

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.010

渗流作用下柱状节理岩体强度特性试验

林 豆^{1,2}, 徐卫亚^{1,2}, 王环玲^{2,3}, 吉 华¹

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究白鹤滩水电站柱状节理玄武岩在高渗透压力作用下的强度特性, 采用与水电站现场岩体物理力学性质相近的人工材料, 制作具有相同节理构造的柱状节理岩体模型试样, 开展了不同渗透压力的渗流应力耦合三轴力学试验, 分析了渗透压力对柱状节理岩体的破坏模式、强度和渗流量的影响。试验结果表明: 渗流作用下柱状节理岩体的破坏模式为沿着节理倾角的滑移破坏; 渗流作用下的柱状节理岩体具有较低的强度, 三轴压缩峰值强度与渗透压力呈负相关关系; 应力应变曲线可分为4个阶段, 渗流量随应力应变曲线呈现出阶段性特征, 渗透压力对岩体强度和渗流量影响较明显。

关键词: 柱状节理岩体; 岩体模型; 渗流作用; 强度特性; 三轴力学试验; 破坏模式; 白鹤滩水电站

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2019)02-0151-05

Experimental study on strength characteristics of columnar jointed rock mass under the seepage

LIN Dou^{1,2}, XU Weiya^{1,2}, WANG Huanling^{2,3}, JI Hua¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Columnar jointed basalt develops in the arch dam foundation and the dam abutment of Baihetan Hydropower Station. After the water storage in the hydropower station, the head difference between the upstream and the downstream of dam will form a high seepage pressure, and the strength characteristics of rock mass under high osmotic pressure is one of concerned scientific issues in rock engineering. Therefore, artificial material with physical and mechanical characteristics similar to those of in-situ rock mass was used to make the columnar jointed rock mass model samples with the same joint structure. In order to investigate the effect of seepage flow pressure on the failure modes, strength and seepage quantity of jointed rock mass, a series of triaxial tests on the columnar jointed rock mass samples were carried out under different osmotic pressures. The experimental results indicate that the failure mode of columnar jointed rock mass is sliding failure which alongs the joint dip angle under seepage flow pressure. Moreover, the columnar jointed rock mass has a lower strength under seepage, and the peak strength of triaxial compression test is negatively correlated with the osmotic pressure. Furthermore, four stages for the stress-strain curve of columnar jointed rock mass under triaxial compression condition are summarized based on test results, and seepage quantity shows phased characteristics with the stress-strain curve. Additionally, the effect of seepage on columnar jointed rock mass strength and seepage flow is obvious.

Key words: columnar jointed rock mass; rock model samples; seepage; strength characteristic; triaxial test; failure mode; Baihetan Hydropower Station

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407005); 国家自然科学基金(11772118); 中央高校基本科研业务费专项(2016B05314)

作者简介: 林豆(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: lindlind1994@163.com

通信作者: 王环玲, 教授。E-mail: wanghuanling@hhu.edu.cn

引用本文: 林豆, 徐卫亚, 王环玲, 等. 渗流作用下柱状节理岩体强度特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 151-155.

LIN Dou, XU Weiya, WANG Huanling, et al. Experimental study on strength characteristics of columnar jointed rock mass under the seepage[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(2): 151-155.

柱状节理岩体是一种由地壳浅部玄武岩熔浆喷发溢流至地表冷凝收缩而形成的特殊岩体^[1-2]。由于岩体内部广泛发育的柱状原生张性破裂构造,导致其具有非连续性、非均匀性和各向异性等特殊力学性质^[3]。柱状节理岩体广泛分布在我国西南地区,据统计至少有 8 座大中型水电站涉及到柱状节理玄武岩工程问题^[4],其中在建的白鹤滩水电站坝基柱状节理岩体工程问题最为典型。蓄水后大坝上下游水头差将形成较高水头压力,高渗压作用下坝基岩体的强度特性将发生显著变化,因此蓄水后坝基岩体的安全稳定性问题对工程安全至关重要。

目前,针对柱状节理岩体的工程力学特性已取得了一些研究成果^[4-5]。Brady 等^[6]分析了大尺寸柱状节理玄武岩的加卸载规律,得到了典型的 3 个阶段的力学行为。孟国涛^[7]和郑文棠等^[8]基于原位承压板试验,研究了白鹤滩柱状节理岩体的力学特性。Jiang 等^[9]采用现场声波检测和室内试验相结合的方法研究了岩体的变形和强度各向异性,深入分析了节理面的张裂和剪切滑移破坏特征以及岩体的工程特性。Hao 等^[10-11]提出了考虑时间的强度模型,并分析了导流洞柱状节理岩体开挖损伤圈演化规律。

