

柱状节理玄武岩各向异性特性的调查与试验研究

江 权¹, 冯夏庭¹, 樊义林², 朱祥东², 胡连兴², 李邵军¹, 郝宪杰¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国长江三峡工程开发总公司, 北京 100038)

摘要: 针对几何形状特殊且为镶嵌结构的柱状节理岩体, 为认识其各向异性力学特点和开挖卸荷下的破坏模式, 首先在柱状节理玄武岩截面几何特征的现场调查统计和 3 类结构面的扫描电镜(SEM)分析基础上阐述柱状节理岩体在结构上的横观各向同性特点, 然后通过垂直其柱体轴线方向和平行其柱体轴线方向的柱状节理岩体原位声波测试揭示柱状节理玄武岩的变形各向异性, 进而通过不同取样方向岩芯的单轴压缩试验和现场岩块的点荷载试验阐明其强度各向异性特点, 最后结合上述所获得的柱状节理玄武岩各向异性认识分析其开挖卸荷下的“结构-应力”控制型破坏模式及其结构劣化的具体表现形式, 所得认识和结论对柱状节理岩体地层中地下洞室稳定性分析和支护设计具有参考意义。

关键词: 岩石力学; 柱状节理岩体; 结构各向异性; 变形各向异性; 强度各向异性; 破坏模式

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)12-2527-09

SURVEY AND LABORATORY STUDY OF ANISOTROPIC PROPERTIES FOR COLUMNAR JOINTED BASALTIC ROCK MASS

JIANG Quan¹, FENG Xiating¹, FAN Yilin², ZHU Xiangdong², HU Lianxing², LI Shaojun¹, HAO Xianjie¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Three Gorges Project Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Columnar jointed basalt is a specially compositional rock mass by many prismatic rock blocks with the irregular polygon on the transverse section. For documenting the anisotropic properties and unloading failure mechanism of jointed basalt rock, detailed in-situ and laboratory investigation have been carried out. First, the geometrical anisotropy property of columnar jointed basaltic rock was summarized by detailed in-situ statistic for irregular polygon of its transverse section and the scanning electron microscope(SEM) analysis of different kinds of joint faces. Then, the deformational anisotropy property was checked by the ultrasonic testing with the direction which was parallel to the axis of the columnar block and the direction which was vertical to the axis of the columnar block in field. And, the strength anisotropy property was also tested by two ways, i.e. point load test for in-situ rock block with different directions and uniaxial compression test for standard cylindrical specimens with different loading directions. According to above resultant investigation, the basic failure mode of structure-stress control for columnar rock mass and its specific failure performances have been discussed, so as to provide helpful recognition and suggestion for reasonable excavation and supporting design for the underground caverns and tunnels in similar rock mass with columnar joint sets.

Key words: rock mechanics; columnar jointed rock mass; structural anisotropy; deformational anisotropy; strength anisotropy; failure mode

收稿日期: 2013-05-28; **修回日期:** 2013-08-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036405); 国家自然科学基金资助项目(41172284); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放课题(2012ZDK02)

作者简介: 江 权(1978-), 男, 博士, 2001年毕业于中国地质大学隧道与地下工程专业, 现任副研究员, 主要从事节理岩体中大型地下工程数值模拟与稳定性反馈分析、岩体劣化力学特性等方面的研究工作。E-mail: qjiang@whrsm.ac.cn

1 引言

由于经历了漫长的成岩过程与多期构造历史, 赋存于一定地质和应力环境中的工程岩体内部都存在着大量原生节理、构造节理、卸荷裂隙等结构面^[1-4]。因此, 工程中开挖的对象基本都是由结构面(多组节理/裂隙面)和结构体(岩块)构成的具有一定结构特征的岩体。如果岩体中结构面的空间组合不均匀、密度分布不均质和发育规模存在差别时, 则岩体的结构、强度和变形等特性通常就具有各向异性特点^[4-6]。

柱状节理玄武岩是一类特殊的工程地质岩体, 其岩体一般受交线近似平行的多组节理面切割而形成具有棱柱状块体排列特征的岩体, 一些典型的柱状节理石林因此而成为著名的景点, 如云南腾冲, 香港万宜水库、华盛顿 Banks 湖等(见图 1^[7-8])。然而, 在柱状节理岩体地层中进行工程开挖时, 却面临特殊的工程稳定性问题: 由于自身极其发育的结构面网络, 未扰动柱状节理玄武岩的 RQD 值普遍较低, 完整性较差, 具有明显的非连续、易开裂与各向异性力学特征, 从而在工程开挖扰动和岩体应力卸荷作用下常出现节理面的时效张开、柱体彼此松脱、围岩渐进垮塌等不稳定问题。



(a) 香港万宜水库

(b) 华盛顿 Banks 湖

图 1 含典型柱状节理石林的景点^[7-8]Fig.1 Typical scenic spots columnar jointed rock mass^[7-8]

虽然柱状节理构造在我国西南一些水电站(铜街子、溪洛渡)曾有揭露, 但因其不良力学特性和工程问题未充分暴露而并未引起足够的关注和重视。目前, 徐卫亚等^[9-12]利用现场或室内实验研究方式初步阐述了柱状节理玄武岩的力学特性, 并采用数值模拟方法初步研究了其力学各向异性行为。然而, 受当时对象工程中现场柱状节理岩体并未完全揭露的局限, 其开挖卸荷下各向异性特性和卸荷破坏模式无法深入研究, 而近年一些大型水电大型工程修建过程中揭露的柱状节理玄武岩地层为进一步深入研究其力学特性提供了新的条件。

