

DOI: 10.11779/CJGE201801014

柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力影响

王 鹏¹, 洪望兵¹, 宋 刚²

(1. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要: 为研究柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力对其产生的影响, 选取了 8 种不同尺寸典型洞室, 利用单孔声波法测试松弛深度, 对 161 组测试成果进行数据统计及曲线拟合, 建立了松弛深度经验计算公式。研究表明, 断面尺寸及地应力是影响洞室松弛深度的 2 个主要因素; 洞室边墙上部松弛深度最大, 尺寸效应明显, 与洞室高度表现出明显的线型相关性, 高地应力会加剧这种尺寸效应, 在低地应力条件下, 松弛深度一般是洞室高度的 1/6, 高地应力条件下, 松弛深度一般是洞室高度的 1/3, 极端情况下 24 m 高洞室边墙中部松弛深度会达到 10.2 m。

关键词: 柱状节理玄武岩; 松弛; 尺寸效应; 地应力; 声波测试

中图分类号: TU452; P642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)01 - 0139 - 08

作者简介: 王 鹏(1985 -)男, 河南辉县人, 学士, 主要从事水电工程地质勘察方面的研究。E-mail: wang_p5@ecidi.com。

Influences of size effect and in-situ stress of columnar jointed basalt relaxation zone

WANG Peng¹, HONG Wang-bing¹, SONG Gang²

(1. Zhejiang Huadong Construction Engineering Co. Ltd, Hangzhou 310014, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: To investigate the influences of size effect and in-situ stress of columnar jointed basalt relaxation zone, 8 typical tunnels with different sizes are selected, and an empirical formula for relaxation depth is established based on the data statistics and curve fitting of 161 groups of test results by using the single-hole acoustic wave tests. The test results show that the excavation section size and high in-situ stress are the two main influencing factors of the relaxation depth. The maximum relaxation depth appears in the middle-upper part of side wall of cavern, the size effect is obvious and linearly correlates with the height of cavern, and high in-situ stress will increase the size effect. Under the low in-situ stress, the relaxation depth is generally 1/6 of the height of cavern. Under the high in-situ stress, the relaxation depth is generally 1/3 of the height of cavern, and in the middle of 24 m-high cavern wall, the extreme relaxation depth will reach 10.2 m.

Key words: columnar jointed basalt; relaxation; size effect; in-situ stress; acoustic wave test

0 引 言

柱状节理是玄武岩特有的构造, 它往往将玄武岩切割成六棱柱状或其他形状不规则的棱柱状。白鹤滩水电站坝址区玄武岩部分岩层中不仅发育柱状节理, 而且在柱状节理切割的柱体内发育不规则的纵向(平行柱体)与横向(垂直柱体)微裂隙, 岩体中还发育较多的缓倾角结构面, 柱状节理及微裂隙切割后岩体中岩块的直径一般为 10 cm 左右, 这是白鹤滩柱状节理玄武岩的特点。柱状节理玄武岩在金沙江白鹤滩水电站坝基、引水发电系统、导流洞、泄洪洞及大量交通洞内都有发育, 柱状节理玄武岩开挖后岩体松弛问题是白鹤滩水电站主要工程地质问题之一。

对柱状节理玄武岩的科学研究最早可以追溯到 1875 年, 由 Mallet^[1]开始对玄武岩柱状节理形成机制及特征进行研究, 随着工程建设的发展, 大量工程揭

露了柱状节理玄武岩, 柱状节理玄武岩工程特性的研究也得到开展, 石安池等^[2]、张春芳等^[3]、赵文^[4]、徐卫亚等^[5]对柱状节理玄武岩分布、岩体结构、变形特征、岩体分类及质量评价等进行了研究; 狄圣杰等^[6]、闫东旭等^[7-8]以白鹤滩坝基为研究对象, 针对柱状节理数学模型、横观各向同性本构、节理面屈服准则、等效弹性模量等内容进行了深入研究; 郝宪杰等^[9]基于电镜扫描系统, 结合现场调查, 对柱状节理的破坏模型与机制等进行了试验研究; 胡文义等^[10]、王清玉^[11]、张建海等^[12]、朱道建^[13]对洞室松弛圈测试技术及应用、拟合及分析等方面进行了研究; 巢志明等^[14]对柱状节理岩体开展了渗透模型试验研究, 推导出渗透系数公式, 并研究了不同围压条件下的渗透特征。

石安池等^[15]、李广场等^[16]根据白鹤滩勘探平洞、模拟洞、试验洞相关数据对柱状节理玄武岩松弛特性进行了综合研究,并对柱状节理玄武岩松弛的尺寸效应进行了一定的研究;李邵军等^[17]对白鹤滩导流洞柱状节理玄武岩破坏进行了全过程综合观测试验与反馈分析。由于条件限制,对柱状节理玄武岩松弛尺寸效应的研究仅停留在中小型地下洞室中,最大的是白鹤滩模拟洞,开挖尺寸为70 m×6.5 m×13 m(长×宽×高)。在前人研究的基础上,补充了白鹤滩水电站导流洞、尾水洞、泄洪洞等大型地下洞室不同开挖断面下的单孔声波测试成果,统计了8种不同尺寸地下洞室,约161组测试数据,利用数据统计及曲线拟合等手段,对柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力的影响进行进一步的研究,认为断面开挖尺寸及地应力是影响洞室边墙及顶拱松弛深度的两个主要影响因素,并提出了洞室各部位松弛深度的经验估算方法。

