

DOI: 10.11779/CJGE202008023

大型贯穿层间错动带尺寸效应研究

张春生¹, 沈俊良^{1, 2}, 褚卫江^{1, 2}, 刘宁^{1, 2}, 石安池¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 白鹤滩水电站坝址区层间错动带具有规模宏大、贯穿性强、地质条件复杂等特点, 对地下洞群稳定具有显著影响, 由于层间错动带规模巨大, 常规现场试验无法考虑波长起伏带来的影响, 需引入尺寸效应分析。针对层间错动带力学参数取值开展了系统性研究工作, 结合现场试验获取力学强度参数, 通过引入数字近景摄影测量技术结合颗粒流数值方法对层间错动带进行尺寸效应分析。研究揭示了层间错动带的力学参数随粗糙度系数 JRC、软弱充填厚度、尺寸效应变化的相应映射规律。在工程运用中, 结合前期层间错动带研究成果, 对白鹤滩尾调室穹顶进行形体优化, 该实践方法可为其他工程提供相应参考。

关键词: 层间错动带; 白鹤滩; 粗糙度系数; 现场试验; 尺寸效应; 颗粒法

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)08-1564-07

作者简介: 张春生(1964—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事水电站设计和岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhang_cs@ecidi.com。

Size effects of large penetrable bedding fault zone

ZHANG Chun-sheng¹, SHEN Jun-liang^{1, 2}, CHU Wei-jiang^{1, 2}, LIU Ning^{1, 2}, SHI An-chi¹

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China; 2. HydroChina-Itasca R&D Center, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The bedding fault zone in the dam site of Baihetan Hydropower Station is characterized by large scale, strong penetrability and complex geological conditions, which can control the underground caverns. Due to the large scale, the effects of wavelength fluctuation of the bedding fault zone cannot be considered accurately by normal field tests, and the size effect analysis needs to be introduced. A systematic study on the mechanical parameters of the bedding fault zone is carried out. Combining with the mechanical strength parameters obtained by the field tests, and the size effects of the bedding fault zone are analyzed by introducing the digital close-range photogrammetry technology and the particle flow numerical method. The mapping laws of the mechanical parameters of the bedding fault zone with joint roughness coefficient, soft filling thickness and size effects are revealed. In the engineering application, taking the advantages of the research results of bedding fault zone, the dome shape of tailrace surge chamber of Baihetan Hydropower Station is optimized. The method can provide a reference for other projects.

Key words: bedding fault zone; Baihetan; roughness coefficient; in-situ test; size effect; particle flow

0 引言

软弱层带是在构造作用下形成的较周围岩体显著软弱的断裂构造。其厚度可以是几厘米到几十厘米, 延伸长度几十米到几公里不等。由于软弱层带的存在, 使得岩体易沿其发生滑动, 从而导致岩体的大规模破坏, 危及工程建设。因此工程建设过程中, 对软弱层带的研究就显得十分重要。国内外已有不少专家学者对层间错动带分布规律、渗透特征及力学性质等进行了深入的研究, 并编制了一些技术文件用于指导工程应用^[1-2]。自然界中的软弱层带的起伏程度和粗糙程度可以明显地影响节理的变形和强度特征^[3-4], 而且, 它

们的影响方式和程度还与受力状态密切相关^[5]。同时, 含水率对层间错动带也有较大的影响^[6-7], 以及伴随有组合体结构效应、弱胶结效应等^[8-9]。在剪切试验方面, 蒋宇静讨论了不同边界条件剪切作用下岩石节理力学性能与分形维数变化的关系^[10], 巴顿在大量剪切试验的基础上提出 JRC-JCS 模型^[14]。层间错动带的尺寸效应也是经典难题之一, 通过试验方式来研究尺寸效应是最直接最有效的方式之一^[11-15]。然而, 对于类似白

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1865203)

收稿日期: 2019-05-08



图 1 白鹤滩右岸层间错动带分布概况

Fig. 1 Distribution of bedding fault zone in Baihetan Hydropower Station

鹤滩工程的长大层间错动带, 起伏波长 3~4 m, 起伏高度 15~20 cm, 目前无法开展大尺寸的剪切试验, 且原位试验设备复杂、成本昂贵、耗时费力, 存在一定的局限性。随着计算机技术的发展, 应用数值方法进行尺寸效应的研究应属当下最为可行的方案。