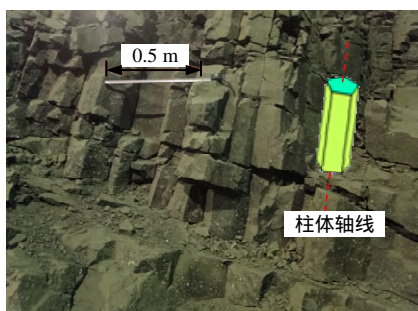
为认识柱状节理玄武岩的各向异性特点, 本文以某大型水电导流洞内柱状节理玄武岩为研究对象, 首先在现场调查统计和结构面的扫描电镜(SEM)分析基础上阐述了柱状节理玄武岩在几何结构上的横观各向同性特点, 然后通过其垂直柱体轴线方向和平行其柱体轴线方向的岩体声波波速测试揭示了柱状节理玄武岩的变形各向异性特点, 进而通过不同取样方向岩芯的单轴压缩试验和现场岩块的点荷载试验阐明了其强度的各向异性特点, 最后探讨了某导流洞柱状节理岩体段在开挖卸荷过程的基本破坏模式和具体表现形式。

2 背景简介

该巨型水电站位于金沙江流域四川与云南交界区, 区域属中山峡谷地貌, 地势北高南低, 向东侧倾斜。左岸为大凉山山脉东南坡, 山峰高程 2 600 m, 整体上呈向金沙江倾斜的斜坡地形; 右岸为药山山脉西坡, 山峰高程在 3 000 m 以上, 主要为陡坡与缓坡相间的地形^[13-14]。电站左右岸地下洞室群各包括地下厂房、主变室、尾闸室、调压室、导流洞、引水隧洞、尾水洞和先期开挖的 5 条导流洞等。该电站将是我国继三峡电站后又一个总装机容量超过 $1\ 000 \times 10^4$ kW 的特大型电站。

工程区主要出露岩层为二叠系上统峨眉山组玄武岩($P_2\beta$), 以岩浆喷溢和火山爆发交替为特征, 为单斜地层, 岩层产状 $N30^\circ \sim 50^\circ E, SE\ 15^\circ \sim 25^\circ$, 表层覆盖的第四系松散堆积物(Q4)主要分布于河床及缓坡台地上。根据喷溢间断和爆发次数, 工程区共可分为 11 个玄武岩岩流层($P_2\beta_1 \sim P_2\beta_{11}$)。其中, 因岩浆喷发过程中特殊的冷却收缩作用, 工程区的 $P_2\beta_3^2$ 和 $P_2\beta_3^3$ 岩流层的柱状节理特别发育。该层为微风化的灰黑色玄武岩, 密集发育的柱状节理将岩层切割成完整—断续的柱体。除一些受构造影响的区域, 柱状节理玄武岩的柱体轴线倾角基本均为 $60^\circ \sim 85^\circ$ 。

导流洞(典型断面尺寸 $19.7\text{ m} \times 24.2\text{ m}$)柱状节理玄武岩段开挖后调查发现, 柱状节理围岩的变形模式与破坏行为较为特殊: 开挖后首先是平行柱体轴线方向柱体间的结构面慢慢张开, 进而是柱体内原处于压密的隐性节理面逐步显性化, 从而导致垂直柱体轴线方向的节理面张开与松脱(见图 2(a)), 如不进行及时支护则将进一步导致其表层围岩中柱体的渐进松脱和局部垮塌(见图 2(b))。现场观察发现



(a) 岩体结构特征与节理面开裂



(b) 边墙柱体松动垮塌

图 2 导流洞开挖揭示的柱状节理岩体

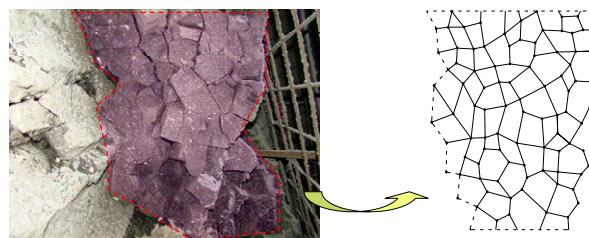
Fig.2 Exposed columnar jointed rock mass in diversion tunnels

柱状节理岩体在平行柱体轴线方向和垂直轴线平面上的变形和破坏模式存在明显的差异性，故深入认识柱状节理岩体的结构各向异性、变形各向异性和强度各向异性的特点，及开挖卸荷下的破坏模式对于后继地下洞室柱状节理围岩区的开挖与支护优化十分重要。

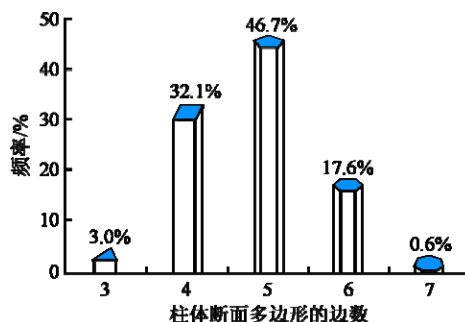
3 结构各向异性

3.1 柱状玄武岩块体和节理面特征分析

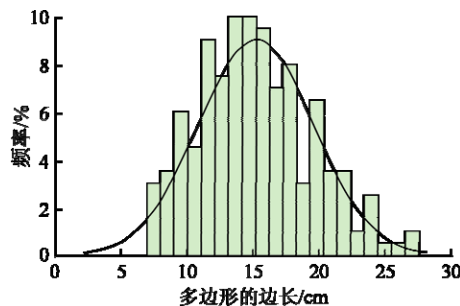
在导流洞中，洞室顶拱和边墙的柱状节理岩体在几何形态上都受多个相交构成的封闭筒状节理面切割而形成轴线彼此近似平行的不规则柱体，并受间距密度相对较大且近似垂直柱体轴线的缓倾角节理和裂隙切割而形成长度数十公分~数米的柱体单元。可能因火山喷发时玄武岩岩流在冷凝生成原生柱状节理面时特定的温度和热交换环境影响，柱状节理玄武岩的断面形态多为不规则多边形(见图 3(a))。对该工程右岸导流洞开挖面柱状节理面近 200 个柱状节理面统计表明，柱状节理断面为四边形约占 32.1%，为五边形约占 46.7%，为六边形约占 17.6%(见图 3(b))。进一步对柱体断面多边形边长的统计表明，多边形平均边长约 15.2 cm，边长集中在 12~24 cm 范围的总数超过 80%(见图 3(c))。