1 柱状节理玄武岩特征

白鹤滩水电站柱状节理的发育是不均匀的,柱体大小、长度也不相同,可以将柱状节理玄武岩分为3类:第一类柱状节理玄武岩(直径13~25 cm,长度2~3 m)、第二类柱状节理玄武岩(直径25~50 cm,长度0.5~2 m)、第三类柱状节理玄武岩(直径0.5~2.5 m,长度1.5~5 m)。其中第一类柱状节理玄武岩柱体直径小,柱体发育密集,工程性质差,岩体松弛问题突出。该类柱状节理玄武岩主要分布在 $P_2\beta_3^3$ 、 $P_2\beta_3^2$ 层两个亚层内,本文主要选取该两层微风化及新鲜岩体为研究对象,均未考虑风化及卸荷因素影响。

第一类柱状节理玄武岩柱体长度一般2~3 m,柱体倾角为 $75^\circ \sim 85^\circ$,断面形状以五边形为主,其次为四边形,少量六边形,边长集中在12~24 cm范围,平均边长约15.2 cm,每个柱体单元内部还存在一组迹线与柱体轴线近平行的陡倾角隐性节理面和一组迹线与柱体轴线近垂直的缓倾角隐性节理面,隐性节理表

面具有波浪起伏的特征,较粗糙,一般长约数10 cm^[18],裂隙面呈灰黑色,未完全切断柱体,岩块直径为10 cm左右,岩体呈柱状镶嵌结构,见图1。

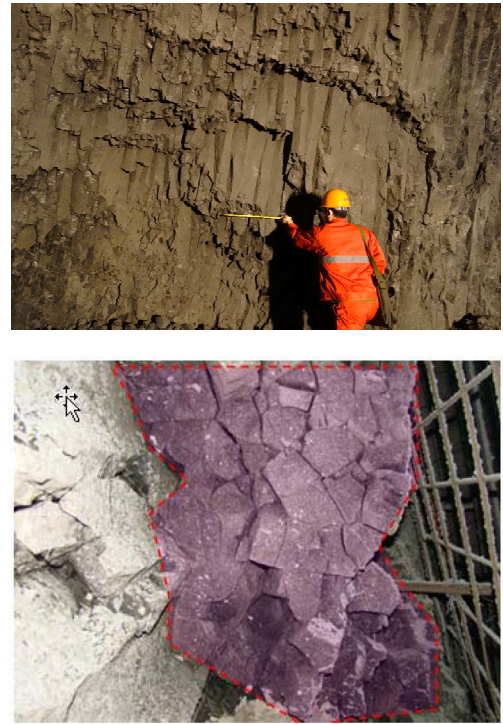


图1 导流洞内柱状节理玄武岩结构典型照片^[18]

Fig. 1 Typical photos of rock mass in columnar jointed basalt in diversion tunnel

2 测试点选取

分别选取了勘探平洞、模拟洞、导流洞、右岸尾水洞、泄洪洞作为研究对象,其中导流洞已全部开挖完成,右岸尾水洞及泄洪洞仅局部完成了中上层的开挖。相关洞室平面位置见图2,洞室参数统计见表1。

2.1 勘探平洞

勘探平洞选取了PD36、PD37、PD61和PD133共4个平洞作为统计样本,洞室断面2 m×2 m,平洞

表1 地下洞室主要参数统计表

Table 1 Statistical values of parameters of underground caverns

序号	部位	岸别	宽度/m	高度/m	垂直埋深/m	水平埋深/m	最大主应力/MPa	分层高度/m		
								1层	2层	3层
1	平洞	—	2~3	2~3	129~160	58~120	5.0~7.5	—	—	—
2	灌浆洞	左岸	12	6	100	100~120	5.0~6.5	—	—	—
3	模拟洞	右岸	6.5	13	300	160	5.98~6.15	4	4	5
4	导流洞	左岸	20	24	170~240	250~538	14.2~22.4	10	7	7
5		右岸			332~459	226~306	18.4~28			
6	右岸尾水洞	右岸	16.7	20.2	616~771	430~760	22~26	10.2	4	6
7	泄洪洞	左岸	27.4	20.4	174~180	311~442	8~11	8.9	10	1.5

