

DOI: 10.11779/CJGE20220845

柱状节理玄武岩松弛时空效应及其控制技术

刘 宁, 高要辉*, 陈平志

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 柱状节理玄武岩表现出开挖后易松弛的特性, 对白鹤滩水电站拱坝变形和地下洞室群稳定都有重要影响, 是该工程的关键岩石力学问题之一。白鹤滩水电站柱状节理玄武岩表现出卸荷松弛、破裂松弛和坍塌松弛 3 种类型, 采用钻孔声波测试为主、钻孔电视全景成像测试为辅的方法开展监测, 并建立松弛层划分标准; 发现开挖松弛具有显著的时间效应和空间效应; 松弛时间效应可用对数函数表征, 松弛大致在开挖 35 d 后趋于稳定, 松弛与支护的及时性和有效性密切相关; 松弛深度随着洞室跨度、开挖高度和断面面积的增加而不断增大, 边墙松弛增幅尤其显著; 开挖松弛是岩性、结构面、岩体结构和地应力共同控制的结果; 提出成型成套松弛控制技术, 取得了良好的控制效果。

关键词: 柱状节理玄武岩; 松弛; 时间效应; 空间效应; 控制技术

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)10-2052-10

作者简介: 刘 宁(1981—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的研究工作。E-mail: liu_n@hdec.com。

Relaxation time-space effects of columnar jointed basalt and their control technologies

LIU Ning, GAO Yaohui, CHEN Pingzhi

(PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: It is easy for the columnar jointed basalt to relax after excavation, which has important influences on the deformation of arch dam and the stability of the surrounding rock of underground caverns. Therefore, the relaxation of the columnar jointed basalt is one of the main rock mechanics problems in Baihetan Hydropower Station. It mainly includes three types: unloading relaxation, fracturing relaxation and collapse relaxation. The relaxation of columnar jointed basalt is monitored by using the borehole acoustic wave tests as the main monitoring method and the borehole TV panoramic imaging tests as the auxiliary monitoring method. It is found that the excavation-induced relaxation has significant time effects and space effects. The time effects of relaxation can be represented by the logarithmic function, and the relaxation tends to be stable after about 35 days of excavation. The macroscopic relaxation failure is closely related to timeliness and limitation of support. The relaxation depth, especially for side walls, increases gradually with the increase of the cavern span, excavation height and cross-sectional area. The relaxation of the columnar jointed basalt is the combined effects of lithology, structural plane, rock mass structure and in-situ stress. A series of control technologies are put forward, and good control effects are achieved.

Key words: columnar jointed basalt; relaxation; time effect; space effect; control technology

0 引言

柱状节理是玄武岩中常见的一种原生节理, 多见于厚层熔岩中, 往往将岩体切割成一种规则的多边形长柱体, 柱体基本垂直于熔岩层的延伸方向。在这些柱体尚未完全凝固硬化时, 如果熔岩继续向前流动, 将促使柱体一定部位发生倾斜, 此倾斜反映了熔岩的流动方向。

拱坝作为一种重要坝型, 国内外广泛应用。高拱坝承担水推力大, 坝基应力水平高, 对建基面岩体的强度、刚度、稳定性、抗渗性、耐久性及开挖成形要

求高^[1-2]。综合分析国内外高拱坝工程经验, 高拱坝建基岩体主要为弱风化下限-微新的坚硬岩体, 岩体级别以II~III₁ 级为主, 建基岩体变形模量不宜低于 8.0~10.0 GPa, 上部基础岩体可局部利用III₂ 级岩体。溪洛渡拱坝虽属玄武岩地层, 但拱坝坝基未出露柱状节理玄武岩^[3]。小湾、锦屏一级、二滩、拉西瓦等水电站拱坝坝基岩体质量均较好^[4-7]。白鹤滩水电站坝址区柱

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2021M691000)

收稿日期: 2022-07-06

*通信作者 (E-mail: gao_yh@hdec.com)

状节理发育, 岩芯破碎, RQD 值普遍较低, 完整性较差, 岩体力学特性表现为变形模量等力学指标相对较低, 且易受开挖施工影响而松弛^[8-11]。因此, 特殊的柱状节理玄武岩岩体工程特性复杂, 是白鹤滩高拱坝工程主要地质问题之一, 也是白鹤滩水电工程的主要岩石力学问题之一。

地下洞室作为水利水电工程的重要构筑物, 其围岩体主要以块状、厚层状结构岩体为主。但柱状节理发育的玄武岩体作为水工建筑物基础, 在白鹤滩水电站工程建设之前尚无系统的研究, 其可参考的水利水电工程案例少^[12-15]。尤其是白鹤滩水电站地下洞室顶拱及边墙受柱状节理影响, 其围岩稳定和成洞问题挑战巨大^[16-17]。

柱状节理岩体是一类几何形状特殊且为柱状镶嵌结构的地质体, 其完整性由柱间节理及柱内隐微节理所控制, 致使其力学特性的各向异性特征显著^[18-20]。在开挖卸荷作用下, 柱状节理岩体易因节理张开或岩体破裂而松弛, 且松弛深度具有显著的时间效应和空间效应^[10, 12, 21], 同时受应力条件和地质结构影响, 柱状节理岩体松弛程度远大于同类埋深和规模的一般岩体^[8, 12-13]。学者们对柱状节理岩体松弛特征、松弛效应、影响因素等进行了众多专题研究, 且从台阶高度、支护时机、支护手段等角度出发, 探讨不同工程措施对限制松弛深度发展的作用效果^[9, 16, 22-23], 这些研究为柱状节理岩体松弛控制研究提供了理论基础和技术参考。

本文以具有 300 m 级特高拱坝和巨型地下洞室群背景的白鹤滩水电站柱状节理玄武岩为研究对象, 通过现场多个部位钻孔声波和全景成像连续观测, 直观地揭示柱状节理玄武岩开挖松弛行为及其时间效应、空间效应, 阐明其开挖松弛机理, 为类似工程地质和岩石力学问题的处理加固提供理论支撑。

