

# 漫湾水电站左岸工程地质和岩体抗剪强度的研究

陈祖煜 汪小刚 夏万仁 贾志欣 郭映龙

(水利水电科学研究院)

方占奎 汤献良 尹森菁

(昆明勘测设计研究院)

**【摘要】** 漫湾水电站在施工期间,左岸边坡曾多次发生规模不等的岩体塌滑,其中以1989年1月7日发生的滑坡规模最大,塌滑方量达 $10.6\text{万m}^3$ ,造成了巨大的经济损失。为确保后期施工的安全,对左岸边坡的工程地质和岩体抗剪强度特性进行了深入全面的研究,研究成果为工程加固设计提了重要供依据。

**【关键词】** 漫湾水电站 工程地质 岩体抗剪强度 研究

## 一、工程地质概况

漫湾水电站坝址河道呈反“S”形,左岸为一单薄条形山脊,走向约为 $N40^\circ W$ ,三面临江,岸坡地

形较陡,坝轴线地段天然地形坡度约 $42^\circ\sim 45^\circ$ ,下游约 $35^\circ\sim 42^\circ$ 。坝轴线地段附近山顶高出江面约 $138\text{m}$ ,此处山体宽约 $280\text{m}$ ,宽高比为 $2:1$ 。图1为工程地质平面图。

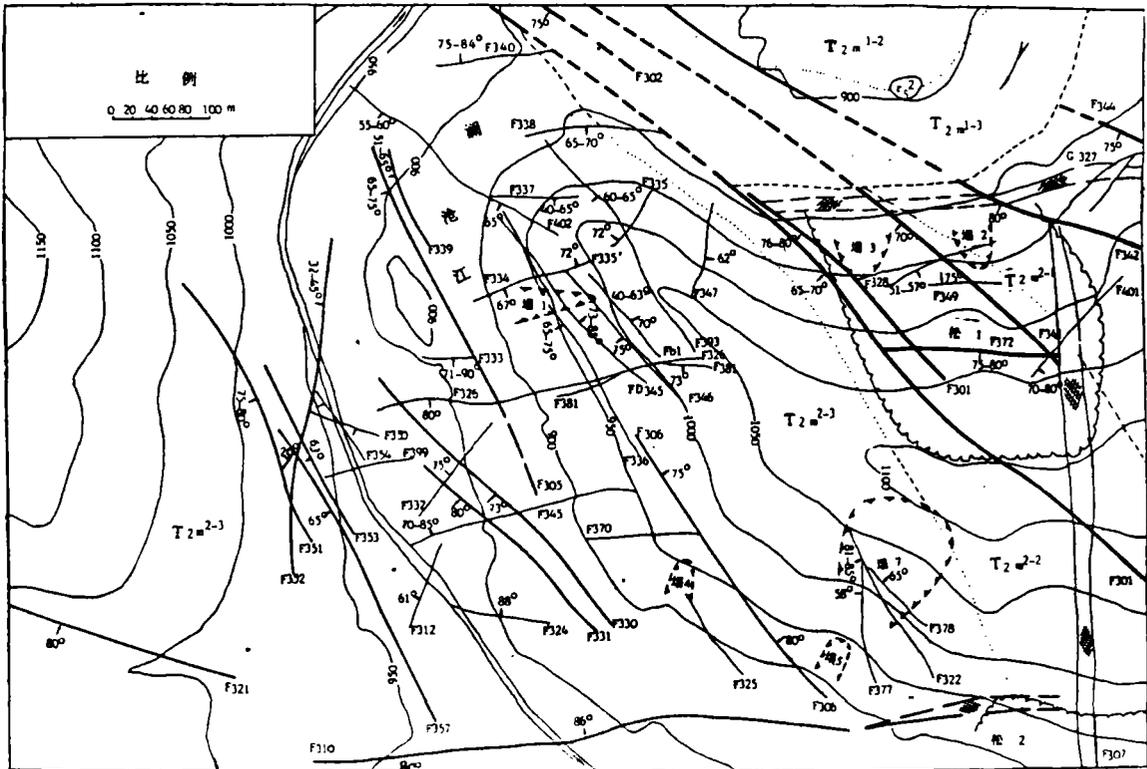


图1 坝区工程地质平面图

左岸边坡主要出露地层为  $T_2^{2-3}$  流纹岩, 新鲜流纹岩致密坚硬, 不具流纹质构造; 岩性相对均一, 无原生软弱夹层; 但在后期热液、动力、风化等因素作用下, 常发生多样蚀变, 其中高岭土蚀变尤为显著, 主要发育在构造破裂面及断层影响带附近, 对结构面抗剪强度影响较大。