本文研究成果以世界规模最大的金沙江白鹤滩水电站地下洞室群工程为背景, 这些广泛分布的软弱层间错动带问题是制约地下洞室群的关键技术问题。针对层间错动带力学参数的取值开展了系统性的研究工作。基于大规模现场和室内试验, 获取层间错动带的力学参数, 同时引入数字近景摄影测量技术获取层间错动带面壁起伏特征, 结合颗粒流法, 克服了传统经验方法确定层间错动带力学参数时, 无法定量考虑层间错动带粗糙度、软弱充填物厚度和尺寸效应的影响, 建立了模拟层间错动带剪切试验模型, 获得了粗糙度、软弱充填厚度、尺寸效应的变化导致层间错动带力学参数变化的规律。工程中, 层间错动带研究成果用于⑦号尾水调压室的穹顶体形优化。

1 白鹤滩层间错动带概况

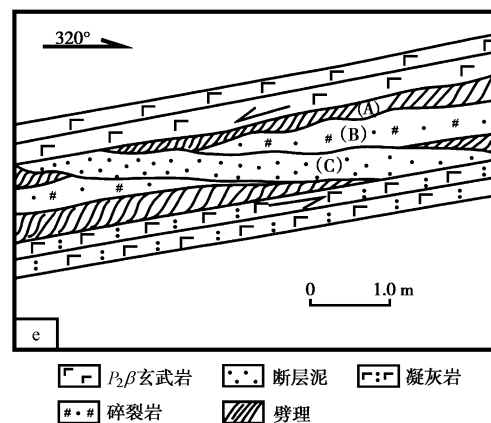
1.1 工程背景

白鹤滩坝区中的许多结构面具有程度不同的起伏特征, 根据结构面的规模、性状特征及工程地质意义, 参考有关规范, 将结构面划分为四级, 其中Ⅱ、Ⅲ级又分别划分为两个亚级。其中最典型为层间错动带为Ⅱ₁级(图 1)。层间错动带(以“C”表示)是在坝区峨眉山组玄武岩岩流层之间发育的缓倾角构造错动带, 自第二岩流层到第十一岩流层共发育 11 条。其形成为玄武岩岩流层顶部较为软弱的凝灰岩在构造改造过程中发生破碎的凝灰质破碎夹层。由于凝灰质成分对水的敏感性, 在地下水的作用下易于软化甚至泥化, 其空间展布与岩流层产状近于一致。

层间错动带常分布于每个岩流层的中下部致密玄武岩内, 主要走向北东, 倾向南东, 少量为北西走向,

倾角在 10°~30°。自预可研勘察以来, 经地质测绘、平洞、钻孔揭露, 层间错动带有 11 条, 层内错动带有 170 条。各级错动带均表现为多期活动特征。

早期错动即在燕山期与区域性近南北向褶皱同期形成, 显示上盘向上的反向滑动, 晚期为上盘向下的正向滑动。在早期区域褶皱过程中, 当上覆微晶玄武岩与下伏凝灰岩发生剪切时, 最先产生了错动带上下边缘的劈理化带(图 2 中 A 处), 指示了错动带早期反向滑移运动; 继之产生的是错动带中间的碎裂构造岩(图 2 中 B 处); 最后产生的是斜向贯通错动带顶、底界面发育, 反映晚期正向滑移运动的断层泥砾或含砾碎粉岩带(图 2 中 C 处)。层间错动带的产状平缓, 是边坡、坝肩抗力体及地下洞室围岩稳定的控制性结构面^[16], 对层间错动带力学特性的研究具有重要意义。

图 2 层间错动带构造岩发育特征示意图^[17]Fig. 2 Development characteristics of structural mineral rock in bedding fault zone^[17]

1.2 物理力学试验

对坝区各勘探点及露头的错动带进行了详细的调查、取样和分析工作, 对主要的缓倾角错动带进行室内及现场的多种方法测试。白鹤滩坝区共进行现场试验有抗剪试验 34 组、蠕变试验 1 组、变形试验水平铅直各 9 组, 渗透试验 2 组。室内试验有颗粒分析 697 组, 直剪试验 223 组, 物理性质试验 273 组, 渗透试