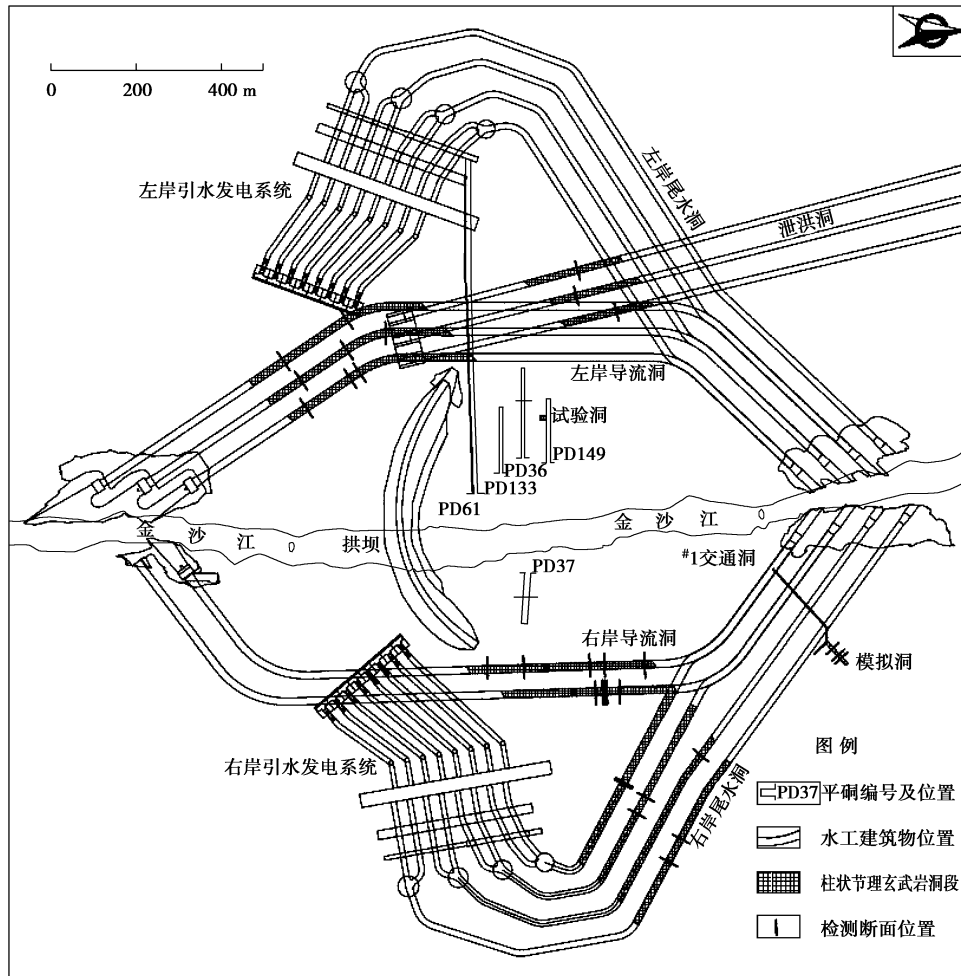


图2 洞室平面位置图

Fig. 2 Plan position of caverns

垂直边坡开挖。为进一步了解平洞断面松弛特征,分别在 PD36 平洞洞深 120 m 处和 PD37 平洞洞深 58 m 处各布置一个松弛测试断面,断面尺寸约为 3 m×3 m,垂直埋深分别为 160, 129 m。根据 PD36、PD133 地应力测试成果,第一主应力 $\sigma_1=5.0\sim 7.5$ MPa,方位 N33°W~59°W,倾角为 6°~34°,属低地应力区。

2.2 灌浆试验洞

柱状节理玄武岩固结灌浆试验场地位于坝基下游 250 m 左岸 PD149 平洞内,试验区长 15 m,宽 12 m,高度约 6 m,垂直埋深约 100 m,水平埋深 100~112 m 段。参考附近 PD67、PD143 平洞地应力测试成果,第一主应力 $\sigma_1=5.0\sim 6.5$ MPa,方位 N33~60°W,倾角为 26°~36°,属低地应力区。

2.3 模拟洞

模拟洞总长 70 m,分为支护段和毛洞段 2 个研究段,长度分别为 30, 40 m;断面为城门洞型,开挖尺寸 6.5 m×13 m (宽×高),洞内布置了 3 条观测断面。模拟洞垂直埋深约 300 m,水平埋深约 160 m,地应力测试结果表明,试验洞区域第一主应力值为

5.98~6.15 MPa,方位为 N38.9°~41.1° E,倾角为 25.4°~35.5°,属低地应力区。洞室采用分层开挖方式,共分为 3 层,各层高度分别为 4, 4, 5 m。

2.4 导流洞

导流洞共布置 5 条,总长为 8980.26 m,断面采用城门洞型,开挖尺寸 20 m×24 m (宽×高)。左岸导流洞监测断面垂直埋深 170~240 m,水平埋深 250~538 m,根据地应力测试成果及数值模拟分析,左岸第一主应力值大小为 14.2~22.4 MPa,方向为 136°,近水平;右岸垂直埋深 332~459 m,水平埋深 226~306 m,第一主应力值大小为 18.4~28.0 MPa,方向为 166°~194°,近水平^[9],属中高地应力区。

隧洞采用新奥法施工,开挖方式采用分层分幅开挖,共分上、中、下 3 层开挖,上层采用分幅开挖,中下层不分幅,3 层开挖高度分别为 10, 7, 7 m。

2.5 右岸尾水洞

右岸 4 条尾水洞中 2 条与导流洞结合布置,断面采用城门洞型,开挖尺寸 16.7 m×20.2 m (宽×高),测试断面垂直埋深 616~771 m,水平埋深 430~760

m, 参考厂房区地应力成果: 大水平主应力的方向为NNE, 一般在 $N0^{\circ}\sim 20^{\circ}E$ 之间, 大小 $15.0\sim 24.0$ MPa, 实测最大值为 30.99 MPa, 第一主应力方向为NNE向, 一般在 $N0^{\circ}\sim 20^{\circ}E$ 之间, 倾角 $2^{\circ}\sim 11^{\circ}$, 量值约在 $22\sim 26$ MPa, 属高应力区。尾水洞开挖方式同导流洞, 三层开挖高度分别为 $10.2, 4, 6$ m。