由于柱状节理玄武岩的力学性质具有尺寸效应,而现有的室内岩石力学试验仪器对试样尺寸有所限制,这使得室内试验仅能得到玄武岩块的力学性质而非柱状节理岩体的性质。因此,通过制作与现场岩体物理力学性质相似的小尺寸模型试样开展室内模拟试验是一种较好的方法。肖维民等^[12-13]采用石膏、水泥和水的混合物制作了柱状节理模型试样,分别开展了单轴、三轴压缩力学试验,对其各向异性力学特性进行了研究,获得了柱状节理岩体强度参数与柱体倾角的变化规律。Ji 等^[14]采用水泥砂浆类岩石材料制作了柱状节理岩体模型并开展了单轴压缩试验,通过节理因子法估算了白鹤滩柱状节理玄武岩的强度和变形参数。Lin 等^[15]采用 3D 打印技术制作了不规则柱状节理岩体模型,对其各向异性强度和变形参数进行了研究。巢志明等^[16]基于柱状节理模型试验研究了各向异性渗透特性。以上对柱状节理岩体的强度、变形、破裂机理以及渗透特性等方面的研究均取得了丰富的成果,但还未见渗流作用对强度特性影响的研究。

笔者以白鹤滩水电站现场柱状节理岩体为原型,采用水泥砂浆类岩石材料制作了柱状节理岩体模型,开展了渗流应力耦合三轴压缩力学试验,研究不同渗透压力下岩体的破坏模式以及不同渗压作用下岩体的峰值强度,分析了三轴压缩过程中渗流量、偏应力随轴向应变的变化规律。

1 试验方法

1.1 试样制作

白鹤滩坝基柱状节理岩体的柱体直径为 13 ~ 25 cm,远大于实验室的岩样尺寸,而岩体的渗流力学特性体现在较大的几何尺度上,因此从工程现场取样进行室内三轴力学试验较难反映出节理岩体的力学特性。为此,需要制作按一定比例缩小的具有相似裂隙构造的类岩石材料模型。试验取模型试样柱体直径为 50 mm,几何相似比为 1/2.6 ~ 1/5。为了获得与现场岩体相似的物理力学特性,相似材料需验证满足相似准则^[16-17]:

$$C_{\sigma} = C_l C_X \quad C_{\sigma} = C_{\varepsilon} C_E \quad C_{\delta} = C_{\varepsilon} C_l \quad C_{\nu} = 1 \quad C_{\sigma} = C_l C_{\gamma} \quad C_l C_{\gamma} = C_{\varepsilon} C_E \quad (1)$$

式中: C_{σ} 、 C_l 、 C_X 、 C_{ε} 、 C_E 、 C_{δ} 、 C_{ν} 、 C_{γ} ——原型与模型的应力、几何长度、体积力、应变、弹性模量、位移、泊松比、重度之比。

参考文献[14]中的配比,制作柱体的水泥砂浆配比为 $m_c : m_s : m_w : m_p = 1.0 : 0.5 : 0.35 : 0.002$,其中 m_c 、 m_s 、 m_w 和 m_p 分别表示水泥、砂、水和减水剂的质量。作为胶结材料的白水泥浆的配比为 $m_c : m_w = 1.0 : 0.4$ 。柱体材料密度 $\rho = 2.19 \text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 16.03 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.24$,黏聚力 $c = 14.35 \text{ MPa}$,内摩擦角 $\varphi = 38.7^\circ$,单轴抗压强度 $\sigma = 59.77 \text{ MPa}$;节理材料黏聚力为 1.21 MPa ,内摩擦角为 31.2° 。

试样制备过程如图 1 所示,采用有机玻璃材料制作含有六棱柱凹槽的模具(图 1(a));向模具内注入水泥砂浆,养护脱模后得到六棱柱体(图 1(b));将柱体用白水泥浆粘合后进行养护,考虑到白鹤滩水电站蓄水后上下游形成的渗透压力梯度方向以及现场玄武岩柱体的倾角,按柱体倾角 75° 进行切割(图 1(c));切割后的长方体试样经过打磨最后得到直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱体标准试样(图 1(d))。

1.2 试验设备与试验方法

试验在岩石全自动三轴流变伺服系统上进行,应变测量系统由线性位移传感器(LVDT)和环向应变测量环组成,其三轴压力室及应变测量系统如图 2 所示,试验加载中的偏压、围压和渗透压力分别由 3 个高精