验 156 组等。现场剪切试验过程遵循《工程岩体试验方法标准》^[19]。

根据室内颗粒分析试验成果统计, 坝区层间错动带以岩屑夹泥型最多 (如 C2、C4), 其次是岩块岩屑型和泥夹岩屑型。根据刚性承压板变形试验统计结果看, 无充填型错动带的变形模量相对较高, 为 4.14 GPa, 岩块岩屑型、岩屑夹泥型及泥夹岩屑型错动带变形模量较低, 分别为 0.24, 0.14, 0.08 GPa。常规抗剪试验由于每块试件接触面的凹凸情况不同, 导致抗剪试验曲线略有差异, 为了降低数据离散性对反演分析的影响, 选择接触面起伏不大、且抗剪试验曲线理想的试件作为研究对象, 以试验屈服强度平均值作为标准值, 从统计结果看, II₁ 级和 III₁ 级错动带总体上均表现出随性状变好参数提高的趋势, 同类型 II₁ 级和 III₁ 级错动带抗剪强度较接近。由于该强度参数是基于现场剪切试验的成果, 是国内规范常用的结构面参数取值方法, 但该方法的现场试验尺寸是 0.5 m×0.5 m, 对于白鹤滩规模巨大的层间错动带, 无法考虑其整体波长起伏带来的影响, 因此, 需结合数值方法进一步对层间错动带的强度参数进行尺寸效应研究。

2 层间错动带面壁特征统计

手工测量是岩体结构面信息采集较为传统的方法, 本文利用数字近景摄影测量技术对层间错动带进行有效信息提取。基于空间射影理论的直接线性变换算法, 利用数字化的三维照片, 便可以获得结构面的位置、产状、长度和空间分布。通过演绎共线条件方程式, 建立像点坐标系与相应空间坐标之间直接的线性关系, 方程如下:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 + \Delta x + f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} &= 0, \\ y - y_0 + \Delta y + f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 Δx , Δy 为像点坐标纠正值; $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$

为像空间坐标系相对此空间坐标系的方向余弦; X, Y, Z 为目标点空间坐标; X_s, Y_s, Z_s 为摄站点的空间坐标。

由共线方程可得到待定点的误差方程式:

$$V = [A : B] \begin{bmatrix} t \\ X \end{bmatrix} - L \quad (2)$$

用矩阵表示的某一像点的误差方程为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & B_1 \\ 0 & A_2 & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ X \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

某一像对上的同名点的误差方程为

$$V_1 = [v_{x1} \ v_{y1}]^T \quad (4)$$

式中, x, y 为以像主点为原点的像点坐标, X, Y, Z 为相应的地面点坐标, f 为像片主距, $X_s, Y_s, Z_s, \phi, \omega, \kappa$ 为外方位元素。通过绝对控制点或者相对控制点代入共线方程式 (通常包括 12 个数据), 求出像片的外方位元素和所求点的坐标。通过三维网格将这些像点串联起来, 形成三维数据化地形模型 (即 DTM 模型), 便可以通过解译提取选区内所需要的相关数据。

2.1 面壁三维信息整体解决方案

通过对现场的多次查勘, 由于 C4 延伸范围较大, 选择了典型特征露头区域 (图 3), 开展三维数码拍摄工作。为获得较好的解译精度, 现场对所选区域内部的水进行处理和杂草进行了铲除, 同时架设了一个约 2 m 高的台架进行拍摄工作, 每个区域同时布置 3 个站点, 成果选取匹配度较好的两站进行模型生成并解译。

工作所选区域生成的模型精度 (即均方差) 较高, 达到毫米级, 可以用于结构面起伏度的测量工作。根据各区域内包体分布情况, 考虑剖面分布尽量通过最多的包体顶点, 剖面还分别从两个不同方向进行切割, 保证能够量测到各区域内最大起伏高度值, 量测时均在三维模型空间下操作, 为此, 实际量测的长度和高度均为实际值。

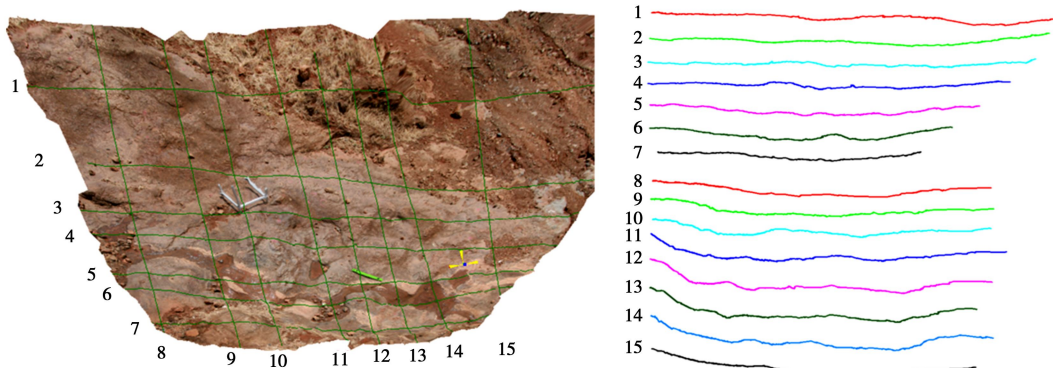


图 3 层间错动带 C4 典型露头区摄影取样 (24 mm 镜头成像)