流纹岩因受区域构造的作用, 岩体中构造发育。断层以陡倾角为主, 多为压性或压扭性, 断层泥薄而不连续, 裂面多呈舒缓波状, 延伸规模不大, 在边坡失稳破坏中一般充当侧向切割面和后缘拉裂面的作用, 仅有少量的缓倾角断层可以作为边坡失稳的滑移面。

在断层两侧, 小断层  $f$ 、挤压面  $g_m$  较为发育。根据勘探平洞和边坡支护工程的锚固洞统计, 顺坡向  $f$ 、 $g_m$  在微~弱风化带中发育的平均间距约 8~10m, 而在强风化带中只有 3~4m, 其产状多为  $N15^\circ\sim30^\circ W/SW \angle 35^\circ\sim45^\circ$ , 延伸长度 20~40m, 相对于左岸边坡来说为顺坡方向, 是边坡稳定的控制因素。

此外, 边坡岩体中节理普遍发育, 大部分属于构造节理, 部分为岩浆冷凝过程中形成的隐微裂隙。节理面产状大致可分为以下几组: (1)  $N15^\circ\sim30^\circ W/SW \angle 42^\circ\sim52^\circ$ ; (2)  $N40^\circ\sim60^\circ W/SW \angle 50^\circ\sim60^\circ$ ; (3)  $EW(N80^\circ\sim85^\circ E \text{ 或 } N80^\circ\sim85^\circ W)/S \angle 75^\circ\sim85^\circ$ ; (4)  $N50^\circ\sim60^\circ E/NW \angle 70^\circ\sim75^\circ$ 。

其中 (1)、(2) 两组节理发育程度大致相同, 一般称它们为顺坡节理, 且有倾向与其相反的“反向”节理伴生, 顺坡节理间距一般为 20~30cm,

在强风化和弱风化上段岩体中, 顺坡节理延伸较远, 且相互连通, 使岩体形成似层状构造, 在弱风化带的中、下段和微风化带内, 延伸长度一般 3~4m, 少数可达 10m, 左岸山坡的走向和倾角大致和顺坡节理产状一致。

由于左岸地形单薄, 三面临江, 岸坡较陡, 所以一方面风化和卸荷作用强烈, 另一方面地下水排泄条件较好, 地下水位较低, 但施工用水长期渗入断层、挤压带, 会降低边坡的稳定性。

## 二、1989年1月7日滑坡破坏情况及其机理分析

1月7日滑坡发生于坝横 0+10~0+130、高程 912~1024m 地段, 塌滑方量 10.6万  $m^3$ ,

### (一) 滑坡形成和破坏情况

左岸边坡自 1987 年开始开挖, 塌滑前, 已完成加固锚洞 13 个, 并设有系统锚杆和锚筋桩等加固措施。参见图 2。

1988 年 12 月 14 日, 坝横 0+86 桩号以南高程 980~999m 处施工便道上发现土坡开裂, 开裂宽度 1~20m; 延伸 20m 左右。以后, 随着时间推移, 裂缝不断扩大、贯通。1989 年 1 月 7 日, 坝基开挖下降到 912m 高程时, 下午 4 时许, 左岸边坡开挖连续两次放炮, 装药分别为 2.8t 和 1.5t 左右, 放炮后一小时, 后缘裂缝张开 2mm。下午 6 时 56 分边坡发生大规模坍塌。