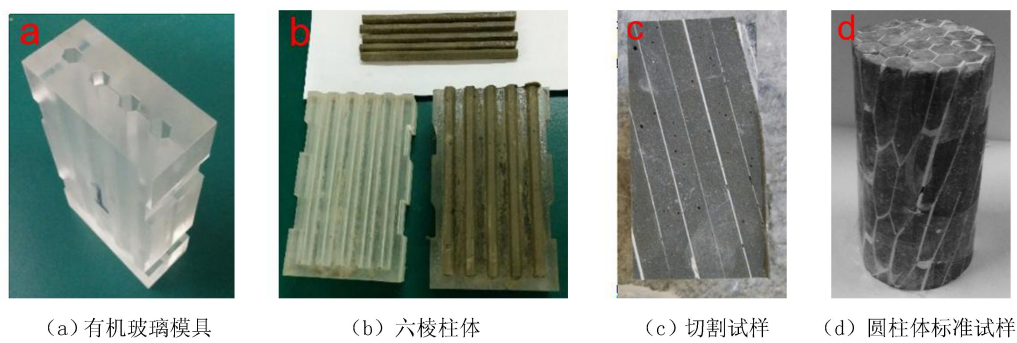


图1 柱状节理岩体试样制备过程

Fig.1 Sample preparing process of the columnar jointed rock mass

度的轴压泵 P1、围压泵 P2 和渗透压力泵 P3 提供。岩石全自动三轴流变伺服系统最大围为了研究渗流作用下柱状节理岩体强度特性,进行相同围压,不同渗压作用的三轴力学试验。根据地质勘查结果,选取围压为 6 MPa。具体试验过程如下:将抽真空后的柱状节理岩样浸泡于蒸馏水中 24 h 以上,确保岩样处于饱和状态;控制液压泵对岩样施加围压至 6 MPa;在岩样入口端施加渗透压力(1 MPa、2 MPa、3 MPa),保持岩样出口端为大气压,由此在岩样的两端形成恒定的渗透压差;以位移控制加载方式对岩样进行加载,位移速率为 0.02 mm/min;加载直至岩样破坏,试验结束后卸载并拆下岩样。试验加载过程中由计算机自动记录柱状节理岩样应力-应变曲线。

由于节理的存在,柱状节理岩体的渗透性能较强,试验中假定柱体不透水,且节理面和柱体之间没有流体交换,即岩体中的渗流为裂隙渗流。柱状节理岩样的渗流量 Q (mL/min)由计算机记录的实时流量计算得到。

2 结果分析

2.1 破坏形态

柱状节理岩样的破坏形态如图 3 所示,破坏模式为沿着节理面的滑移破坏。在没有渗流作用状态下,柱状节理试样沿内部多条节理面滑移破坏,柱体没有发生断裂,试样整体碎裂成多块。在渗透压力为 1 MPa、2 MPa 和 3 MPa 条件下,试样沿内部单一贯通节理面发生滑移破坏,整体破裂成 2 块。在渗流作用下,节理面的水压力抵消了一部分法向压力,由此可见渗流作用弱化了节理面的抗剪强度,使其更容易沿最不利节理面发生滑移破坏,并且节理破坏面破碎程度随渗透压力增加而表现得愈加明显。

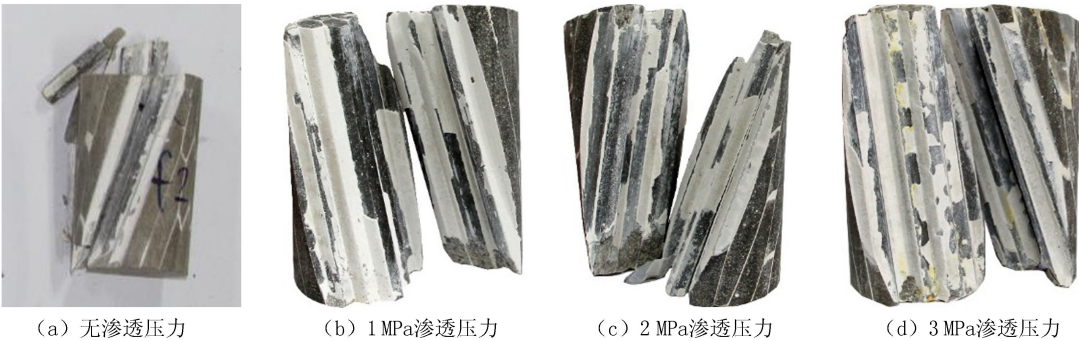


图3 不同渗透压力作用下的破坏形态

Fig.3 Failure modes of columnar jointed rock mass under various osmotic pressures

