳ	在坝区普遍发育，延伸长度小于 5m；一般不夹泥；多呈闭合状，基本不透水；构成块裂体或镶嵌体的切割面，使完整岩体强度降低；均为小裂隙	主要考虑小的平缓裂隙

表 2.4 李家峡电站坝区结构面分级

级 别	名 称	规 模				结构面工程特性	主要断裂
		长度 /m	宽度 /cm	夹泥 /cm	影响带 /m		
Ⅰ	贯穿性 断层	大于 200	20 ~ 60， 局部大于 100	1 ~ 3，多 分布在上下 盘	1 ~ 3	贯穿性好，构成坝基岩体力学作用边界。 (1) NW 向层间断层：左岸与拱推力垂直，存在压缩变形问题；右岸与拱推力大致平行，对坝肩下游边坡开挖不利。(2) NEE 向顺河断层，需研究侧向滑移和渗透稳定问题，此类断层需进行专门性研究和慎重处理	F1，F20，F50， F26，F27，F32， F34，f20，f24， f33，f35，f36， F9
Ⅱ	一般性 断层	数十至 百余	5 ~ 20	0.5 ~ 2	0.5 ~ 1	宽度较小，荷载作用下变形量不大，主要是降低坝基局部岩体抗滑稳定、工程上需进行一般性研究和处理的软性结构面，如表部深挖回填混凝土，锚固或灌浆等	F3，F18，F19， F44，f26，f30， f32，f37，f45， f49，f75，f112， f121
Ⅲ	小断层 或大 裂隙	十至 数十	1 ~ 10	小于 0.5， 不连续	小于 0.5	规模小，充填物薄，其工程特性主要视为软性结构面，但宽度小、起伏差大，不含泥时，可按硬性结构面考虑；它们的大量存在直接影响了岩体的完整性和整体强度；Ⅰ—Ⅲ级结构面相结合可构成不同工程部位潜在滑移体；工程上可作表部开挖和锚固等处理措施	T148，T628， T398，f354， f398，F377
Ⅳ	细小 裂隙	小于 10	0.05 ~ 0.5	充填方解 石、钙质 岩粉，基 本无泥	无	分布随机的各种硬性的小裂隙（主要是顺河向陡倾小裂隙和 NW 向层面、片理面等），它们断续延伸，将岩体切割成各种形状岩块，使岩体完整性有所降低；工程上一般不处理	

3) 三峡水利工程坝址结构面分级也是采用不包含区域断裂的Ⅳ级划分方案(表 2.5)，分级中既有结构面的规模延伸长度、宽度、发育特征，也有结构面的工程地质特征，更有清晰的工程地质评价——对岩体稳定性的影响，指出了Ⅳ，Ⅴ级结构对工程岩体完整性的影响。分级目的明确、界定准确，工程实用性很强^[14]。

表 2.5 三峡坝址结构面分级及特征

级序	分级依据	结构面发育特征	结构面工程地质特征	对工程岩体稳定性的影响
II	结构面延展长度大于 500m, 至数千米, 断裂带宽 1~5m, 少数宽达 10~20m	坝基范围内共 11 条断层, NNW 组 4 条 (F ₂₃ , F ₉ , F ₂₀ , F ₁₈), NNE 组 7 条 (F ₇ , F ₄ , F ₆ , F ₄₁₀ —F ₄₁₃)。两组断层构成锐角交切网络	压扭性, 构造岩胶结良好, 少数糜棱岩片理化带软化、泥化	控制坝基及高边坡岩体的稳定性; 坝基下规模较大的断层带产生不均匀变形问题, 以及加固处理措施, 需重点研究
III	结构面延展长 50~500m, 断裂带宽 0.1~1m	NNW、NNE 两组断层最发育, 长度 50~100m 者占 70.7%, 100~300m 者占 29.3%; 其次为 NE—NEE、NWW 组断层	以硬性结构面为主, 少数 NE—NEE、NWW 组张扭性断层构造岩胶结差, 为软弱结构面	控制坝基及高边坡岩体局部地段稳定性, 其他同上
IV	结构面延展长 10~50m, 宽 0.2m, 不连续	以陡、中、缓倾角裂隙为主, 疏密相间, 分布极不均一, 随机性变化较大	以硬性结构面为主, 划分平直光滑面、平直稍粗面、起伏粗糙面、极粗糙面, 以平直稍粗面为主	影响岩体完整性及工程岩体稳定性。特别是缓倾角结构面发育区控制局部坝段抗滑稳定性
V	结构面延展长度小于 10m, 短小, 细小, 连续性差	裂隙、劈理、片理、隐蔽节理、随机分布	硬性结构面为主, 少数为软弱结构面 (片理化带)	影响岩体完整性及岩块强度