Fig. 3 Photographic sampling of typical outcrop area A2 in bedding fault zone C4

2.2 面壁起伏特征统计

综合典型露头区域测量统计结果, 区域包体间起伏波长长度主要分布在 2.0~3.0 m (图 4), 起伏波长长度应用时可取其平均值 2.5 m; 区域包体间起伏高度应用时可考虑选取 10~25 cm (图 5) 3 个统计分段平均值的加权平均值, 即 17.05 cm, 而全部起伏高度平均值为 17.54 cm, 分段平均值的加权平均值可作为可靠的统计应用结果。

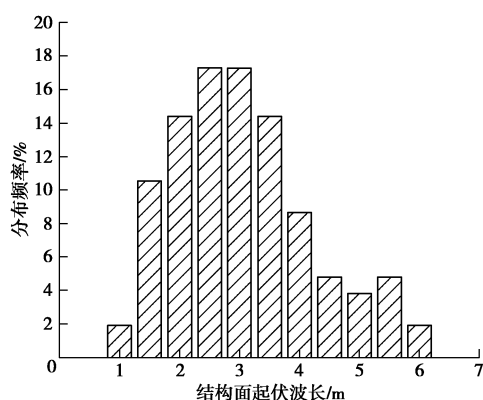


图 4 C4 统计区结构面起伏波长分布统计

Fig. 4 Statistics of fluctuation wavelength distribution of structural plane in C4

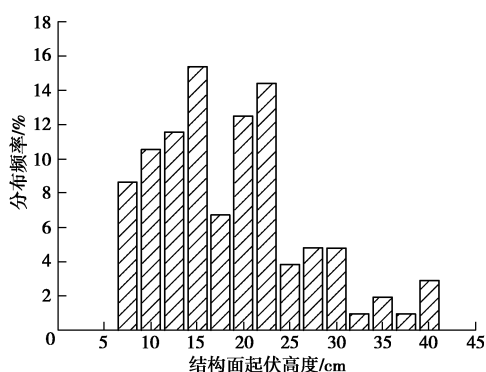


图 5 C4 统计区结构面起伏高度分布统计

Fig. 5 Statistics of undulation height distribution of structural plane in C4

3 基于 PFC 层间错动带数值试验

无论是试验方法还是经验方法, 均难以定量获得层间错动带力学性质随着考察尺寸增大的变化特征, 本节采用数值方法针对层间错动带开展数值试验研究。根据现场试验所获得的层间错动带充填物的岩体力学参数, 采用颗粒流方法根据现场数码照相技术获得的层间错动带面壁起伏特征开展层间错动带中粗糙度、软弱充填物厚度、及尺寸因素对错动带力学参数的定量影响。

3.1 相关影响因素敏感性分析

本节在参考 Cundall^[20]研究方法与成果的基础上,

采用 CPM 模型进行岩石结构面剪切力学行为的颗粒流数值模拟研究^[21]。模型介质重现岩土材料的宏观力学响应并不容易, 其中的 PFC 细观参数标定过程需要进行一系列与室内试验或现场条件类似的模型试验, 并将模型试件的宏观力学响应与室内试验或原位测试结果进行对比, 通过试错法反复矫正^[22], 直到模型介质的宏观力学响应满足要求为止, 该标定工作不在本文赘述。粗糙度敏感性分析以层间错动带反演分析为基础, 分别考虑 4 组不同的粗糙度系数 (JRC), 即 JRC=2~4, 8~10, 10~12, 18~20, 以此来研究不同粗糙度系数对 C4 层间错动带强度参数的影响。针对不同的粗糙度需要单独建立相应的模型, 以实施剪切试验。图 6 是不同粗糙度系数所对应的层间错动带参数统计, 综合计算结果可以发现, 即便层间错动带的充填厚度达到 20 cm, 粗糙度仍然对力学参数具有一定的影响, 从定性角度: ①层间错动带摩擦角随着粗糙度系数的增大而呈现增大趋势; ②层间错动带黏聚力随着粗糙度系数的增大而呈现减小趋势。针对 C4 的数码照相成果可以知道, 层间错动带的粗糙度一般在 8~12 变化, 因此可以认为对于 C4 这一类泥夹岩屑型的层间错动带, 粗糙度的变化可以导致摩擦角发生 27%左右的变化, 黏聚力发生 11%左右的变化。