(a)



(b)



(c)

图 3 柱状节理岩体的断面特点统计

Fig.3 Statistics of irregular polygon for columnar jointed rock mass

进一步分析导流洞内揭露的柱状节理岩体新鲜岩面还可发现，除了较为发育的柱体之间的柱间节理面(令为类型 I)外，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(令为类型 II)和一组迹线与柱体轴线近垂直的缓倾角隐性节理面(令为类型 III)。陡倾角隐性节理面具有波浪起伏的特征，一般长约数十公分；而缓倾角隐性节理面大多都较为平整面，近似平行岩流层面，间距较小(如 1~3 cm)，长度 5~10 cm，节理面类型见图 4。这些隐性节理在导流洞开挖卸荷前为密闭状态，开挖后随时间逐步出现松弛和开裂，从而逐渐显现化而可被肉眼明显观察到。

一般认为，柱体内这种隐性节理也是源于岩浆岩冷凝过程中形成的原生节理面^[15-16]。在柱状节理岩体形成过程中，玄武岩岩浆在稳定的特定热交换环境下冷凝收缩而形成大量构成柱体的柱间节理面(I型)，从而使得整个岩流层内部与外部环境的热交

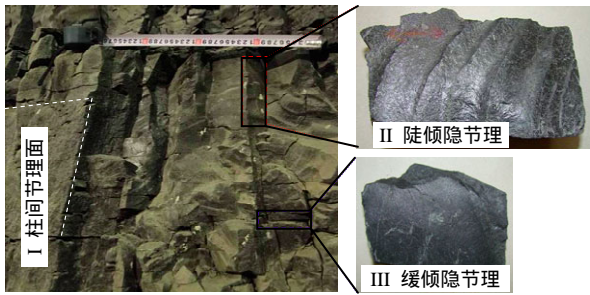


图 4 柱状节理岩体中 3 种类型节理面

Fig.4 Three types of joint faces of columnar jointed rock mass

换性能变差。在内外热交换不通畅的情况下，柱体之间的侧面节理空隙与柱体内部成为一种新的热交换途径，从而使得柱体单元在进一步的冷凝过程中生成内部的陡倾角隐节理(II 型)，即近似平行柱体轴线的隐节理是岩浆后期冷凝过程中产生的。缓倾角隐节理一般认为是在岩浆在冷凝过程中原生形成基础上经过后期构造作用的综合结果。在岩浆向冷凝中心逐步收缩冷凝时，不仅是侧面收缩形成柱间节理，还存在从顶部冷凝面(外表面)向下和底部冷凝面(底接触面)向上的同时收缩。这种发生在柱体内部的收缩作用力就导致了水平微裂隙的出现(III 型)。但由于柱体内部的收缩作用力相对较小，故缓倾角节理发育不完全，其伸不长且表现为隐性。经过后来长期反复的地壳构造改造和表生改造后，这种规模较小但密集的水平隐节理进一步扩展，从而在地下洞室开挖爆破与应力卸荷扰动下表现出显性化。

3.2 不同类型结构面的细观 SEM 特征

将上述柱间节理结构面、陡倾角隐节理和缓倾角隐节理的表面进行电镜扫描分析发现，3 种类型节理面的细观特征并不一样(见图 5)。首先，外部看上去较为粗糙的柱间节理面(I 型)的 SEM 图形显示，其表面为土地干涸状的蛇形花样，是材料收缩龟裂的典型花样，对应柱状节理岩体在成岩过程中岩浆岩在冷却收缩拉力作用下形成的龟裂花样。宏观上具有波浪纹特征的陡倾隐节理面(II 型)的细观 SEM 图形显示，表面细观裂纹不发育、完整性较好，而且表面有镶嵌拉断的小颗粒矿物结构，与前述认为这种破裂面实际也是一种原生张性面的认识相吻合一致。宏观表面较为平整的缓倾隐节理面(III 型)的 SEM 图片显示，其细观表面存在许多剪切过程中形成的平行细观拉裂纹，而且一些部位还可以依稀地看到显示剪切方向的擦痕，这种轻微的剪切擦痕可能与后期区域内动力地质运动过程中的水平压剪构

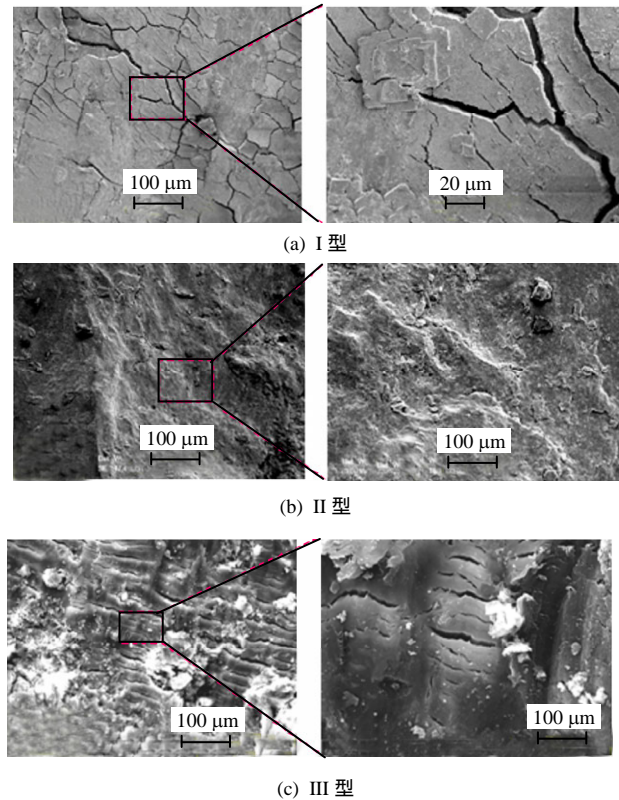


图 5 不同类型节理面的 SEM 花样特征

Fig.5 Specific surface patterns of different joint faces observed by scanning electron microscope(SEM)