2.2 强度特性

渗透压力梯度对试验结果的影响较明显,试样的应力-应变曲线如图 4 所示。随着渗透压力由 0 MPa 增大至 3 MPa,试样的峰值强度逐渐减小,相同应力下的应变增大,由此可以看出渗透压力对柱状节理岩体

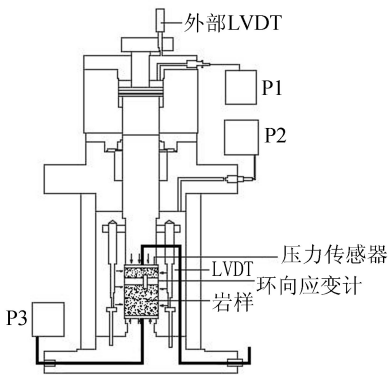


图2 三轴压力室及应变测量系统
Fig.2 A self-equilibrium triaxial pressure chamber and strain measuring system

试样强度有削弱作用。

围压为6 MPa 时,0 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa 渗透压力作用下柱状节理岩体试样的峰值强度分别为46.7 MPa、35.11 MPa、29.08 MPa、23.69 MPa。由试样的强度与渗透压力关系曲线(图5)可知,峰值强度与渗透压力之间具有负相关关系,可近似用负指数函数式($\sigma_{\max}=46.7e^{-0.233P}$, $R^2=0.96$, P 为渗透压力)表示。

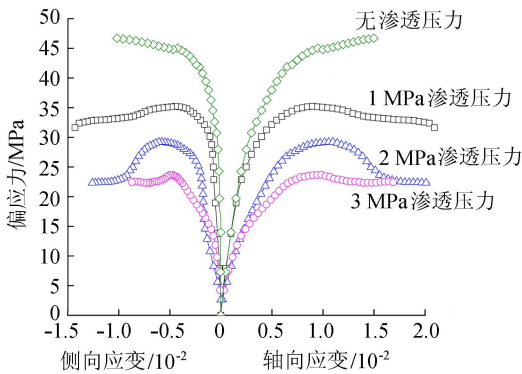


图4 柱状节理岩体试样三轴力学试验应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of columnar jointed rock mass in the triaxial tests

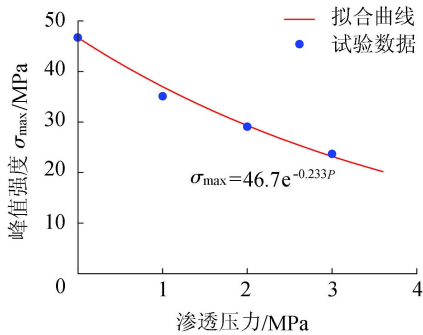


图5 柱状节理岩体试样峰值强度与渗透压力关系

Fig.5 Relationship between strength and osmotic pressure of columnar jointed rock mass

2.3 应力、渗流随应变变化关系

三轴压缩试验中渗流量和偏应力随轴向应变的变化规律如图6所示。由图6可知,柱状节理岩体渗流应力耦合三轴力学试验过程可以分为以下4个阶段:(a)节理压密阶段。在这个阶段,柱状节理岩体受到轴向荷载作用和围压的约束,内部节理面被压密,应力-应变曲线具有短暂的非线性特性。此时,节理面上的法向应力增大,节理面闭合,渗流隙宽减小,岩体的渗流量迅速减小。(b)弹性阶段。由应力-应变曲线上的点a开始,岩体变形主要表现为柱体材料和节理面的弹性变形,曲线近似为直线。在这一阶段,节理面变形量较小,因此渗流量变化不大。(c)塑性阶段。应力-应变曲线经过点b后呈现出上凹的非线性特性,此时岩体进入塑性变形阶段,应变随着应力的增加不断增大,节理逐渐滑移贯通。节理面发生剪切塑性变形,岩体的渗流量逐渐增大。(d)破坏阶段。应力-应变曲线达到最高点c,试样已达到峰值强度,内部节理面因滑移而贯通,随着轴向加载的继续而加速破坏,试样的承载力逐渐减小。在这一过程中内部节理面因为剪切膨胀而进一步张开,隙宽增大,岩体渗流量也随之增大。