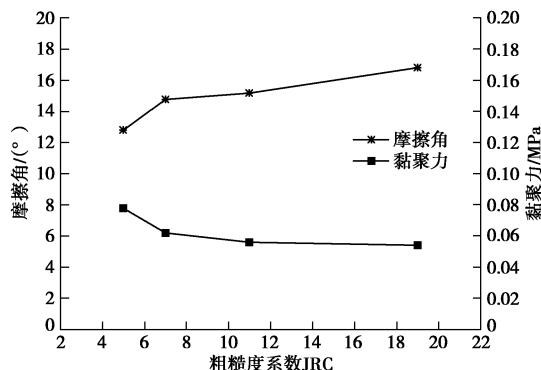


图 6 不同粗糙度系数的层间错动带强度参数影响

Fig. 6 Influences of strength parameters in bedding fault zone with different roughness coefficients

针对层间错动带充填厚度, 分别对 10, 15, 20 cm 的厚度开展数值分析工作, 3 种不同粗糙度条件下, 针对 JRC=8~10, 10~12, 18~20 这 3 种粗糙度情形, 开展法向压力为 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 MPa 条件下的直剪试验。所对应的充填厚敏感性分析的计算模型图 7 所示。

表 1 为不同粗糙度系数及不同充填厚度所对应的层间错动带参数统计, 当错动带物质的软弱充填厚度超过 10 cm 后, 随着充填厚度的增大, 摩擦角普遍呈降低趋势, 而黏聚力变化不大。以结构面粗糙度系数 JRC=10~12 的数值试验结果为例, 当层间错动带结

构面厚度分别取 10, 15, 20 cm 时, 层间错动带结构面摩擦角分别为 20.32° , 18.34° , 15.21° , 而层间错动带结构面黏聚力分别为 0.051, 0.052, 0.056 MPa。对于 C4 这种泥夹岩屑型的层间错动带来说, 随着厚度的增加, 摩擦系数迅速降低, 而黏聚力逐渐上升, 但黏聚力的影响甚微。

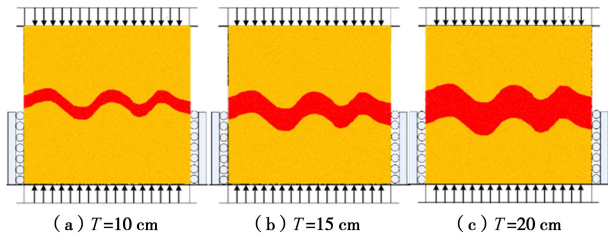


图 7 不同层间错动带厚度的数值模型 (JRC=10~12)

Fig. 7 Numerical model for thickness of different bedding fault zone (JRC=10~12)

表 1 不同充填物厚度强度参数值计算结果

Table 1 Calculated results of strength parameters in numerical tests with different filling thicknesses

粗糙度系数	层间错动带厚度/cm	摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa
8~10	10	19.29	0.054
	15	17.74	0.060
	20	14.80	0.062
10~12	10	20.32	0.051
	15	18.34	0.052
	20	15.21	0.056
18~20	10	22.08	0.050
	15	20.42	0.052
	20	16.84	0.054

3.2 层间错动带尺寸效应研究

同样, 对于尺寸效应对力学参数的影响研究, 根据三维数码照相的成果, 采用离散元颗粒流法生成不同尺寸直剪试验试样, 试样尺寸涵盖 0.5 m \times 0.5 m, 1.0 m \times 1.0 m, 2.0 m \times 2.0 m, 4.0 m \times 4.0 m, 8.0 m \times 8.0 m 这 5 组不同尺度, 在相同粗糙度系数 JRC 和相同软弱充填厚度的前提下, 模拟不同法向压力条件下的剪切试验, 法向压力包括 4 个等级, 即 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 MPa, 如图 8 所示。