滑面清除后发现, 13 个锚固洞全部被剪断, 其它加固措施也被破坏。锚固洞断口呈“直断口”和“斜

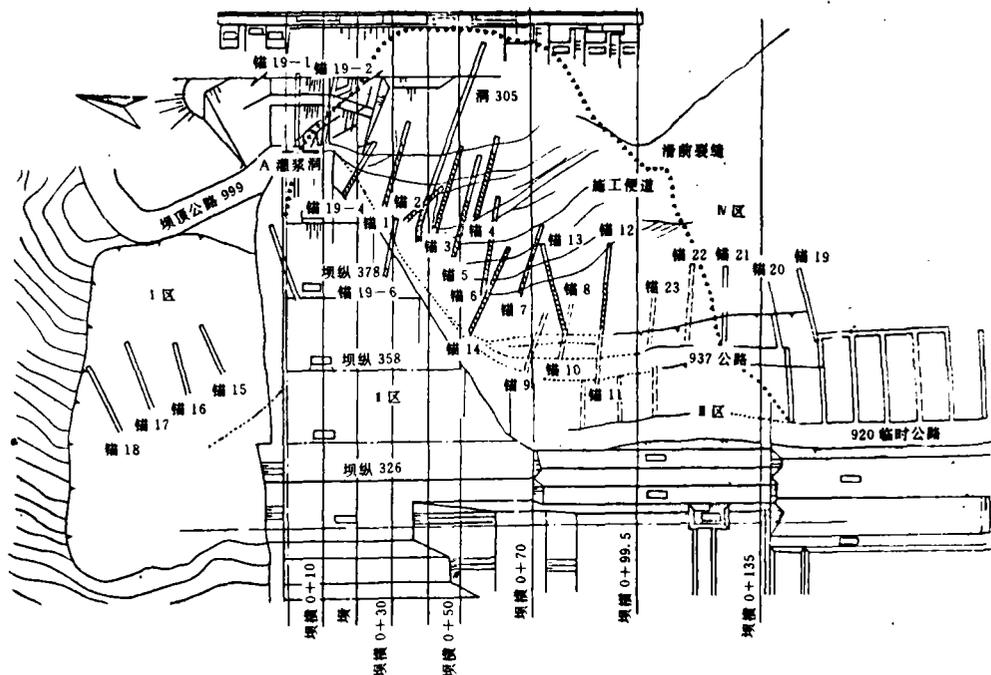


图 2 左岸坝区开挖、支护平面图

表 1 左岸完整岩石强度试验成果

(单位: MPa)

岩体类型	风化特征	室内单轴抗压试验			现场点荷载试验			
		均 值	标 准 差	变 异 系 数	分 布 形 式	均 值	标 准 差	变 异 系 数
II <sub>1</sub>	微~弱风化	45.0	9.0	0.2000	正态分布	46.4	1.80	0.039
II <sub>2</sub>	强 风 化	25.0	6.0	0.2400	正态分布	30.0	2.00	0.067

断口”两种形式。“直断口”与洞轴线垂直,混凝土表面酷似凿毛的痕迹;“斜断口”与滑面方向一致,混凝土面上一般均可见清楚的擦痕,锚洞混凝土中的钢筋大部分有颈缩现象,其中三个锚固洞混凝土未浇满,上部出现空洞现象。

### (二)对滑坡机理的探讨

从揭示的地质情况和开挖、加固以及失稳过程可以看到,左岸滑坡的主要原因可归纳为以下几点:

1.左岸边坡由强风化岩体组成,在开挖方向存在着同倾向的一组发育极为密集的顺坡向节理和断层 $F_{1,1}$ 、 $F_{1,2}$ 和 $F_{1,3}$ 。断层 $F_{1,1}$ 和顺坡向节理面构成了滑坡的底裂面, $F_{1,1}$ 和 $F_{1,2}$ 则将滑坡体切断,降低了岩体的整体性。

2.位于II区的重力坝15~19坝段的坝基开挖,使边坡上游面临空,同时 $F_{1,1}$ 和 $F_{1,2}$ 分别构成滑坡体上游和下游侧的切割面,形成了滑坡所需具备的边界条件。