2.6 泄洪洞

泄洪洞共3条, 仅平行布置于左岸, 断面为城门洞型, 开挖尺寸 $17.4\text{ m}\times 20.4\text{ m}$ (宽 \times 高), 监测断面垂直埋深 $174\sim 180$ m, 水平埋深 $311\sim 442$ m, 根据地应力测试成果及数值模拟分析, 第一主应力大小为 $8\sim 11$ MPa, 方向与岩层倾向基本一致, 方向 $N40^{\circ}W$, 倾角为 15° , 属低地应力区。泄洪洞开挖方式同导流洞, 三层开挖高度分别为 $8.9, 10, 1.5$ m。

3 松弛判定标准及测试成果

(1) 测试断面均进行了单孔声波法测试, 部分洞段进行了跨孔声波法测试、地震波法测试、钻孔摄

像等, 其中地震波对柱状节理玄武岩松弛测试适用性差, 为保证测试数据的统一性, 均以单孔声波法测试数据为准, 松弛判定标准如下: ① 根据波形判定: 当波形曲线有明显拐点时, 以拐点对应的深度值作为岩体松弛深度的下限值; ② 根据声波波速相对值或绝对值判定: 当声波波形曲线没有明显拐点时, 以声波纵波波速小于 4000 m/s 或小于平均纵波波速 90% 时作为岩体松弛深度。

(2) 洞室不同部位松弛测试数据统计见表2~7; 模拟洞及右岸导流洞各层开挖后松弛圈典型断面见图3。

4 地应力影响分析

为研究地应力对松弛深度的影响, 选取了尺寸相同的左右岸导流洞, 尺寸相近的泄洪洞1层、右岸尾水洞1层进行对比, 测试数据统计见表8。在开挖尺寸相近的情况下, 右岸导流洞松弛深度是左岸导流洞相同部位的 $1.4\sim 1.9$ 倍, 右岸尾水洞1层松弛深度是

表2 拱顶松弛测试数据统计表

Table 2 Statistical values of relaxation test data of cavern vault

部位	尺寸/m		面积 /m ²	松弛深度/m			松弛区平均波 速/(m·s ⁻¹)	非松弛区平均波 速/(m·s ⁻¹)	波速比降 /%	统计 个数
	宽度	高度		最大值	最小值	平均值				
试验平硐	3.0	3.0	9.0	1.0	0.6	0.80	4852	5473	11.3	2
模拟洞1层	6.5	4.0	26.0	0.8	0.8	0.80	4206	4649	9.5	3
模拟洞2层	6.5	8.0	52.0	1.0	0.8	0.93	3992	4748	15.9	3
模拟洞3层	6.5	13.0	84.5	1.1	0.8	0.97	3699	4783	22.7	3
泄洪洞1层	17.4	9.0	131.0	1.5	0.4	0.83	4365	5118	14.7	3
尾水洞1层	16.7	10.0	145.0	4.2	2.0	3.27	3685	4768	22.7	6
右岸导流洞	19.7	24.2	442.0	2.3	2.3	2.30	—	—	—	1

表3 拱肩松弛测试数据统计表

Table 3 Statistical values of relaxation test data of cavern spandrel

部位	尺寸/m		面积 /m ²	松弛深度/m			松弛区平均波 速/(m·s ⁻¹)	非松弛区平均波 速/(m·s ⁻¹)	波速比降 /%	统计 个数
	宽度	高度		最大值	最小值	平均值				
试验平硐	3.0	3.0	9.0	0.80	0.5	0.60	4635	5197	10.8	4
模拟洞1层	6.5	4.0	26.0	1.40	0.4	0.97	4390	4907	10.5	6
模拟洞2层	6.5	8.0	52.0	1.51	0.5	1.08	4363	4867	10.3	6
模拟洞3层	6.5	13.0	84.5	1.60	0.7	1.25	4011	4869	17.6	6
泄洪洞1层	17.4	9.0	131.0	2.00	0.6	1.38	4201	5184	19.0	4
尾水洞1层	16.7	10.0	145.0	5.00	0.8	2.79	3770	4805	21.5	14
右岸导流洞	19.7	24.2	442.0	3.84	2.3	3.10	—	—	—	4

表4 边墙上部松弛测试数据统计表

Table 4 Statistical values of relaxation test data at upper part of cavern wall

部位	尺寸/m		面积 /m ²	松弛深度/m			松弛区平均波 速/(m·s ⁻¹)	非松弛区平均波 速/(m·s ⁻¹)	波速比降 /%	统计 个数
	宽度	高度		最大值	最小值	平均值				
模拟洞2层	6.5	8.0	52.0	2.3	0.7	1.37	3123	4969	37.1	6
模拟洞3层	6.5	13.0	84.5	3.8	1.6	2.15	3042	5081	40.1	6
左岸导流洞	19.7	24.2	442.0	4.7	3.5	4.18	—	—	—	8
右岸导流洞	19.7	24.2	442.0	7.3	6.9	7.10	—	—	—	2