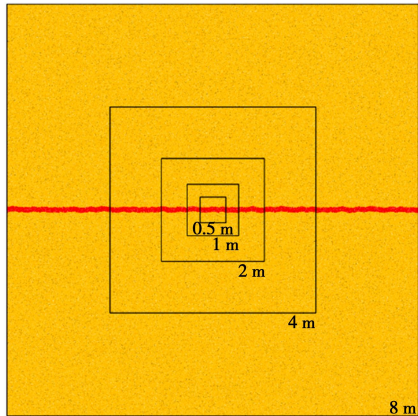


图 8 不同几何尺寸的错动带抗剪数值试验模型

Fig. 8 Numerical shear test models with different geometrical sizes

总体上, 随着试验尺寸的增大, 黏聚力和摩擦角呈降低趋势, 并趋于平稳。当层间错动带的试验尺寸在 2 m 以内时, 黏聚力和摩擦角的变化比较明显, 当层间错动带的试验尺寸达到 4 m 时, 黏聚力和摩擦角趋于稳定, 可以认为泥夹岩屑型层间错动带代表 REV 尺寸为 4 m; 引入考虑尺寸效应后, 当试验尺寸由 0.5 m 增大至 8 m 时, 摩擦角由 14.88° 降低为 12.56° , 降低幅度 15.6%; 黏聚力由 0.062 MPa 降低至 0.030 MPa, 降低幅度 51.6%, 相关拟合公式分别如图 9, 10 所示。

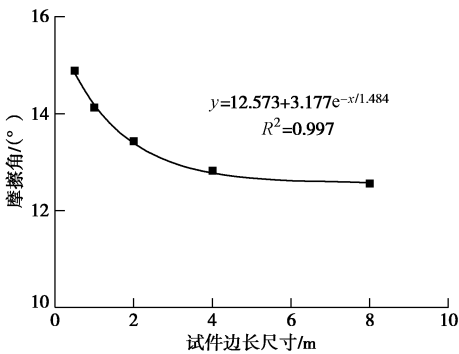


图 9 不同试件尺寸与摩擦角影响

Fig. 9 Influences of friction angle with different specimen sizes

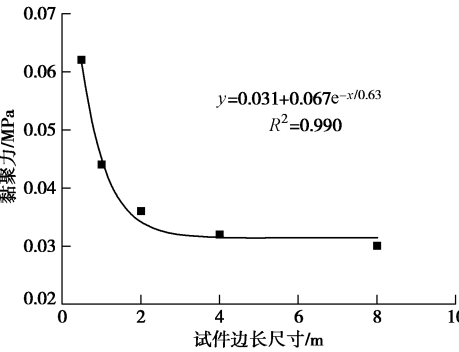


图 10 不同试件尺寸与黏聚力影响

Fig. 10 Influences of cohesion with different specimen sizes

4 层间错动带研究成果应用

白鹤滩坝址区及地下洞室群共发育 11 条大规模的层间错动带, 作为主体工程的坝基边坡、地下厂房都不同程度受到层间错动带的影响, 对于地下厂房洞室群而言, 可以说层间错动带制约着厂房围岩稳定和破坏。尾水调压室穹顶开挖体形变化对枢纽布置、开挖工程量、水力条件等影响甚小, 不同体形的尾水调压室穹顶施工方案无本质区别, 因此围岩稳定条件是局部体形选择最为关键的控制性因素。推荐采用圆筒形方案, 其穹顶具备“双向”成拱的特征, 可以显著改善长廊形尾调室顶拱受力条件和边墙变形状态。

在白鹤滩特定的地应力场和岩体结构条件下, 圆筒形尾调穹顶围岩仍然受到高应力和不利构造 (如层

表 2 ⑦号尾水调压室不同体形开挖响应特征汇总表

Table 2 Summary of excavation response characteristics of No. 7 tailrace surge chamber with different dome shapes					
定量指标		部位	圆弧形	半圆形	椭圆形
最大变形量级 /mm	C4 上盘	穹顶位移	16~18	13~15	11~14
		E/W 侧翼	14~21	13~22	13~21
	N/S 侧翼	25~30	16~28	15~28	
	C4 下盘	E/W 侧翼	40~83	40~75	41~81
		N/S 侧翼	33~76	34~121	39~159
应力分布	C4 下盘	穹顶应力集中	34.1	36.4	36.8
σ_1 /MPa		E/W 侧翼松弛	18.7	15.7	15.5
		N/S 侧翼松弛	15.8	12.6	10.3
σ_3 /MPa	C4 下盘拉应力		+0.17	+0.19	+0.26
塑性区深度/m		C4 下盘	5.6	6.2	9.2