1 工程背景

1.1 白鹤滩水电站工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内, 距巧家县城 45 km, 为金沙江下游 4 个水电梯级中的第二个梯级, 上接乌东德梯级, 下邻溪洛渡梯级。白鹤滩水电站是当今世界建设规模最大、技术难度最高的水电工程, 如图 1 所示。白鹤滩水电站水轮发电机单机容量为 1000 MW, 地下洞室群总长度和总规模分别为 217 km 和 2500 万 m³, 地下厂房跨度为 34 m, 调压室直径为 43~48 m, 均为世界第一, 实现了中国高端装备制造的重大突破。

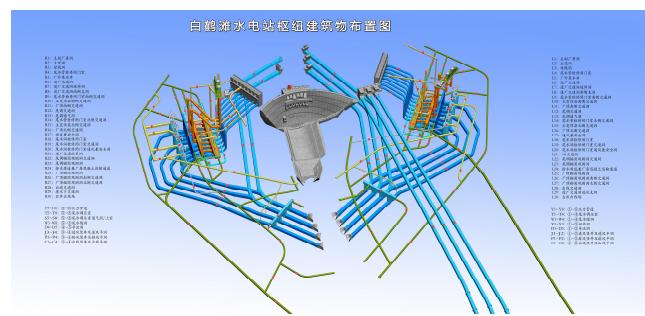


图 1 白鹤滩水电站枢纽建筑物布置图

Fig. 1 Layout of structures of Baihetan Hydropower Station

白鹤滩水电站工程区围岩主要为单斜岩层, 围岩岩性主要为 $P_2\beta_2^3$ 、 $P_2\beta_3^1$ 、 $P_2\beta_3^2$ 及 $P_2\beta_3^3 \sim P_2\beta_6^1$ 层隐晶质玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩及凝灰岩等, 岩体多为微风化或新鲜状态, 坚硬且完整性较好, 多呈块状、次块状结构, 少量的块裂结构, 围岩以 III₁、II 类围岩为主, 局部分布少量 IV 类围岩。

白鹤滩水电站地下厂房洞室群地应力以构造应力为主, 最大和中间主应力基本水平, 最小主应力大致垂直。左岸地下厂房洞室群水平和垂直埋深分别达 950~1050 m 和 260~330 m, 初始最大地应力为 19~23 MPa, 实测最大水平主应力达 33.39 MPa; 右岸地下厂房洞室群水平和垂直埋深分别达 630~800 m 和 420~540 m, 初始最大主应力 22~26 MPa, 实测最大水平主应力达 30.99 MPa。左右岸地下厂房洞室群由于局部受层间错动带影响, 其地应力值和产状特征均有所变化^[16, 24]。

1.2 柱状节理玄武岩工程地质特征

(1) 基本分类及空间分布

白鹤滩水电站玄武岩中柱状节理发育是不均匀的, 柱体大小、长度也不尽相同。根据柱体的直径和长度, 白鹤滩水电站柱状节理玄武岩可分为 3 类^[12, 23], 其中, 第一类柱状节理柱体玄武岩最为发育, 如图 2 所示的 $P_2\beta_3^3$ 层柱状节理发育密度大, 柱体直径 13~25 cm, 一般柱长 2~3 m, 柱体不规则, 未完全切割, 相互咬合, 柱体内隐微裂隙发育, 具有特有的“柱状镶嵌”结构; 第二类柱状节理发育不规则, 未切割成完整的柱体, 柱体长度一般在 0.5~2.0 m, 直径 25~50 cm, 其内微裂隙较发育, 但相互咬合, 未完全切断, 块度在 10 cm 左右; 第三类柱状节理发育不规则, 未切割成完整的柱体, 柱体粗大, 长度 1.5~5 m 不等, 直径 0.5~2.5 m, 切割不完全, 嵌合紧密。第一类柱状节理柱体玄武岩在坝基中下部出露, 占整个建基面面积的 39.9%, 同时在导流洞、尾水洞等部位出露, 是白鹤滩水电站工程的重点研究对象。



图 2 白鹤滩水电站第一类柱状节理玄武岩典型照片
Fig. 2 Typical photos of the first type of columnar jointed basalt in Baihetan Hydropower Station

(2) 典型开挖响应特征

白鹤滩水电站工程实践表明,柱状节理玄武岩开挖响应特征主要受自身岩体结构、赋存应力条件、岩体中结构面条件3个方面因素的影响,在建设过程中同时遭遇了柱状节理玄武岩的卸荷松弛、高应力条件下的破裂松弛、与结构面组合的松弛坍塌等围岩稳定问题。

a) 松弛破坏:柱状节理玄武岩在未受扰动时柱体镶嵌紧密,岩体承载力较高,但在开挖导致围压解除后易产生近开挖面的浅层岩体松弛,原嵌合紧密的柱体沿节理面和微裂隙产生松弛张开,但其整体岩体结构一般不会破坏,仅表层岩体可能出现局部的掉块现象,如图3所示。



图 3 柱状节理玄武岩松弛破坏
Fig. 3 Relaxation failure of columnar jointed basalt

b) 松弛破裂:柱状节理玄武岩松弛一般以受柱状节理面控制为主,但在地下洞室开挖后的二次应力集中区,偏应力(环向应力减径向应力($\sigma_1 - \sigma_3$))不断增加,可能致使肉眼不可见的隐微裂隙张开成新生破裂面,类似于完整岩体中片帮破坏的形成机制,从而出现如图4所示的开挖面浅层岩体松弛破裂现象,致使岩体完整性进一步降低,表层局部可能破裂成松散小块体。



图 4 柱状节理玄武岩松弛破裂

Fig. 4 Relaxation fracturing of columnar jointed basalt

c) 松弛坍塌:柱状节理玄武岩中构造(如层内错

动带、小断层、长大裂隙)发育时,将形成不同级别结构面组合控制的松弛坍塌问题。如图5所示,层内错动带切割顶拱时,破坏了柱状节理玄武岩的镶嵌结构和整体性;错动带下部的岩体受松弛、自身重力作用、爆破及其它结构面切割等因素影响,易发生坍塌或构成局部的不稳定块体,对隧洞顶拱局部稳定性影响较大;若喷锚支护不及时,柱状节理逐步松弛坍塌,最大塌落深度可达3~5 m;类似地,小断层和陡倾裂隙切割边墙松弛区,也可能导致局部柱状节理玄武岩产生松弛坍塌。