3.施工时不加控制的大装药量爆破和施工用水长期渗入断层和挤压破碎带,进一步恶化了边坡的稳定条件。

在上述条件的组合下,随着边坡的不断下切至912高程时,边坡终于在四面均无足够支持的情况下发生整体崩滑。

## 三、左岸边坡岩体抗剪强度特性的综合研究

岩体的强度特性是研究评价边坡稳定性必须首先解决的问题。由于岩体被成千上万条节理面和众多的断层、破碎带切割,岩体强度特性的研究不能走纯理论分析的道路,必须进行综合分析。在本项研究中,开展的工作包括:①现场和室内试验成果的整理分析;②工程类比分析;③实际滑坡的反演分析;④岩体分类与强度特性的相关分析;⑤岩体结构面连通特性确定及强度估算。现分项概述如下:

### (一)完整岩石的单轴抗压强度

完整岩石的单轴抗压强度是进行岩体分类,进而利用经验方法估算节理岩体综合抗剪强度特性的重要基本参数。为了较全面地了解这一基本参数的特征,除在普通压力机上进行了123组岩块湿抗压强度试验外,还对强弱风化区岩块每10~15块为一组,补充进

行了32组现场点荷载试验。整理后的成果如表1所示。

### (二)岩体结构面的抗剪强度特性

岩体中的节理、断层和挤压面统称为结构面。结构面的抗剪强度是控制边坡稳定的重要因素。有关研究工作包括以下几个方面:

#### 1.节理面抗剪强度的室内中剪试验

在现场人工取样16块,采用千斤顶法进行了室内中剪试验,综合整理后的摩擦系数 $f$ (按纯摩分析)如表2所示。

表 2 节理面抗剪强度室内中剪试验成果

节理两侧 围岩特征	抗剪强度指标 $f$		
	均 值	标 准 差	变 异 系 数
微~弱风化	0.74	0.25	0.336
强 风 化	0.69*		

注:由于资料较少,表中仅给出了试验成果的平均值。

国际岩石力学学会(1982年)推荐的确定岩体结构面抗剪强度的Barton经验公式如下

$$\tau = \tan\left(\varphi_0 + JRC \log \frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right) \quad (1)$$

式中 $\sigma_n$ 和 $\tau$ 分别为剪切面上的法向应力和剪应力, $\sigma_c$ 为完整岩石的单轴抗压强度,根据漫湾节理面的实际情况,对各类岩体的JRC值建议均取为5。

#### 2.软弱结构面(断层、挤压面)抗剪强度现场大剪和室内中剪试验

在本项科研工作中,除了进行了软弱结构面的现场原位抗剪试验外,还补充进行了原状试样的室内中剪试验。在进行成果整理时,为便于分析,根据夹层物质情况和围岩特征,将其分为两类。对于两类软弱结构面的强度指标,除了给出了漫湾电站本身的试验成果外,还结合国内25个工程196组软弱结构面的现场大型抗剪试验资料,进行了工程类比分析。表3为有关成果的汇总。

表中结果表明,试验成果与类比分析成果具有很好的-致性。在实际使用中,对于软弱结构面的抗剪强度参数建议按 $c=0.02\text{MPa}$ 、 $f=0.32$ 考虑。

### (三)节理岩体的综合抗剪强度

节理岩体在剪切破坏过程中,某一滑裂面上提供

表 3 软弱结构面抗剪强度研究成果汇总

结构面代号	结构面特征	参数类型	漫湾水电站试验成果						国内25个工程资料统计					
			f			c (MPa)			f			c (MPa)		
			均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数	均值	标准差	变异系数
C <sup>1</sup>	碎屑夹泥型 σ <sub>c</sub> <30MPa	屈服值	0.29	0.04	0.138	0.08	0.05	0.625	0.27	0.08	0.296	0.02	0.01	0.500
		峰值	0.33	0.06	0.182	0.08	0.06	0.750	0.32	0.10	0.313	0.04	0.03	0.750
C <sup>2</sup>	碎屑夹泥型 σ <sub>c</sub> >30MPa	屈服值	0.31			0.09			0.31	0.06	0.197	0.06	0.08	1.284
		峰值	0.35			0.10			0.33	0.06	0.182	0.10	0.12	1.219