造作用有关，或者是与隧洞开挖卸荷后结构面的微小剪切行为有关。

因此，该柱状节理岩体中的节理面组实际上是 3 类大小、间距和成因彼此不同的节理组。柱状节理岩体内特殊的节理组合切割使得其在几何结构上可以概化为大量轴线相互平行的不规则多边形柱状岩块的集合体，而且每个柱状岩块单元内部存在一组与柱体轴线近似平行的陡倾隐性节理和一组与柱体轴线近似垂直的缓倾隐节理，其基本几何结构可概化为图 6。故柱状节理岩体在结构上可以认为是具有横观各向同性的特点，其中横观各向同性面垂直柱体轴线方向。而且，柱状节理岩体中不同类型节理面的发育规模和尺度都不一样，对岩体的变形与破坏模式的控制作用也不一样，其中柱状节理面发育规模最大，其基本尺度为米级，从而控制了岩体的基本宏观力学特征；而陡倾隐节理发育密度相对较小，其基本尺度为分米级，它与柱状节理面一起主导了柱状节理岩体开挖后表现出的局部变形与破坏行为；缓倾隐节理在卸荷后逐步显现，其节理间距的基本尺度为厘米级，对柱状节理岩石试样的强度可能存在较大影响。可见，有别于通常的层状岩

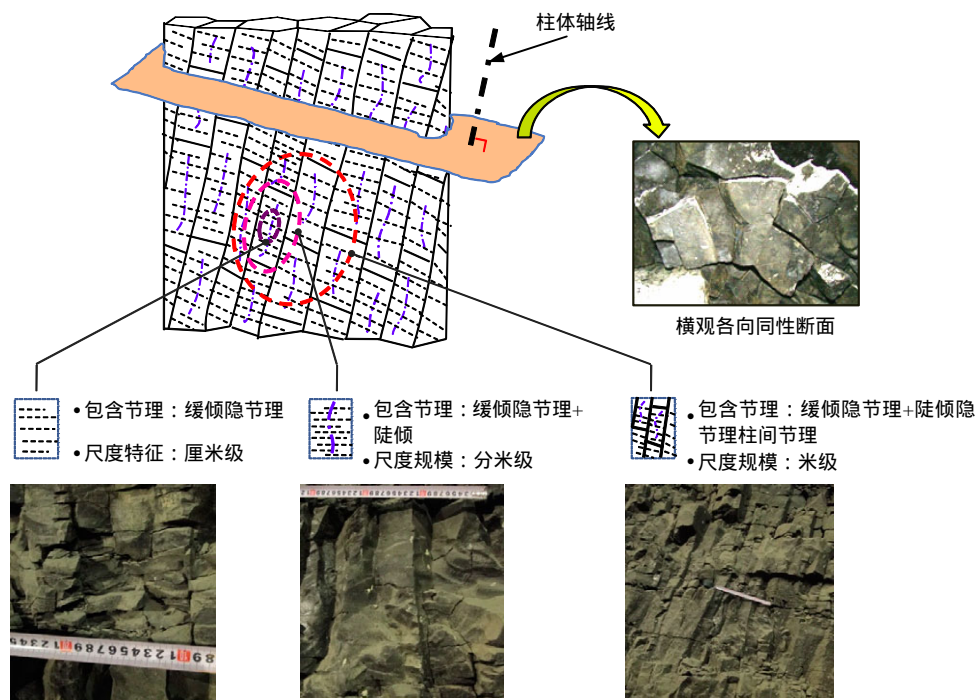


图 6 柱状节理岩体几何多尺度结构概化示意图

Fig.6 A generalized geometric structure diagram for columnar jointed rock mass

体的各向同性面平行其层面的特点，柱状岩体的各向异性的特殊性在于其各向同性面垂直于柱状节理面(也即柱体轴线)，而且其节理组具有多尺度的特点。

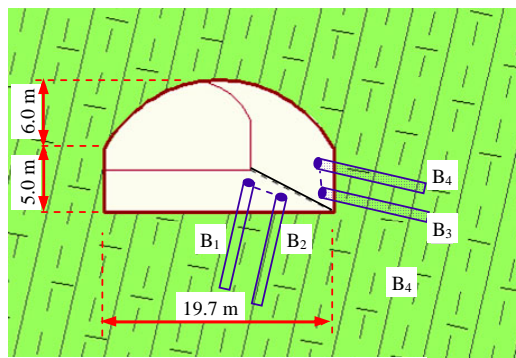
4 岩体变形各向异性

上述柱状节理岩体几何特征分析表明，柱状节理岩体定向柱状排列的结构特征决定了柱状节理岩体垂直柱体轴线向和平行柱体轴线向的变形特性可能存在较大差别，即垂直柱体轴线向的各向同性面与其各向异性面上的弹性模量存在明显差别。原位超声波测试可以无损地获得岩体中不同方向的超声波传播速度，具有如下测试岩体变形各向异性的便利：(1) 通过在岩体内开设钻孔，不需取样也不需要移动测试对象，可以最大限度保持岩体的原状环境；(2) 测试过程通过测量岩体声波沿某一方向传播的波速，不损害和扰动岩体的完整性，具有可重复性。因此，采用声波方法测试了柱状节理岩体垂直柱体轴线向和平行柱体轴线向 2 个方向上波速的特点，则可根据此估计柱状节理岩体变形模量在 2 个方向上的差异性。