2.2.2 溪洛渡坝址结构面分级

前述的结构面分级, 无论是结构面等级的界定, 还是结构面的工程地质特征, 都比较接近, 3 个大型水电工程的分级基本接近, 有的已成功应用于工程, 有的正在指导工程的建设, 是可以借鉴的分级方案。因此溪洛渡可以采用不包含区域性断裂的 IV 级划分方案, 其分级情况见表 2.6。

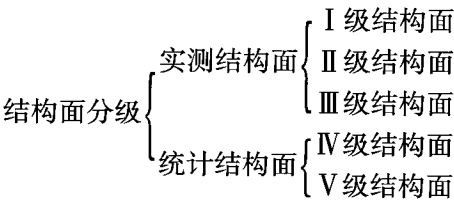
表 2.6 坝址结构面分级

级序	分级依据	工程地质类型	代表结构面	工程地质特征
II	延伸百米—千米的断层, 岩流层层间错动带、极少数规模较大的层内错动带	软弱结构面	C ₃ , L _c 6-6	在工程区段内连续分布, 碎屑物质充填, 强度低, 构成工程区段内岩体力学属性差异的重要边界, 是岩体稳定性评价的边界
III	延伸长数十米至百米, 宽为数厘米至数十厘米, 有破碎物质充填的结构面, 以层内错动带、高倾角的挤压带为代表	弱性结构面	PD82L _c 6-5 PD12L _c 6-4	既是构成小的潜在欠稳定的块体边界的结构面, 又是影响坝基岩体整体力学性质的软弱面
IV	延伸数米的硬性结构面, 为坝址区不同方位的节理、裂隙	硬性结构面, 随机分布, 成组出现		影响岩体完整性, 构成岩体中基本结构体的边界, 是岩体力学性质构成的基础
V	延伸长度小于 0.5m 的细小裂隙, 微裂隙, 连续性极差	硬性结构面, 微小裂隙、隐微裂隙		影响岩体的完整性和岩体的强度

2.2.3 不同等级结构面的研究方式

从前述的各个结构面分级方案表中可以看出：①Ⅰ级结构面规模大、延伸长，在区域地形地貌上显示明显，是地壳区域块体运动的边界，也是区域地壳稳定性研究的主要对象，对它们的定位可以通过地质测绘来解决；②Ⅱ，Ⅲ级结构面为中小断层，有一定的延伸长度、宽度，大多有构造岩充填，由于构造岩中的泥质物和其他碎屑状断层岩的存在，在工程作用力下不仅有明显的压缩变形，而且有产生大的剪切变形的基本条件，对它们的研究通常是逐条地予以工程地质评价，用地质测绘和勘探的方法予以定位；③Ⅳ，Ⅴ级结构面，一般指的是岩体中的各种节理、裂隙，在岩体中数量多、方向不一、随机分布，切割的密度既控制着岩体的完整性，又影响着岩体的工程地质特性——力学特性，要表示它们、获得它们的基本特征，只能通过统计的方法解决。