间带和柱状节理等)的作用,加之尾调室本身规模宏大(开挖跨度达 50 m),所以,尾调室穹顶稳定仍然是白鹤滩地下工程建设面临的挑战之一。通过尾调室体形方案比选后,针对层间错动带 C4 斜切⑦号尾调室穹顶侧翼部位,其穹顶稳定性受层间错动带 C4 影响非常之大,需调整合适的形状来满足工程安全开挖的需求。图 11 为⑦号尾调室 3 种顶拱优化比选。从应力分布来看,半圆形、椭圆形穹顶应力集中程度基本相当,相比圆弧形增大 2~3 MPa。从变形来看,3 种体形穹顶变形量值和差异均不大,两翼变形较大,相比圆弧形和半圆形体形,椭圆形穹顶南侧侧翼 C4 下盘岩体变形较大,增大约 30%~110%。从塑性区深度看,圆弧形、半圆形和椭圆形体形的穹顶塑性区深度总体相差不大,但在层间错动带 C4 切割 S 侧部位的塑性区深度有一定差异。相关优化参数对比如表 2 所示。因此,由于层间错动带的影响,曲率较大的椭圆形体形不利于控制两翼的松弛问题,圆弧形、半圆形体形总体差异不大。综合穹顶围压及拱肩部位体形过渡考虑,⑦号尾水调压室穹顶采用半圆形体形。

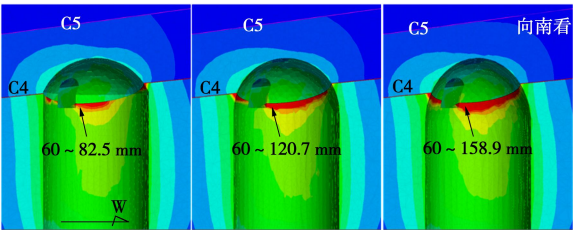


图 11 ⑦号尾调室顶拱方案比选

Fig. 11 Comparison of dome shapes of No.7 tailrace surge chamber

5 结 论

本文对白鹤滩层间错动带力学参数的取值开展了系统性的研究工作,通过引入数字近景摄影测量技术结合颗粒流数值方法对层间错动带进行尺寸效应分析,研究成果应用于工程实际。

(1)白鹤滩坝区自第二岩层到第十一岩层共

发育 11 条层间错动带,具有规模大、贯穿性强等特点,在围岩稳定中起关键控制性作用。结合现场试验,初步得到层间错动带 C4 的力学强度参数。

(2)引入数字近景摄影测量技术对层间错动带 C4 典型露头进行统计测量,相比传统经验估值,较为精准地获取层间错动带 C4 的面壁起伏特征。

(3)结合获取的面壁起伏特征,采用颗粒流对层间错动带进行相关敏感性分析:层间错动带摩擦角随着粗糙度系数的增大而呈现增大趋势;层间错动带黏聚力随着粗糙度系数的增大而呈现减小趋势;同时受填充厚度影响,当层间错动带的充填厚度超过 10 cm 后,随着充填厚度的增大,摩擦角普遍呈降低趋势,而黏聚力变化不大;引入尺寸效应后,摩擦角和黏聚力均随着尺度增大而相应减小,并趋于平稳。

(4)白鹤滩地下厂房洞室群开挖过程中,结合前期层间错动带研究成果。对处于层间错动带 C4 的⑦号尾水调压室穹顶进行体形优化,由此证明半圆形穹顶体形更适应于开挖应力成拱条件,且有利于侧翼应力平顺过渡,同时针对性地评估了层间错动带对影响部位的围岩稳定,并为后续开挖方案决策提供了技术支撑。

参考文献:

[1] GOODMAN R. The mechanical properties of joints[C]// Proc 3rd Int Congr International Society of Rock Mechanics, National Academy of Sciences, 1974, Washington D C: 127 - 140.

[2] BANDIS S, LUMSDEN Ac, BARTON Nr. Fundamentals of rock joint deformation[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1983, 20(2): 249 - 268.

[3] MIN K B, RUTQVIST J, TSANG C F, et al. Stress-dependent permeability of fracture rock masses: a numerical study[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2004, 41(10): 1191 - 1210.

[4] HUDSON J A. Engineering Rock Mechanics[M]. London: Redwood Publishing Company, 1997.