表 5 边墙中部松弛测试数据统计表

Table 5 Statistical values of relaxation test data in middle of cavern wall

部位	尺寸/m		面积 /m ²	松弛深度/m			松弛区平均波速/(m·s ⁻¹)	非松弛区平均波速/(m·s ⁻¹)	波速比降 /%	统计个数
	宽度	高度		最大值	最小值	平均值				
平硐	2.0	2.0	4.0	0.36	0.17	0.25	4747	5234	9.3	6
平硐	3.0	3.0	9.0	0.60	0.35	0.46	4678	5512	15.1	3
模拟洞导洞	4.0	4.0	16.0	0.70	0.60	0.58	4461	5225	14.6	4
模拟洞 1 层	6.5	4.0	26.0	1.40	0.40	0.83	4250	5295	19.7	6
模拟洞 3 层	6.5	13.0	84.5	3.30	1.80	2.55	2548	5272	51.7	6
左岸导流洞	19.7	24.2	442.0	4.70	3.10	3.77	—	—	—	11
尾水洞 2 层	16.7	14.0	145.0	3.00	2.50	2.75	3664	4670	21.5	2
右岸导流洞	19.7	24.2	442.0	7.80	5.90	7.05	—	—	—	8

注: 5[#]导流洞 0+120~0+195 m 受其他因素影响, 最大松弛深度 10.2 m, 未统计。

表 6 边墙下部松弛测试数据统计表

Table 6 Statistical values of relaxation test data at lower part of cavern wall

部位	尺寸/m		面积 /m ²	松弛深度/m			松弛区平均波速/(m·s ⁻¹)	非松弛区平均波速/(m·s ⁻¹)	波速比降 /%	统计个数
	宽度	高度		最大值	最小值	平均值				
模拟洞 2 层	6.5	8.0	26	2.6	0.7	1.50	3023	5244	42.3	6
泄洪洞 1 层	17.4	9.0	131	2.4	0.9	1.65	4060	5077	20.0	2
左岸导流洞	19.7	24.2	442	2.7	2.3	2.55	—	—	—	6
尾水洞 1 层	16.7	10.0	145	3.0	2.5	2.75	3626	4650	22.0	2
尾水洞 2 层	16.7	14.0	211	3.8	2.8	3.30	3665	4777	23.3	2
右岸导流洞	19.7	24.2	442	4.4	2.4	3.59	—	—	—	10

表 7 底板松弛测试数据统计表

Table 7 Statistical values of relaxation test data of cavern floor

部位	尺寸/m		松弛深度/m			松弛区平均波速 / (m·s ⁻¹)	非松弛区平均波速 / (m·s ⁻¹)	波速比降 /%	统计个数
	宽度	高度	最大值	最小值	平均值				
平硐	3.0	3.0	1.0	0.6	0.80	4395	5458	19.5	4
模拟洞	6.5	13.0	2.1	0.7	1.24	3818	5214	26.8	15
灌浆洞	12.0	6.0	3.1	1.8	2.11	3771	5040	25.2	9
右岸导流洞	19.7	24.2	2.0	0.8	1.45	3478	5125	32.1	16

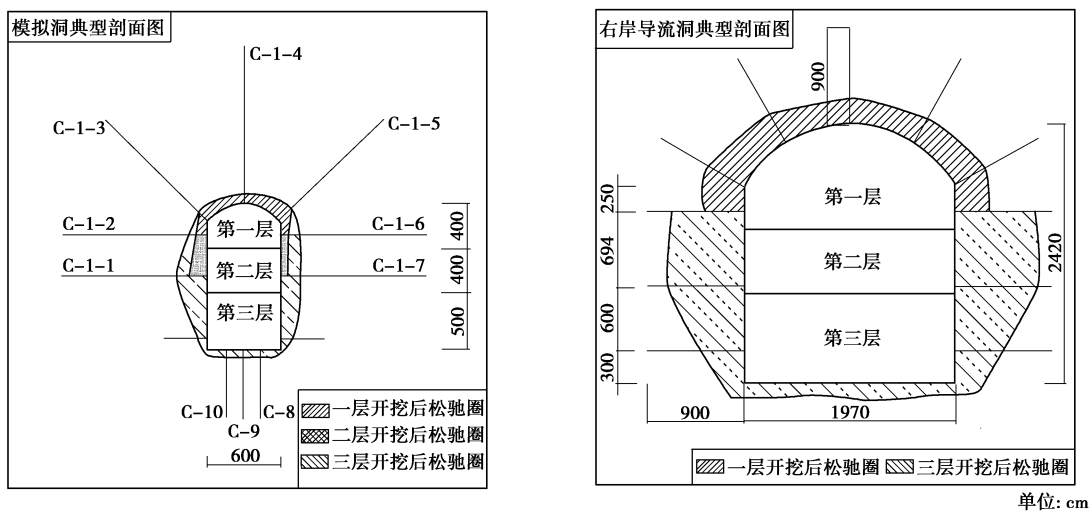


图 3 各层开挖后松弛圈典型剖面

Fig. 3 Typical profile of relaxation circle after excavation of each layer

表8 不同地应力下同尺寸洞室松弛深度数据统计表

Table 8 Statistical values of relaxation test data of caverns with same size under different in-situ stresses