图 5 柱状节理玄武岩坍塌破坏
Fig. 5 Collapse failure of columnar jointed basalt

2 监测方法及结果

2.1 监测方法

单孔声波可以通过波速的变化判断岩体松弛深度,根据波速与变形模量的关系曲线判定松弛层的岩体力学参数。钻孔电视可以直观地判读岩体松弛的深度及岩体结构。白鹤滩水电站柱状节理玄武岩松弛的监测方法主要以声波长期观测孔所测试的钻孔声波为主、钻孔全景成像为辅。

2.2 监测结果

(1) 松弛层划分标准

单孔声波和钻孔全景成像结果均能反映岩体松弛的厚度,单孔声波较为便捷,且能够建立岩体变形模量与声波的关系,因此白鹤滩的岩体松弛测试及标准以声波测试成果为准。根据测试成果,柱状节理玄武岩松弛层划分标准如表1所示。

表 1 柱状节理玄武岩松弛层划分标准表

Table 1 Standard division table of relaxation layers of columnar jointed basalt

岩体类别	岩性	波速/(m·s ⁻¹)	
		未松弛岩体	松弛岩体
II	第二类柱状节理玄武岩	≥5100	5100~4500
III ₁	第一类、第二类柱状节理玄武岩	4700~5100	4000~3500
III ₂	第一类、第二类柱状节理玄武岩	4000~4700	

(2) 监测布置方案

为查明柱状节理玄武岩的松弛特征,对坝基左岸

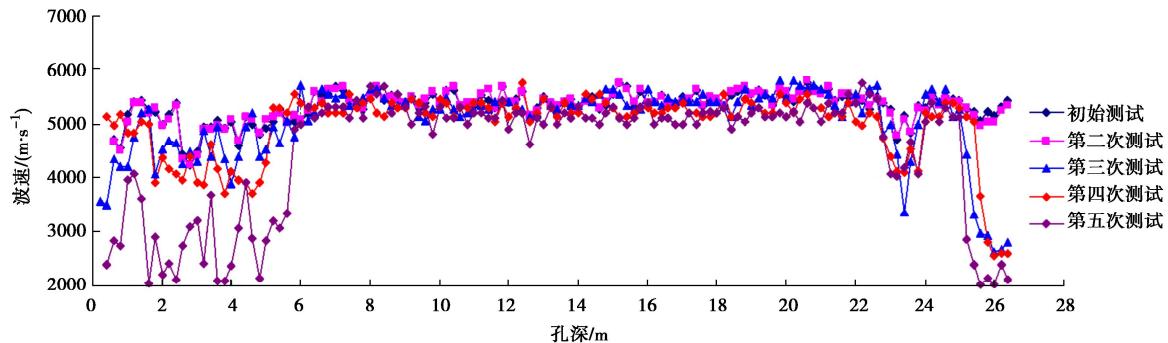


图 6 试验洞柱状节理玄武岩声波测试典型结果

Fig. 6 Typical acoustic wave test results of columnar jointed basalt in test tunnel

表 2 各监测部位松弛深度统计表

Table 2 Statistical values of relaxation depth at monitoring positions

检测位置	勘探平洞		模拟试验洞		灌浆试验区		导流洞		左岸坝基		河床坝基	
	编号	—	—	未锚固区	锚固区	—	#3	#4	开挖试验区	保护层开挖面	建基面	建基面
尺寸/m	2×2	3×3	6.5×13	15	17.5×22	95	95	95	(660~650)	(650~628)	95	95
部位	洞壁	全洞	底板	底板	底板	洞壁	洞壁	斜坡	斜坡	斜坡	斜坡	斜坡—平面
松弛深度/m			1.0~2.1	0.7~1.5	1.3~3.1	2.5~3.0	5.2~7.7	0.1~4.3	1.1~3.2	0.4~4.0	0.2~2.8	
平均松弛深度/m	0.32	0.60	1.40	1.09	2.11	—	—	2.31	1.98	1.20	1.30	
与柱状节理交角	平行		横切	横切	横切	平行	平行	斜切	斜切	斜切	斜切	斜切—横切

PD36、PD61、PD133 和右岸 PD37 勘探平洞密集揭露的柱状节理玄武岩进行全洞段声波测试, 且专门在 PD36、PD37 勘探平洞微新无卸荷岩体中, 采取扩大断面尺寸、光面爆破开挖观测洞段松弛特征, 各断面钻孔 7 个, 各孔孔深 12~14 m。

为探究大面积开挖后柱状节理玄武岩的松弛特征, 在右岸高程 525 m 处的微新无卸荷岩体内开挖 13 m×6.5 m (高×宽)、长 50 m 的试验洞, 模拟地下洞室开挖与锚固条件下岩体松弛特性。

为研究固结灌浆效果对柱状节理玄武岩的松弛特征的影响规律, 在左岸柱状节理玄武岩微新无卸荷岩体洞段, 开挖 7 m×12 m (高×宽)、长 16 m 的场地, 进行 8 m×8 m 的固结灌浆试验。

为分析柱状节理玄武岩松弛的时间效应和尺寸效应, 对坝基和导流洞岩体松弛进行测试。

各监测位置的空间相对关系如图 1 所示。

(3) 监测结果

a) 典型部位监测结果: 柱状节理玄武岩典型声波监测曲线和钻孔全景成像测试结果分别如图 6 和图 7 所示, 5 次声波测试结果表明试验洞孔口段 (0~6 m) 柱状节理玄武岩波速逐渐降低, 根据表 1 所示的松弛层划分标准, 可以判断此位置松弛深度为 6 m; 钻孔全景成像测试结果表明断面不同部位柱状节理玄武岩

松弛程度存在差异, 边墙部位大于顶拱部位, 另外, 由于测试精度限制, 多次钻孔全景成像测试成果的对比并没有明显差别。

b) 各个部位监测结果: 采用钻孔声波测试为主、钻孔电视全景成像测试为辅的监测方法, 表 2 汇总了勘探平洞、模拟试验洞、灌浆试验区、导流洞、左岸坝基及河床坝基部位的围岩松弛深度。