- [5] STARK T D, EID H T. Drained residual strength of cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(5): 856 - 871.
- [6] 江 权, 冯夏庭, 周 辉, 等. 层间错动带的强度参数取值探讨[J]. 岩土力学, 2011, **32**(11): 3379 - 3386. (JIANG Quan, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Discussion of strength value for interlayer shearbelt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(11): 3379 - 3386. (in Chinese))
- [7] 刘一伟, 张继春, 郭学彬, 等. 软弱夹层强度参数的室内模拟[J]. 西南科技大学学报, 2007(1): 30 - 34, 47. (LIU Yi-wei, ZHANG Ji-chun, GUO Xue-bing, et al. Study on laboratory simulation of the weak intercalation intensity parameters[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2007(1): 30 - 34, 47. (in Chinese))
- [8] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰. 围压效应与软弱夹层泥化的可能性分析[J]. 地质评论, 1990, **30**(2): 160 - 167. (ZHANG Xian-gong, NIE De-xin, HAN Wen-feng. The effect of confining pressure and the possibility of argillization of weak intercalations[J]. Discussion of Geology, 1990, **30**(2): 160 - 167. (in Chinese))
- [9] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 地应力作用下软弱层带的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 584 - 587. (FU Wen-xi, NIE De-xin, SHANG Yue-quan, et al. Study on engineering properties of weak layers underground stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 584 - 587. (in Chinese))
- [10] JIANG Y J, LI B, TANABASHI Y. Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, **43**(6): 837 - 846.
- [11] 刘宝琛, 张寄生, 杜奇中. 岩石抗压强度的尺寸效应 [J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(6): 611 - 614. (LIU Bao-chen, ZHANG Ji-sheng, DU Qi-zhong. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(6): 611 - 614. (in Chinese))
- [12] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005(4): 112 - 118. (YANG Sheng-qi, SU Cheng-dong, XU Wei-ya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. Engineering Mechanics, 2005(4): 112 - 118. (in Chinese))
- [13] 张占荣, 盛 谦, 杨艳霜, 等. 基于现场试验的岩体变形模量尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2875 - 2881. (ZHANG Zhan-rong, SHENG Qian, YANG Yan-shuang, et al. Study of size effect of rock mass deformation modulus based on in-situ test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2875 - 2881. (in Chinese))
- [14] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, **10**(1/2): 1 - 54.
- [15] 梁正召, 张永彬, 唐世斌, 等. 岩体尺寸效应及其特征参数计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(6): 1157 - 1166. (LIANG Zheng-zhao, ZHANG Yong-bin, TANG Shi-bin, et al. Size effect of rock masses and associated representative element properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(6): 1157 - 1166. (in Chinese))
- [16] 宋肖冰, 石安池, 郑伟锋, 等. 金沙江白鹤滩水电站坝区左岸边坡变形特征及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 2): 3533 - 3538. (SONG Xiao-bing, SHI An-chi, ZHENG Wei-feng, et al. Analysis of slope deformation characteristics and mechanism in leftbank of Baihetan hydropower station Jinsha River[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3533 - 3538. (in Chinese))
- [17] 张春生, 石安池, 吴关叶, 等. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究报告专题 18: 缓倾角错动带工程地质研究报告[R]. 杭州: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 2011. (ZHANG Chun-sheng, SHI An-chi, WU Guan-ye, et al. Feasibility Study Report of Baihetan Hydropower Station on Jinsha River 18: Engineering Geology Study Report of Low-Dip Bedding Fault Zone[R]. Hangzhou: Huadong Engineering Corporation Limited, 2011. (in Chinese))
- [18] BARTON N, BANDIS S. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock[C]// Proceedings of the 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1982, Berkeley: 739 - 760.
- [19] 土工试验方法标准: GB/T50123—1999[S]. 1999. (Standard for Soiltest Method: GB/T50123—1999[S]. 1999. (in Chinese))
- [20] CUNDALL P A. Numerical experiments on rough joints in shear using a bonded particle model[C]// LEHNER F K, URAI J L ed. Aspects of Tectonic Faulting. Berlin: Springer, 1999: 1 - 9.
- [21] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(7): 997 - 1010.
- [22] 余华中, 阮怀宁, 褚卫江. 岩石节理剪切力学行为的颗粒流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(7): 1482 - 1490. (YU Hua-zhong, RUAN Huai-ning, CHU Wei-jiang. Particle flow code modeling of shear behavior of rock joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(7): 1482 - 1490. (in Chinese))