4.1 测试方法

为了测试平行柱体轴线方向和垂直柱体轴线方向的波速，首先测量了 2[#]导流洞(K0+505)段柱状节理岩体柱体轴线的产状，其柱体轴线走向为

N42 °W，倾角为 77 °。然后在隧洞底板布置 2 个其轴线平行柱体轴线的钻孔 B1 和 B2，2 个孔口连线的走向为 N42 °W；进而在隧洞边墙布置 2 个其轴线垂直柱状节理岩体轴线的钻孔 B3 和 B4，其钻孔轴线产状为走向 N48 °E，倾角为 13 °，而且 2 个孔口连线平行柱体轴线，每个钻孔长度均为 10 m。最后当钻孔完成后，即采用单孔声波法测量 B1，B2，B3 和 B4 孔的岩体单孔波速；并采用跨孔声波法测量 B1 和 B2 孔之间纵波波速，以及 B3 和 B4 孔之间的纵波波速。上述测量方法对每个钻孔都进行了 3 次测量，从而获得了柱状节理岩体横观各向同性面上的岩体纵波波速 V_{B3} ， V_{B4} 和 V_{B1-B2} ，以及垂直横观各向同性面上的岩体纵波波速 V_{B1} ， V_{B2} 和 V_{B3-B4} (见图 7)。



B₁ 和 B₂ 孔：倾角 77 °，走向 N42 °W
B₃ 和 B₄ 孔：倾角 13 °，走向 N48 °E

图 7 用于岩体各向异性声波测试的钻孔布置示意图
Fig.7 Sketch of designed boreholes arrangement for rock mass anisotropic detection

4.2 声波测试结果

采用上述设计的柱状节理岩体各向异性的声波测试方法进行柱状节理岩体的波速测试时，对每个测量点都进行了3次测量，从而获得了6组表征柱状节理岩体不同方向的纵波波速特征曲线，典型波速特征曲线见图8。柱状节理岩体的纵波波速特征曲线表明，隧洞开挖后表层围岩将形成了一定深度的损伤区。显然，损伤岩体的波速不能代表未扰动的柱状节理岩体的初始波速。因此，在对比分析未扰动柱状节理岩体平行柱体轴线方向和垂直柱体轴线方向上的平均波速差异性时，取测试的波速曲线中代表未松弛区柱状节理岩体的波速稳定段，即测试孔的里端5 m岩体的平均波速作为未受开挖损伤的柱状节理岩体波速，其结果见表1(不考虑时效松弛)。统计结果表明，柱状节理岩中平行柱体轴线

方向的岩体波速要小于垂直柱体轴线方向的岩体波速，其比值为0.885。由于岩体的动弹性模量与岩体的波速具有如下关系：

$$E_d = \rho V_p^2 (1 - 2\nu)(1 + \nu) / (1 - \nu) \quad (1)$$

式中： E_d 为岩体动弹性模量， ρ 为柱状节理岩体的密度， V_p 为实测的岩体纵波波速。

取柱状节理岩体的密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，并考虑岩体泊松比相对较为稳定并取0.25，则根据实测波速计算获得柱状节理岩体在平行柱体轴线和垂直柱体轴线方向的动弹性模量分别为52.49和67.05 GPa，从而可知岩体动弹性模量的各向异性系数大约为0.78，各项异性系数的公式如下：

$$\delta_d = \frac{E_{d,\parallel}}{E_{d,\perp}} = \left(\frac{V_{d,\parallel}}{V_{d,\perp}} \right)^2 \quad (2)$$

式中： δ_d 为柱状节理岩体动弹性模的各向异性系数； $E_{d,\parallel}$ ， $V_{d,\parallel}$ 分别为平行柱体轴线方向的动弹性模量和纵波波速； $E_{d,\perp}$ ， $V_{d,\perp}$ 分别为垂直柱体轴线方向的动弹性模量和纵波波速。

虽然岩体的静弹性模量和动弹性模量在数值上存在一定差异，但两者的比例关系一般认为是一定的^[17-19]。据此，可以估计柱状节理岩体在平行柱体轴线和垂直柱体轴线方向的静弹性模量的各向异性系数也大约为0.78。

显然，导致该柱状节理岩体在各向同性面和各向异性面上的波速存在明显差异性的内在原因还是与其特殊的几何结构特征相关，即岩体中密集发育的缓倾角隐节理。由于该类型隐节理间距明显小于陡倾角隐节理间距，则柱状节理岩体中小间距的缓倾角隐节理必然会更明显地导致垂直缓倾角隐节理的纵波传播受阻，因而测量获得的平行柱体轴线方向的纵波波速自然要比垂直柱体轴线方向的纵波波速低。由式(1)的换算关系可知，平行柱体轴线方向的弹性模量自然要比垂直柱体轴线方向的弹性模量低。这一测试结果与R. E. Goodman^[20]建议的岩体弹性模量估算方法相吻合，该估算方法的计算公式如下：

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{SK} \quad (3)$$

式中： E 为岩体的宏观弹性模量， E_r 为完整岩石的弹性模量， S 为单位体积内节理密度， K 为节理的法向变形刚度。即岩体中某一产状的节理密度越发育，则垂直该方向上的宏观弹性模量就越低。