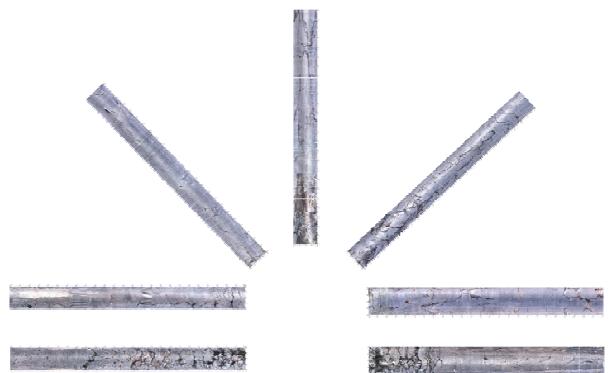


图 7 试验洞柱状节理玄武岩钻孔全景成像测试典型结果

Fig. 7 Typical panoramic imaging test results of columnar jointed basalt in test tunnel

3 松弛特征

白鹤滩水电站玄武岩岩体松弛主要包括开挖过程

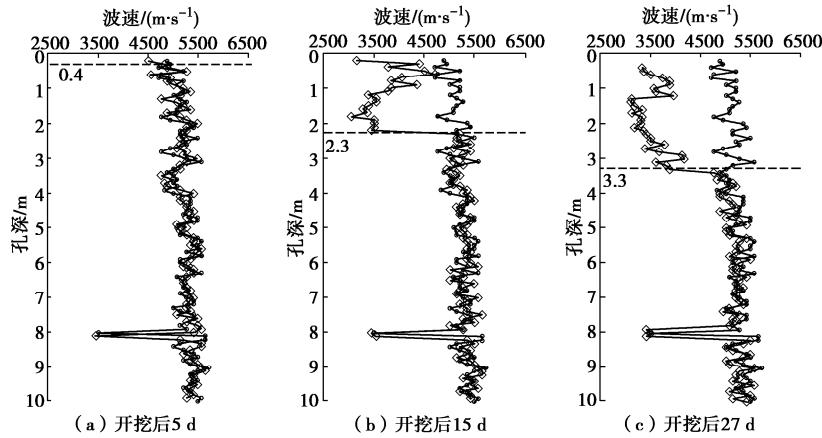


图 8 柱状节理玄武岩松弛发展的声波测试结果

Fig. 8 Acoustic wave test results of relaxation evolution process of columnar jointed basalt

的爆破松弛和开挖后由于卸荷回弹产生的应力松弛，爆破松弛是短期效应，应力松弛则是长期过程，玄武岩岩体的最终松弛正是这两方面效应叠加的结果。白鹤滩水电站地应力水平高，完整玄武岩启裂强度低，脆性显著，致使完整玄武岩岩体松弛主要表现为应力损伤和脆性破裂。相比于完整玄武岩岩体松弛现象，柱状节理玄武岩体除发生完整柱体损伤破裂松弛外，还易产生柱间节理和柱内节理的开裂松弛，为此，柱状节理玄武岩体的松弛深度和松弛效应更为显著。

3.1 时间效应

白鹤滩水电站柱状节理岩体松弛是渐进发展的，从开挖到失稳是一个复杂的演变过程，表现出较为明显的时间效应。如图 8 所示，洞室开挖后，洞周表层围岩迅速卸荷松弛，在围岩深层位置，随着围压的逐渐恢复，其卸荷松弛程度不断降低，为此开挖后 1 周内的声波测试结果显示只有浅表层围岩发生松弛；但松弛的浅层围岩作为新“伪自由面”，促使集中应力不断往围岩内部转移，进而卸荷松弛向深部扩展，为此开挖 2 周和 1 个月后的声波测试结果均显示卸荷松弛深度不断增加。

柱状节理玄武岩松弛深度与时间呈近似对数关系，在开挖完成大致 35 d 后松弛趋于稳定，松弛时间效应可分为 3 个阶段，如图 9 所示。阶段 I：一般持续 14 d，岩体沿着柱体内的隐节理发生破坏，柱面尚未开始松弛，该阶段一般导致 2 m 左右的松弛圈深度，在此阶段实施支护的效果最好；阶段 II：柱面开始松弛，柱面松弛的滞后效应宏观表现为松弛圈深度随时间逐渐增加，该阶段可导致 4~12 m 的松弛深度，此阶段实施锚固的效果远不如第 I 阶段，需要的支护压力更大，松弛控制效果较差；阶段 III：松弛趋于稳定，围岩整体变形趋于收敛，此阶段实施的支护已无限制松弛的效果，岩体已累积足够的松弛而发生宏观破裂、

松弛坍塌等。因此，支护时机的选择十分关键，其决定了柱状节理岩体卸荷松弛的深度。

柱状节理玄武岩松弛深度与应力水平密切相关，如图 10 所示，坝基部位初始最大应力在 8~11 MPa，卸荷水平相对较小，松弛深度一般在 2~3 m；而地下洞室初始地应力普遍较高，如导流洞的卸荷水平可达 20 MPa，松弛深度最大可达 7~8 m。然而，不同应力水平下柱状节理玄武岩松弛的时间效应曲线依然呈对数关系（如图 9 所示）。

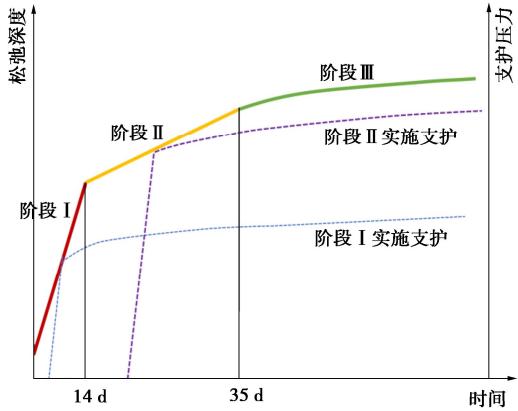


图 9 柱状节理玄武岩松弛概化模型

Fig. 9 Conceptual model for relaxation of columnar jointed basalt

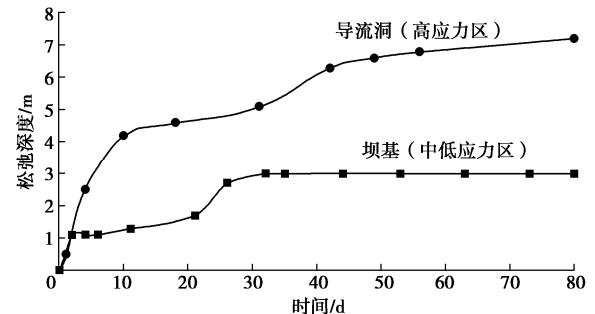


图 10 不同应力水平下柱状节理玄武岩松弛曲线

Fig. 10 Relaxation curves of columnar jointed basalt under different stress levels