表 4 左岸岩体分类评分值

岩体类型	得分	单轴抗压强度 R <sub>c</sub> (MPa)	RQD (%)	间距 (cm)	节理条件	地下水	节理方向 修正分	总分 (RMR)
强风化	数值 得分	20.8 3.01	30.2 6.53	10.6 7.77				
弱~微风化	数值 得分	40.9 4.27	35.7 7.64	8.1 6.93				

的抗剪强度是由滑裂面上的结构面和完整岩石（称为岩桥）共同提供的。因此，需要在前述的关于完整岩石和节理面强度特性研究成果的基础上进一步探索节理岩体的综合抗剪强度特性。在本项研究工作中，采用了以下三个途径：

1. 实际滑坡的反演分析

根据滑坡的实际情况，通过反演分析可以较为准确的获得滑坡范围内岩体的强度特性参数。在开展本项工作时，我们对左岸滑坡的前后地形进行了实地测量，在实测资料的基础上，对1月7日在坝肩发生的滑坡和9月17日在“三洞出口”处发生的滑坡进行了反演分析。从反演成果可以看出，反演结果具有很好的一致性，可以基本上认为，左岸节理岩体在强风化区，c和f分别为0.05MPa和0.63，在弱风化区c和f分别为0.05MPa和0.76。

2. 根据经验方法确定节理岩体的抗剪强度指标

Hoek-Brown (1980年) 在总结和分析大量有关岩体强度试验资料的基础上提出了确定节理岩体综合抗剪强度的经验公式：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中σ<sub>1</sub>、σ<sub>3</sub>分别为大、小主应力，σ<sub>c</sub>为岩块单轴抗压强度。m、s为岩体抗剪强度的经验参数，可根据Bieniawski提出的分类标准所获得的评分值RMR来推算。漫湾电站左岸岩体分类评分值如表4所示。

得到了m和s后，可以推出摩尔-库伦强度准则的C和f值。

采用表4所提出的强风化岩体RMR值(=31.31)，

分析左岸1月7日滑坡和三洞出口滑坡，发现稳定安全系数高于1。在RMR=28时可以使两滑坡的安全系数接近1，因此，本研究建议对表4中的RMR值按28/31=0.9，予以折减。折减后的RMR值，强风化为28.0，微~弱风化为34.0。

3. 根据岩体结构面连通率确定节理岩体的综合抗剪强度指标

岩质边坡的滑裂面通常是由岩体的结构面和这些结构面之间的完整岩石（岩桥）共同组成的，因此，要确定沿滑裂面的综合抗剪强度，首先要分析滑裂面上的连通率，即节理面占整个滑面的比例。但是由于岩体中节理面分布的复杂性，连通率的合理确定问题一直没有得到很好的解决。近年来在工程地质学科中出现了应用计算机对岩体结构面网络进行统计、模拟和分析的新技术，为合理地确定连通率提供了一个重要途径，这套方法在漫湾工程中获得了初步应用，现简述如下：

(1) 分别建立节理和岩桥的抗剪强度理论。

①岩桥的抗剪强度。岩桥在某一方向受剪，其抗剪强度按Lajtai (1969) 方法确定，其抗剪强度计算公式如下：

$$\tau = [\sqrt{\sigma_t(\sigma_t + \sigma_n)}] \quad (3)$$

式中σ<sub>t</sub>、σ<sub>n</sub>分别为完整岩石的抗拉强度和作用于剪切面上的法向应力。

②节理面的强度按Barton公式(1)确定。

(2) 应用蒙特卡罗模拟技术在计算机中生成一个符合漫湾左岸边坡实际情况的岩体结构面网络。

表 6 节理岩体抗剪强度参数综合研究成果

岩体类型	设计采用指标		反演分析成果		根据岩体结构面 连通率推算成果		按Hoek-Brown经 验方法估算结果	
	c (MPa)	f	c (MPa)	f	c (MPa)	f	c (MPa)	f
强风化	0.04	0.40	0.05	0.63	0.07	0.66	0.08	0.62
弱风化	0.04~0.06	0.40~0.60	0.05	0.76	0.15	0.74	0.10	0.81