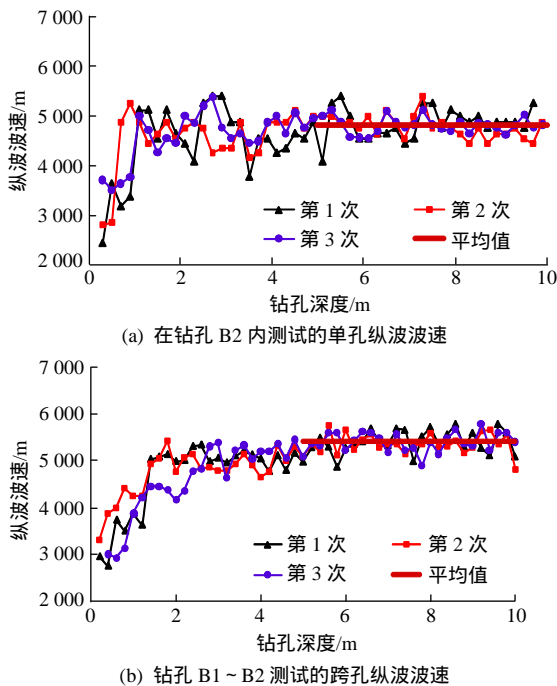


图8 不同方向钻孔内测试的柱状节理岩体典型波速特征曲线
Fig.8 Typical curves of wave velocity along different directions in columnar jointed rock mass

表1 钻孔内测试的不同方向岩体波速统计结果

Table 1 The statistic results of wave velocity along different directions of columnar rock mass in boreholes

纵波传播方向	测孔编号	纵波波速/(m·s ⁻¹)			平均波速/(m·s ⁻¹)
		第1次	第2次	第3次	
平行柱体轴线	B1	4 844	4 871	4 851	4 830
	B2	4 859	4 790	4 803	
	B3 ~ B4	4 842	4 814	4 802	
垂直柱体轴线	B3	5 539	5 514	5 522	5 459
	B4	5 414	5 398	5 520	
	B1 ~ B2	5 429	5 379	5 417	

5 岩块强度各向异性

为进行点荷载试验，在 4# 导流洞内共拾取了符合试验要求的柱状节理岩块约 100 块，试验实施依据国际岩石力学建议方法的点荷载建议方法^[21]执行。考虑到柱状节理岩体结构上具有横观各向同性的特点，因此点荷载试验分为平行柱体轴线和垂直柱体轴线 2 种加载方式，试验中其加载压头两点连线平行柱体轴线的有效试验数据有 39 个，试验中加载压头两点连线垂直柱体轴线的有效试验数据有 44 个。需强度的是，基于现场爆破后的岩块得到的点荷载强度应认为是含损伤的岩石强度更为确切。

试验结果表明，柱状节理岩块的点荷载强度较为离散，2 种不同加载方式下的点荷载强度值还存在部分重叠。然而，对测量值进行回归统计后表明柱状节理块在 2 个不同加载条件下的强度还是具有一定的各向异性特点，即平行柱体轴线加载的点荷载强度 I_{50}^1 约为 3.94 kN，而垂直柱体轴线加载的点荷载强度 I_{50}^2 约为 2.95 kN(见图 9)，因此该洞段柱状节理岩体的强度的各向异性系数通过如下计算公式可得约为 0.75：

$$\zeta = I_{50}^2 / I_{50}^1 \quad (4)$$

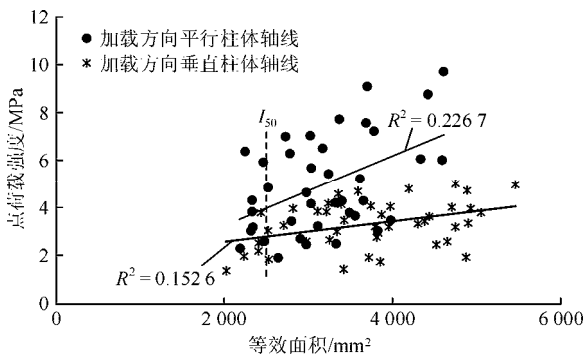


图 9 现场岩块点荷载试验结果

Fig.9 Results of point loading test of rock block in field

柱状节理岩块的这一强度各向异性特点还是与其自身的隐性节理面发育特点密切相关。由于试验岩块中包含了较为发育的缓倾角隐性节理，因此点荷载试验时当其加载方向平行缓倾角隐节理(即垂直柱体轴线)时其强度自然较垂直缓倾角隐节理(即平行柱体轴线)的强度低。

为了获得较完整柱状节理玄武岩的单轴抗压强度(UCS)，将前述声波测试钻孔(B₁ ~ B₄)内取出的岩芯制作成标准试样后，分别对平行柱体轴线钻孔的岩芯和垂直柱体轴线钻孔的岩芯进行单轴压缩试验，获得不同加载方向下试样的典型单轴压缩曲线

见图 10。试验结果表明，试样轴线垂直柱体轴线方向岩芯的单轴抗压强度平均约 179.5 MPa，而试样轴线垂平行体轴线方向岩芯的单轴抗压强度约 117.6 MPa(见表 2)，两者的比值约 0.67，而且不同加载方向获得曲线的割线模量 E_{50} 也存在一定差别，但线弹性段斜率基本一样(见图 10)。

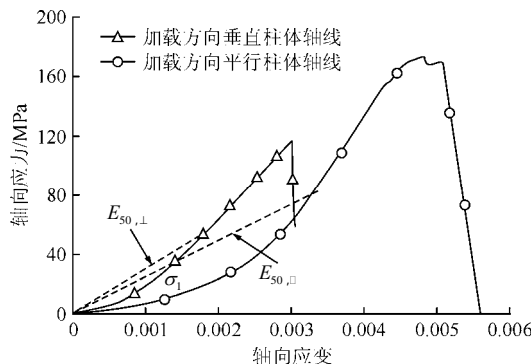


图 10 不同加载方向下试样的典型单轴压缩曲线

Fig.10 Typically uniaxial compressive curves of specimens with different loading directions

表 2 柱状节理岩体岩芯的单轴抗压强度

Table 2 Uniaxial compression strengths of specimens with different loading directions

取样位置	单轴抗压强度/MPa	平均值/MPa	加载方式
B3, B4 孔	108.3	117.6	垂直柱体轴线
	128.6		
	117.1		
	116.5		
B1, B2 孔	172.9	179.5	平行柱体轴线
	195.7		
	183.6		
	165.9		