部位	尺寸(宽×高) /m	垂直埋深 /m	最大主应力 /MPa	顶拱平均松弛深度/m		边墙平均松弛深度/m		
				拱顶	拱肩	上部	中部	下部
左岸导流洞	20×24	170~240	14.2~22.4	—	—	4.18	3.77	2.55
右岸导流洞		332~459	18.4~28.0	2.30	3.10	7.10	7.05	3.59
右岸/左岸			1.27~1.29			1.70	1.87	1.41
泄洪洞1层	17.4×9	174~180	8~11	0.83	1.38	—	—	1.65
右岸尾水洞1层	16.7××10	616~771	22~26	3.27	2.79	—	—	2.75
右岸/左岸			2.36~2.75	3.94	2.03			1.67

泄洪洞相同部位的1.7~3.9倍。可见地应力是影响柱状节理玄武岩松弛深度的最主要影响因素之一，地应力高于20 MPa后，柱状节理玄武岩松弛深度出现了大幅度增长。

5 尺寸效应分析

由于柱状节理玄武岩松弛深度在不同地应力条件下表现出很大的差异性，对不同地应力条件下松弛圈尺寸效应分别进行分析。

(1) 低地应力条件下，洞室高度小于4 m时，各部位松弛深度基本相当，基本都小于0.8 m；洞室高度大于4 m时，松弛深度差异性变大，边墙上部松弛深度最大，边墙下部次之，顶拱最小。

(2) 低地应力条件下，边墙松弛深度与洞室高度表现出较为明显的线型相关性，边墙中上部松弛深度增长速率基本一致，松弛深度约为边墙高度的1/6；边墙下部由于受到底板约束，增长速率相对较小，拱顶与拱肩松弛深度基本不受边墙高度影响，松弛深度一般小于1.5 m，见图4。

(3) 低地应力条件下，洞室拱肩、边墙下部松弛深度受洞室面积变化影响很小，随着面积增加，表现出缓慢增加趋势；边墙中上部松弛深度开始随着面积增大线型增加，但当面积大于85 m²时逐渐稳定，不再大幅增加，见图5。

(4) 低地应力条件下，洞室各部位松弛深度随洞室宽度加大有一定增加趋势，但无明显线型规律，见图6。

(5) 高地应力条件下，洞室边墙中部松弛深度随高度增加出现大幅度增加，增长速率是低地应力条件下的2.5倍，约为洞室高度的1/3，见图7。极端条件24 m高洞室边墙中部松弛深度最大可达10.2 m。

(6) 高地应力条件下，洞室在10~24 m高度范围内，随洞室高度增加，拱顶、拱肩、边墙下部松弛深度无明显变化，尺寸效应不明显，见图7，松弛深度一般在2.3~3.6 m之间，是低地应力条件下的2~3

倍，说明地应力对洞室顶拱、边墙下部松弛深度起控制性作用。

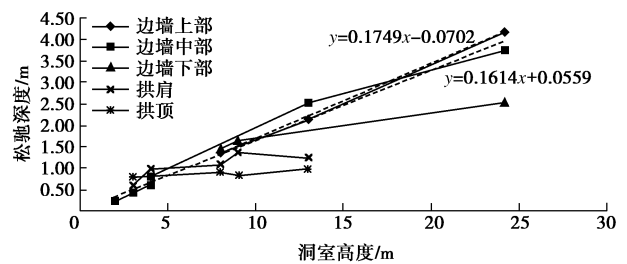


图4 低地应力条件下洞室不同部位松弛深度与洞室高度关系曲线

Fig. 4 Relationship between relaxation depth and height at different parts of cavern under low in-situ stress

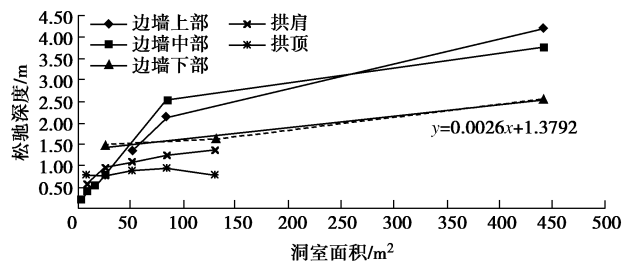


图5 低地应力条件下洞室不同部位松弛深度与洞室面积关系曲线

Fig. 5 Relationship between relaxation depth and area at different parts of cavern under low in-situ stress

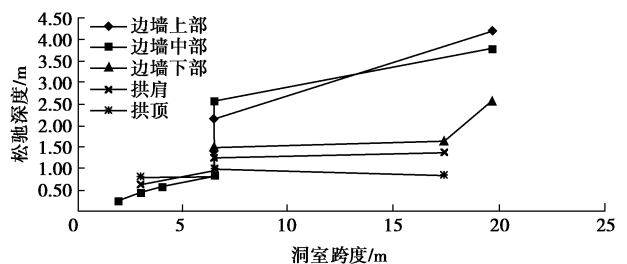


图6 低地应力条件下洞室不同部位松弛深度与洞室跨度关系曲线

Fig. 6 Relationship between relaxation depth and span at different parts of cavern under low in-situ stress