3.2 空间效应

白鹤滩水电站不同规模洞室的开挖揭示, 柱状节理发育的洞室开挖过程中, 其卸荷松弛程度与洞室跨度、断面面积、分层开挖高度存在正相关的变化关系, 表现出较为明显的空间效应特征, 如表2所示。整体而言, 随着洞室尺寸的增加, 柱状节理玄武岩松弛深度不断增加, 如图11所示。另外, 模拟试验洞不同部位松弛监测结果表明, 相比于顶拱和底板, 边墙松弛的增加尤为显著, 如图12所示。

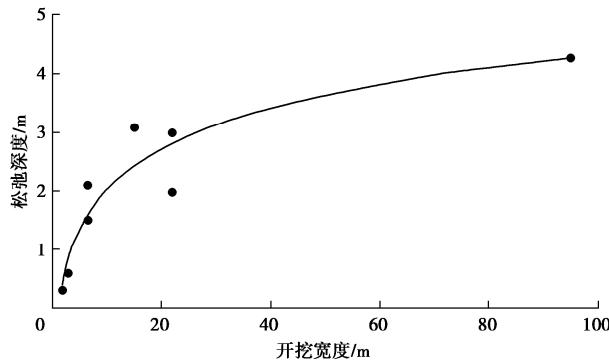


图11 柱状节理玄武岩松弛与开挖宽度的关系

Fig. 11 Relationship between excavation width and relaxation of columnar jointed basalt

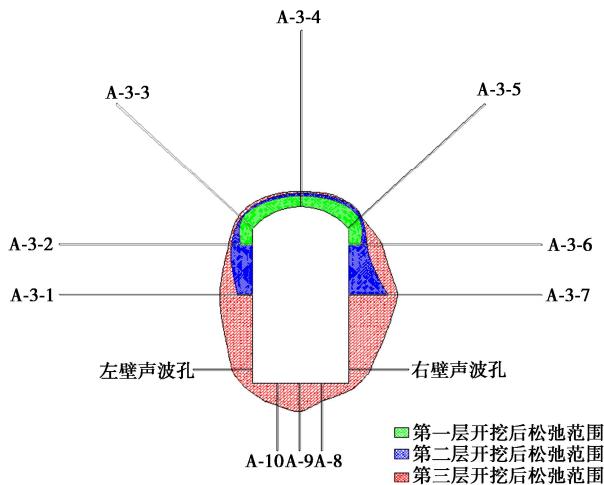


图12 柱状节理玄武岩松弛的空间效应

Fig. 12 Space effects of relaxation of columnar jointed basalt

通过对比勘探平洞($2\text{ m} \times 2\text{ m}$)、模拟试验洞($6.5\text{ m} \times 13\text{ m}$)、灌浆试验区($12\text{ m} \times 15\text{ m}$)、左岸坝基开挖试验区(高程 $660\sim 650\text{ m}$, 高差 10 m , 长 95 m , 面积 1476 m^2)、左岸坝基保护层(高程 $650\sim 628\text{ m}$, 高差 22 m , 长 95 m , 面积 3250 m^2)等部位的围岩松弛深度, 发现大尺寸开挖(大于 20 m 后)时, 松弛岩体厚度增幅有限。

4 松弛机理

柱状节理玄武岩的变形破裂模式固然受岩体自身

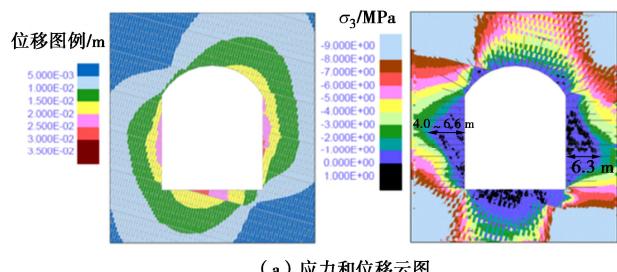
柱状镶嵌结构所制约, 同时也与破坏时的应力状态密切相关, 在应力水平较低且达到节理面的抗拉或抗剪强度, 易产生岩体的卸荷松弛; 而在应力水平较高且达到隐微裂隙甚至岩块的强度时, 易产生岩体的破裂松弛。此外, 当与大型结构面如层内带、断层和长大裂隙等组合时, 一般会加剧松弛, 局部形成坍塌破坏。

4.1 柱状节理卸荷松弛

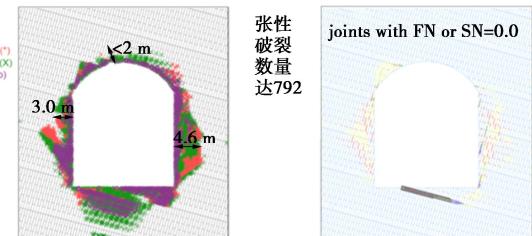
工程开挖卸荷致使围岩产生二次应力, 洞室轮廓线附近径向应力减小为零而切向应力突增, 对于不考虑柱状节理的脆性块状岩体, 以水平向构造应力占主导的应力条件下, 洞室顶拱应力集中区容易引起高应力片帮破坏, 其实质是岩体内部由于应力偏张量过大, 发生轴向劈裂; 而边墙为应力松弛区。对于同为脆性硬岩的柱状节理玄武岩, 柱间节理和柱内隐节理等原生节理发育, 在强集中应力条件下, 围岩更容易发生节理面开裂、滑移及柱体轴向劈裂等, 出现明显的卸荷松弛。

由于白鹤滩水电站洞室柱状节理岩体的柱体为陡倾角分布, 因此, 洞室顶拱集中应力垂直于柱间节理面加载, 柱体间受挤压作用, 而边墙集中应力平行于柱间节理面加载, 在卸荷低围压条件下柱间节理面和柱体易发生张拉开裂, 为此, 洞室边墙卸荷松弛现象更为突出。

如图13所示, 白鹤滩水电站柱状节理玄武岩洞室的顶拱卸荷松弛深度小于 2 m , 边墙卸荷松弛深度已超过 3 m , 且两侧边墙卸荷松弛呈现非对称特征, 顺倾一侧边墙的卸荷松弛深度达到 4.6 m , 卸荷松弛区的最小主应力量值非常小, 且其主要是柱状节理张拉破裂所致。