因此，从工程地质测绘、勘探的观点可以将5个等级的结构面分为实测结构面和统计结构面两大类：

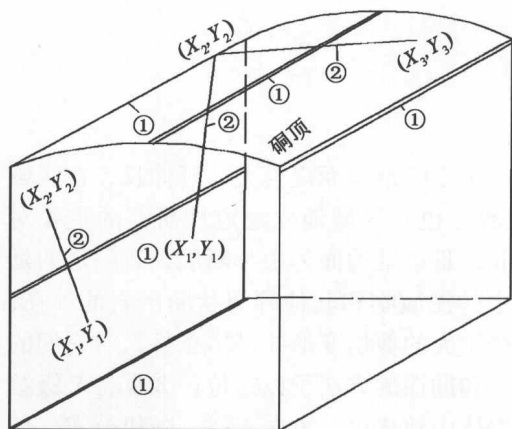


2.3 溪洛渡坝基、坝肩岩体结构面精测及基本要素的获得

溪洛渡水电站坝高近300m，库容超过 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ ，是当今世界上最大的水电站之一。对于这种巨型工程的工程地质研究，必须坚持深入、细致、全面、创新的原则。作为岩体工程地质评价基础的岩体结构研究，也必须有高的可靠性和准确性，因此对Ⅳ，Ⅴ级结构面基本要素（或工程要素）的调查，既要采取统计的方法，又要认真考虑统计样本的全真性、可靠性，使每一个样本或样本群体具有真正的代表性。要达到这一要求或目的，沿袭以往在岩体露头面或平硐中选取数个平方米面积的范围来获得结构面的工程要素，尽管能满足其他地段研究岩体结构的要求，但对坝基、坝肩所涉及的区段的岩体结构，难免有漏、失的情况。因此，对岩体结构的研究，采用了全面布网、逐条测量的方法——结构面精测法来获得结构面的工程要素。这种测量方式虽然工作量很大（相信以后利用摄像及后处理系统可以实现半自动化），但可以逐条获得信息，能反映结构面在空间上的连续性变化。这样做比选“块”或选“线段”统计的精度要高，资料更为可靠。

2.3.1 结构面现场精测

为获得全面的信息，研究中对坝基、坝肩所涉及的20个平硐硐顶、硐壁的结构面进



①测尺；②裂隙（结构面）

图 2.1 结构面现场精测示意图

行了逐条测量、描述，具体方法是以平硐硐壁、硐顶为实测对象，布置 5 条测线（或测尺）（图 2.1），其中硐壁两条，硐顶两条，拱角一条，这样可以控制结构面在空间的位置（过去一般是在硐壁的中间布置一条测尺，硐顶及测尺两侧的结构面有可能遗漏或测量不准确）。通过测尺读出各个结构面端点的相对坐标；仅在硐壁出露处读出两个端点的坐标；跨越硐壁、硐顶的需要读出 3 个点的坐标，然后测定结构面的产状（倾向、倾角），对结构面的粗糙程度、起伏状况、张开、充填以及地下水状况等进行描述。

2.3.2 现场测量资料的处理

（1）结构面数据的输入和分组

根据现场测得的结构面要素原始资料，分别按硐壁、硐顶两个不同的统计单元输入计算机中（表 2.7）。在输完一个平硐或一个工程地质单元的所有平硐后，可以用节理等密图或玫瑰花图进行分组，获取优势方位（表 2.8）。为了获得裂隙发育的总体规律和局部特征，本次工作除了研究各个平硐裂隙的方位特征、分组外，还对整个坝基、坝肩的裂隙的方位、分组作了全面的考查（详见后面章节）

表 2.7 结构面基本数据输入

编号	X_1	Y_1	X_2	Y_2	倾向/ (°)	倾角/ (°)	充填物及性状	起伏粗糙度	地下水
201	29.3	1	30	1.5	220	70	闭合	面平直	干燥
202	29.8	0.2	30.7	0.3	105	10	少量钙膜	起伏粗糙	浸湿
203	30	0.2	32	1.1	86	14	闭合	平直	干燥
204	47	1.8	37	1.8	152	14	岩屑 0.5cm	弯曲粗糙	线状滴水

表 2.8 裂隙分组及优势方位

组号	走向/ (°)	倾向	倾角/ (°)
1	120 ~ 140	SW	75 ~ 82
2	200 ~ 225	SE	45 ~ 25
3	285 ~ 295	NE	83

（2）统计面裂隙的展示

在输入结构面的信息后，通过编制的程序，可以将硐壁、硐顶的裂隙全部展示出来，还可以点击各裂隙，展示其产状、输入的坐标（图 2.2），这不仅可以展示裂隙的发育状况、方位，而且可以直观地看出整个平硐裂隙的连续性变化，还可以检查统计输入中的个别错误。