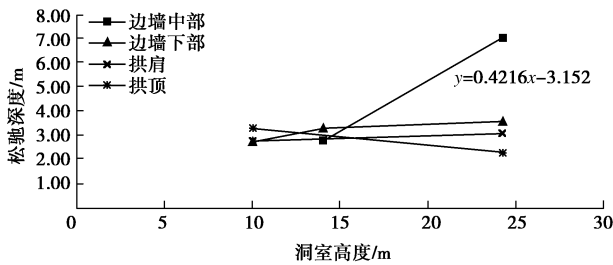


图7 高地应力条件下洞室不同部位松弛深度与洞室高度关系曲线

Fig. 7 Relationship between relaxation depth and height at different parts of cavern under high in-situ stress

(7) 洞室底板松弛深度未表现出明显的尺寸效应, 地应力影响也较小, 松弛深度一般小于 2 m, 见表 7。

(8) 对比导流洞内各部位测试数据, 发现大型地下洞室边墙松弛深度最大, 顶拱次之, 底板最小, 见表 7, 8。洞室开挖后地应力进行调整, 第一主应力 (σ_1) 与开挖线近平行, 第三主应力 (σ_3) 与开挖线近垂直, 而柱状节理柱体近直立, 倾角为 $75^\circ \sim 85^\circ$, 所以顶拱及底板柱体处于横向受压状态, 而边墙柱体处于轴向受压状态, 更易产生松弛, 而边墙上部约束最小, 松弛深度最大。

(9) 松弛岩体平均波速、波速比降随洞室高度增大、洞室断面面积增加整体有下降趋势, 但无明显线型规律。波速比降一般在 10%~25%之间, 模拟洞内达到 37%~51%, 主要发生在第 2、3 层开挖后的边墙, 可能与模拟洞高跨比较大, 局部地质条件复杂有关。

6 经验公式

研究认为断面尺寸、地应力是影响洞室松弛深度的两个主要因素, 选取洞室高度及地应力量值为计算变量, 用最小二乘法求取二者关系参数, 结合测试结果, 建立白鹤滩水电站坝区柱状节理玄武岩地下洞室内不同部位松弛深度经验计算公式:

$$\left. \begin{aligned} l_c &\geq 0.5 \text{ 且 } \leq 1.5\alpha && \text{(顶拱)}, \\ l_c &= \alpha h / 6 && \text{(边墙中上部)}, \\ l_c &= \alpha(1+h/16) && \text{(边墙下部}(h \geq 8)), \\ l_c &\geq 0.5 \text{ 且 } \leq 2 && \text{(底板)}. \end{aligned} \right\} (1)$$

式中 l_c 为松弛深度 (m); h 为洞室高度 (m); σ 为地应力值 (MPa); α 为地应力影响系数, $\sigma < 20$ MPa, $\alpha=1$, $\sigma \geq 20$ MP, 顶拱 $\alpha=1+\sigma/20$, 边墙上部 $\alpha=1+\sigma/30$, 边墙下部 $\alpha=1+\sigma/40$ 。

7 结 论

(1) 断面尺寸、地应力是影响柱状节理玄武岩洞

室松弛深度的 2 个主要因素, 大型地下洞室边墙松弛深度最大, 顶拱次之, 底板最小。

(2) 洞室边墙中上部松弛深度最大, 尺寸效应明显, 与洞室高度表现出线型相关性, 高地应力会加剧这种尺寸效应。低地应力条件下, 边墙中上部松弛深度一般是洞室高度的 1/6, 高地应力条件下, 松弛深度一般是洞室高度的 1/3, 极端情况下 24 m 高洞室边墙中部松弛深度会达到 10.2 m。

(3) 洞室拱顶、拱肩松弛深度无明显的尺寸效应, 地应力起控制作用; 洞室底板无明显尺寸效应, 地应力对其产生的影响也较小。

(4) 通过对地下洞室内柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应进行研究, 建立了白鹤滩坝区柱状节理玄武岩松弛深度经验计算公式, 对其他洞室开挖支护具有一定指导意义, 对坝基柱状节理玄武岩松弛特性研究具有一定参考意义。

参考文献:

- [1] ROBERTMALLETT F R S. On the origin and mechanism of production of the prismatic(or columnar) structure of basalt[J]. Philosophical Magazine, 1925, 50(4): 122 - 135.
- [2] 石安池, 唐鸣发, 周其建. 金沙江白鹤滩水电站柱状节理玄武岩岩体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2079 - 2086. (SHI An-chi, TANG Ming-fa, ZHOU Qi-jian. Research of deformation characteristics of columnar jointed basalt at Baihetan hydropower station on Jinsha river[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2079 - 2086. (in Chinese))
- [3] 张春芳, 许 模, 李 虎, 等. 柱状节理玄武岩岩体结构与结构面的分形研究[J]. 四川地质学报, 2009, 29(3): 292 - 295. (ZHANG Chun-fang, XU Mo, LI Hu, et al. A study of structure and structural plane fractal of basalt rock mass with columnar joints[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(3): 292 - 295. (in Chinese))
- [4] 赵 文. 玄武岩分布特征及工程性状[J]. 铁道勘察, 2009(5): 60 - 63. (ZHAO Wen. Consideration on distribution characteristics of basalt and engineering properties[J]. Railway Investigation and Surveying, 2009(5): 60 - 63. (in Chinese))
- [5] 徐卫亚, 郑文棠, 石安池. 水利工程中的柱状节理岩体分类及质量评价[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 262 - 270. (XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, SHI An-chi. Classification and quality assessment of irregular columnar jointed basaltic rock mass for hydraulic engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 262 - 270. (in Chinese))
- [6] 狄圣杰, 徐卫亚, 王 伟, 等. 柱状节理岩体横观各向同性