(a) 应力和位移云图



(b) 塑性区及破裂云图

图13 柱状节理玄武岩洞室开挖响应特征

Fig. 13 Responses of columnar jointed basalt cavern to excavation process

4.2 柱状节理与隐微裂隙破裂松弛

柱状节理玄武岩由脆性岩块和节理面(含微裂隙)组成,因此,兼具玄武岩的脆性特征,并且叠加了密集结构面的影响,从而使得柱状节理玄武岩在高应力条件下既有脆性岩体破裂共性特征,又存在自身节理或裂隙破裂等方面的特殊性。

相比于完整玄武岩,柱状节理玄武岩中初始裂纹(隐微裂隙)更为发育,导致其启裂强度和残余强度更低,表现为含微裂隙的柱体受力达到峰值强度后可能快速发生解体破坏。换言之,柱状节理玄武岩兼有玄武岩岩块和节理、微裂隙控制的脆性特征,因此,容易在中高程度的应力集中条件下产生破裂松弛,甚至浅表层的解体破坏,而且破坏岩石非片状而是碎块状。

总体上,柱状节理玄武岩应力型破裂松弛机制主要与应力水平和垂直于柱面的横向微裂隙两个方面的因素有关,整体而言,柱体内部的微裂隙在破裂松弛中起控制作用,而高应力集中在破裂松弛中起外部诱因作用,当切向集中应力超过柱体的启裂强度时,顶拱柱体才会发生脆性破坏,如图 14 所示。

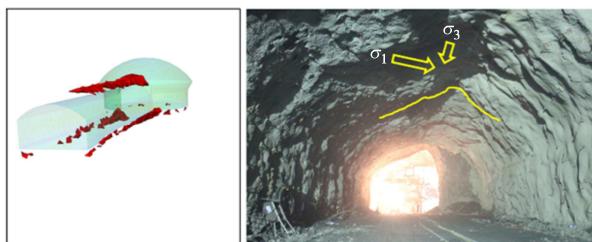


图 14 柱状节理玄武岩洞室应力分布

Fig. 14 Distribution of stress of surrounding rock in cavern wall of columnar jointed basalt

4.3 柱状节理与结构面组合的坍塌松弛

图 15 为柱状节理岩体同时受错动带、小断层、长大裂隙等不连续面切割时的破坏特征,局部区域充分发育的不连续构造完全破坏了柱状节理岩体的结构完整性,此时岩体力学特性更接近破碎岩体,尤其是大型错动带下盘的柱状节理岩体自稳能力较差,易在开挖卸荷和自身重力共同作用下发生局部范围的坍塌,现场揭示坍塌现象如图 5 所示,与数值计算规律基本吻合,因此,受大型不连续结构面切割的柱状节理岩体洞段需针对性加固。

就柱状节理岩体卸荷松弛发展演化过程而言,有层内错动带、断层、长大裂隙等不利地质构造组合影响时,柱状节理岩体的卸荷松弛更快,从微、细观特征转变到宏观特征的时间也会更短,围岩自稳时间缩短,相应的松弛深度和程度也更大,因此更应保证支护的及时性和有效性。

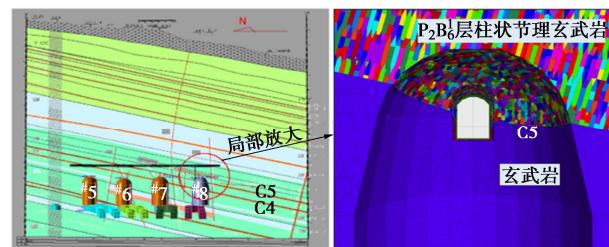


图 15 不连续结构面切割柱状节理岩体的破坏结果

Fig. 15 Failure results of columnar jointed rock mass influenced by discontinuous structural plane

5 工程控制技术

5.1 坝基柱状节理玄武岩松弛控制

为了有效控制坝基柱状节理玄武岩的松弛深度,提出以下解决方案:①河床坝段尽量利用完整性较好的角砾熔岩作为建基面,减少柱状节理玄武岩在坝基的分布范围;②针对坝基第一类柱状节理玄武岩出露部位设置扩大基础,此措施可降低约 30% 的坝基压应力,改善坝趾处岩体的三向应力状态,提高柱状节理玄武岩坝基的浅层承载和稳定条件;③基于柱状节理玄武岩开挖松弛时空效应及松弛机理的认识,提出了“厚层保护、灌浆固结、深层锚固、精准控制爆破”的开挖支护优化技术体系,如图 16 所示,其中,预留 5 m 保护层新增建基面松弛深度均值为 0.84 m,灌浆固结区开挖后建基面岩体松弛深度为 0.85~1.05 m,锚索加固区建基面岩体松弛深度均值为 0.99 m,精细化爆破控制技术使得建基面岩体损伤深度为 0.51~0.53 m,有效控制了坝基柱状节理玄武岩的松弛变形。通过上述 3 个关键步骤的实施,坝基声波检测松弛厚度控制在 1.2~1.4 m,松弛控制效果与块状玄武岩开挖松弛厚度相当(1.3~1.5 m)。

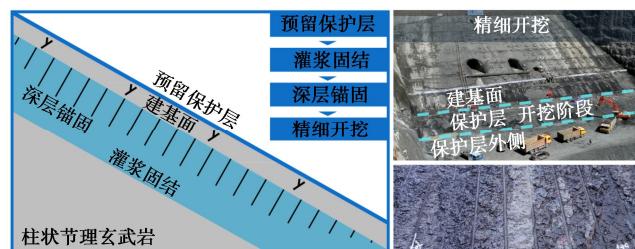


图 16 坝基柱状节理岩体松弛控制技术

Fig. 16 Relaxation control technologies of columnar jointed rock mass in dam foundation

5.2 地下洞室柱状节理玄武岩松弛控制

在白鹤滩水电站地下工程实践中,尤其针对埋深较大的导流洞和尾水洞等柱状节理玄武岩段,依据柱状节理围岩松弛特征,提出:①强调减小因开挖卸荷而产生局部应力集中的程度,“多分层、短进尺、多