需要注意的是，由于现场点荷载试验的试样对象是损伤的岩块，其加载方法与与单轴压缩存在差别，故其根据相关经验公式换算得出的等效单轴抗压强度与室内完整岩芯单轴压缩试验获得的单轴抗压强度存在一定差异。然而，各自试验获得的柱状节理玄武岩强度各向异性系数却还是一致性。

6 柱状节理岩体卸荷破坏方式讨论

一方面，由于柱状节理玄武岩在几何形态上具有特殊的“柱体”结构特征和三组性状有差异的节理组；另一方面，由于柱状节理玄武岩宏观上具有变形和强度的横观各向同性特性，其在开挖卸荷下则表现出了特殊的非对称破坏特点。如图 11 所示，当柱状节理岩体卸荷后($\sigma_1, \sigma_1', \sigma_3, \sigma_3'$)，岩体应力重分布后的莫尔应力圆临近 Coulomb 强度包络线

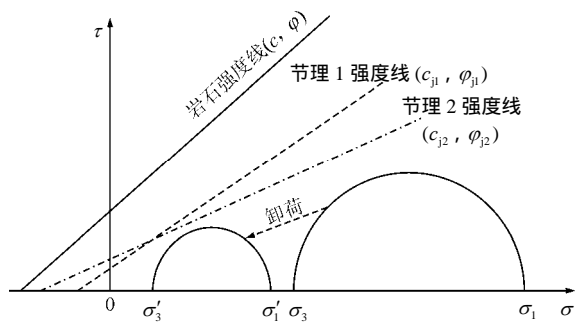


图 11 多节理岩体卸荷过程莫尔应力圆临近其强度包络线的变化趋势

Fig.11 Development of Mohr stress circle approaching to the strength lines of rock mass with multi joints sets

或与之相交的先后顺序是不一样的，因而其卸荷后不同节理组和岩块的开裂与破坏具有先后顺序，破坏的位置具有非对称性，且破坏的程度也具有差异性。对于右岸导流洞柱状节理玄武岩段开挖后的现场调查发现：柱状节理围岩基本为“结构-应力”破坏模式，其具体表现形式如下：

(1) 柱间节理面张开致柱体滑脱：洞室开挖卸荷使得柱状节理岩体的柱状节理面逐步张开，进而导致柱体与周围岩体脱离而滑落(见图 2(b))。这种破坏形式主要发生在柱体顺向倾向临空面的导流洞边墙部位。

(2) 柱内陡倾角隐节理张开致柱体分解：开挖爆破和地应力卸荷作用使得柱体内原本较为紧密的陡倾隐节理松动，进而张开并导致柱体分解，形成多个柱内块体而掉落(见图 4)。这一破坏形式也在柱体顺向倾向临空面的边墙部位最为常见。

(3) 柱内缓倾角隐节理张开致柱体断开：开挖爆破的扰动效应和地应力的卸荷效应同样导致了柱体内较密集的缓倾角隐节理的逐步卸荷开裂，明显地破坏了柱体的完整性，从而导致柱体的非连续性断开而形成分段柱体(见图 12(a))。



(a) 边墙缓倾角隐节理张开 (b) 侧拱喷射混凝土剥落

图 12 现场柱状节理岩体破坏形式

Fig.12 In-situ failure modes of columnar rock mass

(4) 节理剪涨破坏致柱体岩块剥落：在洞室开挖后形成的重分布围岩应力场作用下，柱状节理玄

武岩中的密集节理面在较大的切向应力作用下发生剪切滑动和体积扩容，进而导致岩体的结构破坏并诱发岩块与喷射混凝土的剥落。这一破坏形式在右岸导流洞应力集中的左侧拱最为明显(见图 12(b))。

可见，针对柱状节理岩体在开挖卸荷后的节理面张开而导致围岩破坏这样典型的结构-应力控制型破坏模式，可考虑的支护方式应该是：(1) 及时地对开挖后的围岩表面进行喷射混凝土支护，达到抑制表面围岩节理面自由松弛与张开的目的；(2) 适时地通过系统锚杆支护将多个柱体连结在一起，形成一个整体承载结构。上述两方面支护手段既可以有效地抑制柱状节理玄武岩的结构性劣化，又可以有效地改善柱状节理岩体的受力状态，发挥高强度玄武岩岩块的承载能力，发挥“结构体”的强度，即松弛-抑制基本理念，从而反映了新奥法的思想“充分利用和发挥围岩的自承载能力”。导流洞柱状节理玄武岩段的围岩支护实践表明，及时的喷锚支护是可以有效地控制围岩的变形与破坏，确保洞室整体稳定。

7 结 论

针对由多个柱体排列且横断面不规则的柱状节理玄武岩体，为认识其特殊的各向异性特征，开展了一系列的现场统计分析、原位声波测试和室内试验，获得如下结论和认识：

(1) 因柱状节理玄武岩在岩浆岩冷凝过程中特殊的生成机制，现场柱状节理岩体实际上包含了 3 组分布密度、发育程度、力学性质各异的多尺度节理组，整体上为一种具有低结构完整性且高岩块强度性的镶嵌节理岩体。

(2) 柱状节理岩体特殊的柱状排列结构特征使得其具有较为明显的宏观各向同性力学特性，其垂直柱体轴线的平面是其宏观各向同性面。

(3) 现场和室内试验表明，柱状节理岩体的宏观各向同性力学特性表现为：平行柱体轴线方向的弹性模量小于垂直柱体轴线方向的弹性模量；而平行柱体轴线方向的强度大于垂直柱体轴线方向的强度，即变形各向异性与强度各向异性相反。

(4) 由于柱状节理岩体自身丰富的节理系统，较高应力地层中洞室开挖后，柱状节理围岩基本表现为“结构-应力”控制型破坏，因而一种具操作性同时也被现场实践所证实的围岩支护方式是及时喷射混凝土加适时的锚杆联合支护方式，即松弛-