(3) 在某一剪切方向, 摘出网络中位于剪切带内的节理面, 应用动态规划方法, 确定按式提供最小抗剪强度的节理-岩桥组合。文献已对这一方法作了详细的介绍。

(4) 节理岩体综合抗剪强度的估算。在已知岩体结构面连通率的基础上, 可以按下面的公式来计算节理岩体中由岩桥和结构面共同提供的抗剪强度:

$$\tau = k \sqrt{\sigma_1(\sigma_1 + \sigma_n)} + (1-k)(c_j + \sigma_n f_j) \quad (4)$$

或:

$$\tau = k \sqrt{\sigma_1(\sigma_1 + \sigma_n)} + (1-k) \sigma_n \tan\left(\varphi_0 + \overline{JRC} \log \frac{\sigma_c}{\sigma_n}\right) \quad (5)$$

式中 k 为岩体结构面连通率, 其余符号意义同前。

表 5 列出了按上述方法分析获得的漫湾电站左岸节理岩体的连通率和相应的综合抗剪强度指标。

表 5 根据岩体结构面连通率推算的强度指标

岩体类型	连通率 K (%)	抗剪强度指标	
		c (MPa)	f
强风化	95%	0.07	0.66
微~弱风化	90%	0.15	0.74

#### 4. 节理岩体综合强度指标的研究结果

将上述三个方法计算得到的节理岩体的抗剪强度参数以及漫湾电站左岸加固原有设计参数综合列于表 6 中。

从表 5 中可以看到, 按本研究三个途径所得到的成果具有很好的一致性, 且均高于目前所采用的设计值, 这是出于设计使用的允许安全系数较低(L.25), 留有一定的安全余度的考虑。

#### 四、结 语

在岩质边坡的稳定分析中, 确定节理岩体的抗剪强度始终是一个十分重要但又极为困难的课题。漫湾水电站左岸边坡施工过程中所揭示的现象, 为合理的确定强度指标提供了实例。本文采用了工程地质和岩石力学综合分析的方法, 探索出一条合理确定节理岩

体综合抗剪强度指标的途径, 所获得的成果表明这些方法能够较好地说明左岸边坡的失稳机理, 为左岸边坡的加固设计提供了可靠的依据。这些方法对于其它类似的工程有重要的参考价值 and 借鉴意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 汪小刚, 陈祖煜, 刘文松, 1992, 应用蒙特卡洛方法确定节理岩体的连通率和综合抗剪强度指标, 岩石力学与工程学报, 11卷, 4期, 345-355。
- [2] 国际岩石力学实验室和现场标准化委员会, 岩石力学试验建议方法, 上册, 郑天雨, 傅冰骏, 卢世宗译校, 煤炭工业出版社, 1982年7月。
- [3] Hoek, E. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion value from the Hoek-Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abst. pp. 227-229. 1990.
- [4] Lajtai, E. Z. Strength of discontinuous rocks in shear. Geotechnique. 19(2), pp. 218-233.

#### · 书 讯 ·

#### 《同步电机运行基本理论与计算机算法》

本书详细推导了以 aq0 分量、aβ0 分量、fb0 分量和 120 分量表示的同步电机基本方程式, 并运用这些方程式分析了同步电机的三相短路、各种不对称短路、自同步、异步并列、稳态异步运行、强制振荡、自由振荡、自发激磁等特殊运行状态。对所分析的各种运行状态, 都首先阐明其物理过程, 然后进行解析法求解, 最后作计算机辅助分析。计算机辅助分析部分, 都分别给出了数学模型、计算流程和数值计算实例, 据此, 可自编程序并进行自检。

本书可供电机、电力工业部门广大科技人员参考, 也可作电机、电力工程类专业研究生教材。

定价: 26.50元 欢迎邮购

地 址: 北京市西城区三里河路 6 号 (二里沟)  
水利电力出版社发行部

邮 编: 100044

邮 费: 请按书款总额加汇 10% 的邮挂费