分幅、弱爆破、预裂控制、预留保护层”的开挖优化方案, 尽量减小围岩强扰动和强卸荷的影响, 其中, 分幅开挖过程中顶拱局部应力集中可以减小约 5 MPa, 应力集中范围也明显减小; ②强调支护的系统性和及时性, 根据柱状节理岩体松弛时间效应特征, 在 7 d 内完成系统喷护和预应力锚杆支护, 采用“初喷钢纤维混凝土、系统预应力锚杆、系统钢筋网、预应力锚索、复喷混凝土、局部补强”的支护优化方案, 及时封闭临空面, 形成支护围压, 限制松弛快速扩展。通过对开挖支护方案的优化, 如图 17 所示, 使得地下洞室柱状节理玄武岩围岩松弛深度从 7 m 降至 4 m。另外, 从位移监测过程线变化趋势来看, 如图 18 所示, 开挖初期多点变位计产生显著的响应, 开挖完成后, 测点位移基本保持缓慢增长趋势, 表明柱状节理玄武岩内部应力缓慢调整, 围岩变形良好可控, 至开挖支护完成后约 2 a 时, 0, 2, 9 m 测点时效位移增量分别为 8, 7, 5 mm, 表明柱状节理玄武岩围岩处于稳定控制状态。

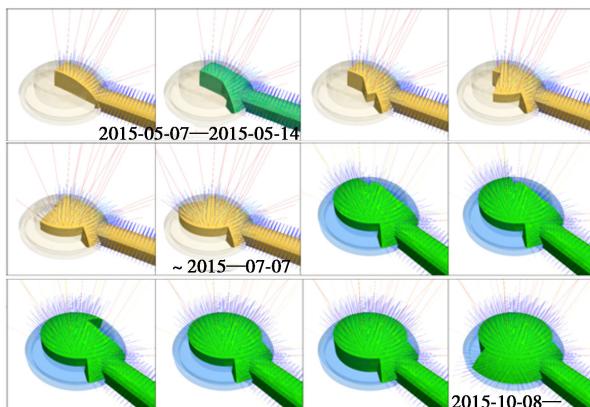


图 17 尾水调压室柱状节理岩体开挖与支护过程

Fig. 17 Excavation and support process of columnar jointed rock mass in downstream surge chamber

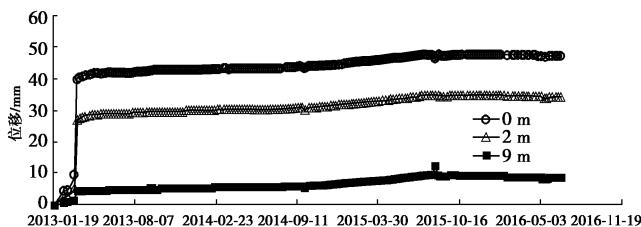


图 18 导流洞典型柱状节理岩体位移时序过程线

Fig. 18 Variation curves of displacement of columnar jointed rock mass in diversion tunnel

6 结语

柱状节理玄武岩在白鹤滩水电站高拱坝坝址区、地下洞室导流洞和尾水调压室均有出露, 其未受扰动时柱体镶嵌紧密, 岩体承载力较高, 但易受开挖扰动

而产生松弛, 完整性降低, 主要表现为 3 种松弛类型: 柱状节理玄武岩的卸荷松弛、高应力集中区浅层岩体破裂松弛、结构面组合条件下的局部岩体坍塌松弛。为此, 采用以钻孔声波为主、以钻孔全景成像为辅的手段, 对白鹤滩水电站勘探平洞、模拟试验洞、固结灌浆试验区、坝基和导流洞的柱状节理岩体进行松弛监测, 基于声波波速测试结果, 建立柱状节理玄武岩松弛层划分标准。

白鹤滩水电站柱状节理玄武岩松弛具有显著的时间效应和空间效应。在及时有效的系统支护条件下, 柱状节理玄武岩松弛深度与时间在松弛前期基本呈近似对数关系发展, 后期逐渐平稳收敛, 大致在开挖 35 d 后, 松弛趋于稳定; 若支护明显滞后, 较长一段时间内松弛深度仍然会持续发展, 直至发生宏观破裂、松弛坍塌等。柱状节理玄武岩松弛程度受洞室尺寸影响显著, 随着洞室开挖宽度的增加, 边墙松弛深度会明显增大, 出现突变, 且断面尺寸对柱状节理玄武岩松弛的增幅效应有限。

柱状节理玄武岩松弛机制同时受岩体自身结构和破坏时的应力状态所控制。在低应力条件下, 开挖致使洞周径向应力降低, 浅层围压的丧失使得岩体节理面发生张拉或滑移破坏, 且边墙松弛程度更加突出; 在高应力条件下, 柱状节理玄武岩既表现出脆性岩体破裂的共性特征, 又存在自身节理或裂隙破裂等方面的特殊性, 柱体内部的隐微裂隙在破裂松弛中起控制作用, 而高应力集中在破裂松弛中起外部诱因作用; 当柱状节理岩体内部发育的不连续构造被这些不连续结构面切割时, 自身原有的致密镶嵌结构和整体性被破坏, 柱体间相互镶嵌咬合的作用被削弱, 结构面下盘岩体自稳能力变差, 进而发生松弛坍塌。

针对白鹤滩水电站不同部位柱状节理玄武岩松弛变形与破坏, 在坝基和地下洞室分别提出针对性的松弛控制优化技术, 取得了良好的控制效果, 为特高拱坝建基面和高应力特大洞室成洞难题的解决提供了技术保障和理论依据。

参考文献:

- [1] 王仁坤. 我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 13-19. (WANG Renkun. Review of construction achievements and technological development of super-high arch dam in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 13-19. (in Chinese))
- [2] 樊启祥, 林 鹏, 蒋 树, 等. 金沙江下游大型水电站岩石力学与工程综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020,