- 本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, **40**(6): 881 - 887. (DI Sheng-jie, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Transversely isotropic constitutive properties of a columnar jointed rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, **40**(6): 881 - 887. (in Chinese))
- [7] 闫东旭, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体宏观等效弹性模量尺寸效应研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(2): 243 - 250. (YAN Dong-xu, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Research of size effect on equivalent elastic modulus of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(2): 243 - 250. (in Chinese))
- [8] 闫东旭, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体宏观等效强度参数的柱体尺寸效应[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, **34**(3): 334 - 342. (YAN Dong-xu, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Column size effect of macroscopic equivalent strength parameter for columnar jointed rock mass[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, **34**(3): 334 - 342. (in Chinese))
- [9] 郝宪杰, 冯夏庭, 江权, 等. 基于电镜扫描实验的柱状节理隧洞卸荷破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1647 - 1655. (HAO Xian-jie, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Research on unloading failure mechanism of columnar jointed rock mass in tunnel based on scanning electron microscopy experiments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1647 - 1655. (in Chinese))
- [10] 胡文义. 单孔声波法在岩体松动圈测试中的应用[J]. 四川水力发电, 2009, **28**(5): 64 - 67. (HU Wen-yi. Application of single hole sonic method in rock mass relaxation zone test[J]. Sichuan Water Power, 2009, **28**(5): 64 - 67. (in Chinese))
- [11] 王清玉. 洞室松弛圈测试技术与应用[J]. 水利水电工程设计, 2012, **31**(2): 46 - 49. (WANG Yu-qing. Test technology and application of relaxation circle of cavern[J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2012, **31**(2): 46 - 49. (in Chinese))
- [12] 张建海, 胡著秀, 杨永涛, 等. 地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(6): 1191 - 1197. (ZHANG Jian-hai, HU Zhu-xiu, YANG Yong-tao, et al. Acoustic velocity fitting and monitoring feedback analysis of surrounding rock loosening zone in underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(6): 1191 - 1197. (in Chinese))
- [13] 朱道建. 柱状节理岩体开挖卸荷效应及破裂区分布规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, **44**(10): 1967 - 1973. (ZHU Dao-jian. Unloading effect and rupture zone distribution of columnar joints[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, **44**(10): 1967 - 1973. (in Chinese))
- [14] 巢志明, 王环玲, 徐卫亚, 等. 柱状节理岩体渗透性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1407 - 1416. (CHAO Zhi-ming, WANG Huan-ling, XU Wei-ya, et al. Model tests on permeability of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1407 - 1416. (in Chinese))
- [15] 石安池, 唐鸣发, 马锋, 等. 柱状节理玄武岩专题研究工程地质研究报告[R]. 杭州: 中国水电顾问集团华东勘察设计院研究院, 2011. (SHI An-chi, TANG Ming-fa, MA Feng, et al. Report of engineering geological research on the columnar jointed basalt[R]. Hangzhou: HydroChina Huadong Engineering Corporation, 2011. (in Chinese))
- [16] 李广场. 柱状节理玄武岩松弛特性[C]// 中国水力发电工程学会地质及勘探专业委员会、中国水利电力物探科技信息网 2012 年学术年会论文集. 贵阳, 2013: 341 - 346. (LI Guang-chang. Relaxation properties of columnar jointed basalt[C]// China Society for Hydropower Engineering (CSHE) Geology and exploration Specialized Committee, China Water Conservancy and Electric Power Geophysical Prospecting Science and Technology Information Network Proceedings of the 2013 Academic Year. Guiyang, 2013: 341 - 346. (in Chinese))
- [17] 李邵军, 江权, 陈炳瑞. 金沙江白鹤滩水电站导流洞柱状节理玄武岩破坏全过程综合观测试验与反馈分析[R]. 武汉: 中国地质科学院武汉岩土力学研究所, 2013. (LI Shao-jun, JIANG Quan, CHEN Bing-rui. Comprehensive and synthetic observation experiment and feedback analysis of columnar jointed basalt in Baihetan hydropower station diversion tunnel on Jinsha River[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese))
- [18] 江权, 冯夏庭, 樊义林. 柱状节理玄武岩各向异性特性的调查与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(12): 2527 - 2535. (JIANG Quan, FENG Xia-ting, FAN Yi-lin, et al. Survey and laboratory study of anisotropic properties for columnar jointed basaltic rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(12): 2527 - 2535. (in Chinese))
- [19] 苏恒先, 王鹏, 宋刚, 等. 白鹤滩水电站导流洞专项安全鉴定地质自检报告[R]. 杭州: 中国电建华东勘测设计研究院, 2014. (SU Heng-xian, WANG Peng, SONG Gang, et al. Geological self-check report on safety identification of Baihetan hydropower station diversion tunnel[R]. Hangzhou: PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, 2014. (in Chinese))