抑制支护理念，这样可以较好地挖掘“低结构高强度”柱状节理岩体的强度特性，充分发挥其结构强度。

致谢 感谢中国长江三峡工程开发总公司和中国水电顾问集团华东勘测设计研究院现场设代处身处工程一线的领导和工程师们为本研究提供的相关基础资料与宝贵建议。

参考文献(References)：

- [1] 谷德振. 岩体工程地质学基础[M]. 北京：科学出版社，1979：1-10.(GU Dezhen. Basic mechanics of engineering geology for rock mass[M]. Beijing：Science Press，1979：1-10.(in Chinese))
- [2] 孙广忠. 关于岩体特性和岩体力学问题[J]. 水文地质与工程地质，1980，(2)：6-7.(SUN Guangzhong. Problem about rock properties and rock mechanics[J]. Hydrogeology and Engineering Geology，1980，(2)：6-7.(in Chinese))
- [3] 陈宗基. 关于岩石变形的基本微分方程[J]. 岩石力学与工程学报，1984，3(1)：1-10.(TAN Tjongkie. Basical differential equation related to rock deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，1984，3(1)：1-10.(in Chinese))
- [4] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践[M]. 北京：水利电力出版社，1981：15-16.(TAO Zhenyu. Theory and practice of rock mechanics[M]. Beijing：Water Resources and Electric Power Press，1981：15-16.(in Chinese))
- [5] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京：科学出版社，1988：1-2.(SUN Guangzhong. Structure mechanics of rock mass[M]. Beijing：Science Press，1988：1-2.(in Chinese))
- [6] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(3)：433-450.(WANG Sijing. Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(3)：433-450.(in Chinese))
- [7] LUCAS G，STEPHEN W M. Scaling of columnar joints in basalt[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，2008，113(B10)：1-18.
- [8] 方世明，李江风，伍世良，等. 中国香港大型酸性火山岩六方柱状节理构造景观及其地质成因意义[J]. 海洋科学，2011，35(5)：89-94.(FANG Shiming，LI Jiangfeng，WU Shiliang，et al. Large six-party columnar joints of acidic volcanic rocks and its geological causes and significance in Hong Kong China[J]. Marine Sciences，2011，35(5)：89-94.(in Chinese))
- [9] 徐卫亚，郑文棠，宁宇，等. 柱状节理坝基岩体三维各向异性数值分析[J]. 岩土力学，2010，31(3)：949-955.(XU Weiya，DENG Wentang，NING Yu，et al. 3D anisotropic numerical analysis of rock mass with columnar joints for dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(3)：949-955.(in Chinese))
- [10] 刘海宁，王俊梅，王思敬. 白鹤滩柱状节理岩体真三轴模型试验研究[J]. 岩土力学，2010，31(增1)：163-171.(LIU Haining，WANG Junmei，WANG Sijing. Experimental research of columnar jointed basalt with true triaxial apparatus at Baihetan Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(Supp.1)：163-171.(in Chinese))
- [11] 朱道建，杨林德，蔡永昌. 柱状节理岩体压缩破坏过程模拟及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(4)：716-724.(ZHU Daojian，YANG Linde，CAI Yongchang. Simulation of compressive failure process of columnar jointed rock mass and its failure mechanism analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2009，28(4)：716-724.(in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 唐鸣发. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究阶段坝线选择工程地质勘察报告[R]. 杭州：中国水电顾问集团华东勘测设计研究院，2008.(TANG Mingfa. Engineering geology report for the selection of dam site during feasibility phase of Baihetan Hydropower Station in Jinsha river[R]. Hangzhou：HydroChina Huadong Engineering Corporation，2008.(in Chinese))
- [14] 石安池，唐鸣发，单治钢，等. 金沙江白鹤滩水电站可行性研究选坝阶段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测设计研究院，2006，11.(SHI Anchi，TANG Mingfa，SHAN Zhigong，et al. Special engineering geology report for the columnar jointed rockmass at the dam site during feasibility phase of Baihetan Hydropower Station in Jinsha river[R]. Hangzhou：HydroChina Huadong Engineering Corporation，2006.(in Chinese))
- [15] HETENYI G，TAISNE B，GARELF，et al. Scales of columnar jointing in igneous rocks：field measurements and controlling factors[J]. Bulletin of Volcanol，2012，74(2)：457-482.
- [16] GEOHRING L，MORRIS S W. Scaling of columnar joints in basalt[J]. Journal of geophysical research：Solid Earth，2008，113(B10)：1-18.
- [17] MARTINEZ-MARTINEZ J，BENAVENTE D，GARCA-DEL-CURAM A. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2012，71(2)：263-268.
- [18] 王楚峰，张卫东，李孟，等. 山西寿阳 15 号煤层动静弹性参数实验研究[J]. 煤田地质与勘探，2001，39(6)：72-75.(WANG Cufeng，ZHANG Weidong，LI Meng，et al. Experimental study of dynamic and static elastic parameters of No.15 coal seam in Shouyang block of Shanxi Province[J]. Coal Geology and Exploration，2001，39(6)：72-75.(in Chinese))
- [19] 江进，孙进忠，乔艳红，等. 太原晋阳西山大佛岩石动静力学参数的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(增1)：3452-3460.(JIANG Jin，SUN Jinzhong，QIAO Yanhong，et al. Comparison between static and dynamic parameters of grand buddha rockmass specimens in west Jinyang mountain in Taiyuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2007，26(Supp.1)：3452-3460.(in Chinese))
- [20] GOODMAN R E. Introduction to Rock Mechanics[M]. New York：John Wiley and Sons，1970：478.
- [21] International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods. Suggested methods for determining point load strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts，1985，22(2)：51-60.