- [60(7): 537-556. (FAN Qixiang, LIN Peng, JIANG Shu, et al. Review on the rock mechanics and engineering practice for large hydropower stations along the downstream section of the Jinsha River[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(7): 537-556. (in Chinese))]
- [3] 樊启祥, 周绍武, 李炳锋. 溪洛渡特高拱坝建设的岩石工程关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1998-2015. (FAN Qixiang, ZHOU Shaowu, LI Bingfeng. Key technologies of rock engineering for construction of xiluodu superhigh arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1998-2015. (in Chinese))]
- [4] 张石虎, 傅少君, 陈胜宏. 坝基岩体开挖松弛效应分析与锚固效果评估研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 514-522. (ZHANG Shihu, FU Shaojun, CHEN Shenghong. Research analysis of excavation-induced relaxation of rock foundation and evaluation of anchor effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 514-522. (in Chinese))]
- [5] 胡著秀, 张建海, 周钟, 等. 锦屏一级高拱坝坝基加固效果分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2861-2868. (HU Zhuxiu, ZHANG Jianhai, ZHOU Zhong, et al. Analysis of stress and deformation of Jinping I High Arch Dam after foundation reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2861-2868. (in Chinese))]
- [6] 杨剑, 王进廷, 王吉焕, 等. 二滩拱坝及坝基材料参数反馈分析[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 78-83. (YANG Jian, WANG Jinting, WANG Jihuan, et al. Feedback analysis of material parameters of Ertan arch dam and its foundation rock[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2): 78-83. (in Chinese))]
- [7] 黄岩松, 周维垣, 杨若琼, 等. 拉西瓦拱坝稳定性分析和评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 901-905. (HUANG Yansong, ZHOU Weiyuan, YANG Ruqiong, et al. Stability analysis and evaluation of laxiwa arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 901-905. (in Chinese))]
- [8] 石安池, 唐鸣发, 周其健. 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 Anchi, TANG Mingfa, ZHOU Qijian. 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))]
- [9] 倪绍虎, 何世海, 陈益民, 等. 柱状节理玄武岩的破坏模式、破坏机制及工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3064-3075. (NI Shaohu, HE Shihai, CHEN Yimin, et al. The failure modes, failure mechanisms and countermeasures of columnar jointed basalt rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3064-3075. (in Chinese))]
- [10] 裴书锋, 冯夏庭, 张建聪, 等. 高边坡坝基柱状节理玄武岩开挖卸荷时效松弛特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3743-3754. (PEI Shufeng, FENG Xiating, ZHANG Jiancong, et al. Time-dependent relaxation characteristics of columnar jointed basalts in high-slope dam foundation during excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3743-3754. (in Chinese))]
- [11] 张建聪, 江权, 郝宪杰, 等. 高应力下柱状节理玄武岩应力-结构型塌方机制分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2556-2568, 2577. (ZHANG Jiancong, JIANG Quan, HAO Xianjie, et al. Analysis of stress-structural collapse mechanism of columnar jointed basalt under high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2556-2568, 2577. (in Chinese))]
- [12] 张春生, 侯靖, 徐建荣, 等. 白鹤滩水电站巨型地下洞室群围岩稳定分析与设计方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. (ZHANG Chunsheng, HOU Jing, XU Jianrong, et al. Stability Analysis and Design Method of Surrounding Rock for Huge Undergound Caverns of Baihetan Hydropower Station[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2019. (in Chinese))]
- [13] 张春生, 侯靖, 褚卫江, 等. 岩体力学特性尺寸效应与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2020. (ZHANG Chunsheng, HOU Jing, CHU Weijiang, et al. Size Effect of Mechanical Properties of Rock Mass and Engineering Practice[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese))]
- [14] 单治钢, 倪卫达, 洪望兵, 等. 白鹤滩水电站枢纽区重大工程地质问题及对策研究[C]// 2021 年全国工程地质学术年会论文集, 青岛, 2021: 302-309. (SHAN Zhigang, NI Weida, HONG Wangbing, et al. Major engineering geological problems and countermeasures of Baihetan hydropower station[C]// National Engineering Geology Conference 2021, Qingdao, 2021: 302-309. (in Chinese))]
- [15] 徐建荣, 赖道平, 吴关叶, 等. 适应柱状节理玄武岩坝基的特高拱坝结构研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 155-164. (XU Jianrong, LAI Daoping, WU Guanye, et al. Study on the super high arch dam structure adapting to the

- columnar basalt base[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, **40**(3): 155-164. (in Chinese))
- [16] 孟国涛, 樊义林, 江亚丽, 等. 白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(12): 2549-2560. (MENG Guotao, FAN Yilin, JIANG Yali, et al. Key rock mechanical problems and measures for huge caverns of Baihetan hydropower plant[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(12): 2549-2560. (in Chinese))
- [17] 唐君, 邓雨露, 陈翔. 白鹤滩水电站左岸尾水调压室穹顶开挖技术创新应用[J]. 水利水电技术, 2017, **48**(增刊2): 1-6. (TANG Jun, DENG Yulu, CHEN Xiang. Application of innovation on technology for vault excavation of left-bank tailrace surge chamber of Baihetan Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, **48**(S2): 1-6. (in Chinese))
- [18] JIANG Q, FENG X T, HATZOR Y H, et al. Mechanical anisotropy of columnar jointed basalts: an example from the Baihetan hydropower station, China[J]. Engineering Geology, 2014, **175**: 35-45.
- [19] 肖维民, 邓荣贵, 付小敏, 等. 单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 957-963. (XIAO Weimin, DENG Ronggui, FU Xiaomin, et al. Model experiments on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 957-963. (in Chinese))
- [20] 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 Zhiming, WANG Huanling, XU Weiya, et al. Model tests on permeability of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1407-1416. (in Chinese))
- [21] 王鹏, 洪望兵, 宋刚. 柱状节理玄武岩松弛圈尺寸效应及地应力影响[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(1): 139-146. (WANG Peng, HONG Wangbing, SONG Gang. Influences of size effect and in situ stress of columnar jointed basalt relaxation zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(1): 139-146. (in Chinese))
- [22] FAN Q X, WANG Z L, XU J R, et al. Study on deformation and control measures of columnar jointed basalt for Baihetan super-high arch dam foundation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, **51**: 2569-2595.
- [23] 张春生, 徐建荣, 吉华, 等. 白鹤滩水电站柱状节理玄武岩力学特性及松弛控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(7): 1297-1309. (ZHANG Chunsheng, XU Jianrong, JI Hua, et al. Mechanical characteristics and relax control of columnar jointed basalt at Baihetan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(7): 1297-1309. (in Chinese))
- [24] 江权, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 基于围岩片帮形迹的宏观地应力估计方法探讨[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1452-1459. (JIANG Quan, FENG Xiating, XU Dingping, et al. Evaluation method of general geostress based on spalling features of wall rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1452-1459. (in Chinese))