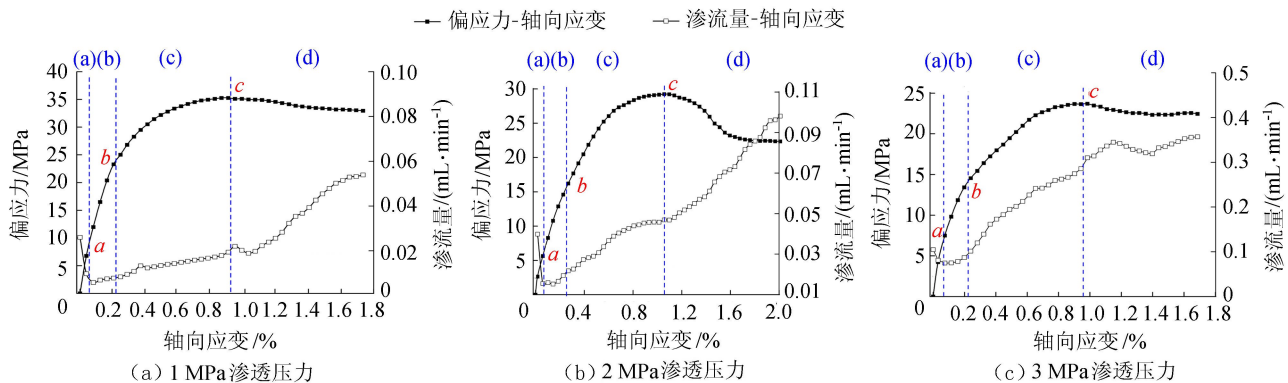


图6 偏应力-轴向应变、渗流量-轴向应变关系曲线

Fig.6 Relationships of deviatoric stress-axial strain and flow rate-axial strain

总体上,不同渗透压力作用下,应力-应变曲线和渗流量-应变曲线的规律较为一致,具有阶段性特征。岩体的强度随渗压的增大而减小,渗流量随渗压的增大而增大。

3 结 论

- a. 在渗流作用下,柱状节理岩体试样容易沿单一贯通节理面滑移破坏,柱体未见断裂,属于结构破坏。
- b. 渗流作用对柱状节理岩体的强度有削弱作用,岩体强度与渗压之间呈负相关关系,渗压对岩体强度

的削弱可以近似用负指数函数来表示。

c. 应力-应变曲线可分4个阶段,岩体渗流量在节理压密阶段减小,在弹性阶段基本不变,在塑性阶段逐渐增大,试样破坏后,节理面剪切张开,岩体渗流量进一步增大。

参考文献:

- [1] PHILLIPS J C, HUMPHREYS M C S, DANIELS K A, et al. The formation of columnar joints produced by cooling in basalt at Staffa, Scotland[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2013, 75(6): 1-17.
- [2] 徐松年. 试论玄武岩柱状节理的形态分类与成因分类[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 1982, 9(4): 126-137. (XU Songnian. Discussion on morphological and gential classification of columnar joints in basalt[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 1982, 9(4): 126-137. (in Chinese))
- [3] 江权,冯夏庭,樊义林,等. 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 Xiating, FAN Yilin, 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))
- [4] 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 Weiya, ZHENG Wentang, SHI Anchi. 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))
- [5] LONDE P. The Malpasset Dam failure[J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1): 331-338.
- [6] BRADY B, CRAMER M L, HART R D. Preliminary analysis of a loading test on a large basalt block[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1985, 22(5): 345-348.
- [7] 孟国涛. 柱状节理岩体各向异性力学分析及其构成应用[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [8] 郑文堂,徐卫亚,邬爱清,等. 柱状节理开挖模拟洞数值原位试验[J]. *岩土力学*, 2007, 28(增刊1): 253-257. (ZHENG Wentang, XU Weiya, WU Aiqing, et al. Numerical in situ testing of excavation experimental cavity on columnar joints[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(Sup1): 253-257. (in Chinese))
- [9] 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(3): 35-45.
- [10] HAO X J, FENG X T, YANG C X, et al. Analysis of EDZ development of columnar jointed rock mass in the Baihetan Diversion Tunnel[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2015, 49: 1-24.
- [11] 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 Xianjie, FENG Xiating, 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))
- [12] 肖维民, 邓荣贵, 付小敏, 等. 模拟柱状节理岩体常规三轴压缩下变形和强度特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 2817-2826. (XIAO Weimin, DENG Ronggui, FU Xiaomin, et al. Experimental study of deformation and strength properties of simulated columnar jointed rock masses under conventional triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup1): 2817-2826. (in Chinese))
- [13] 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*, 2015, 34(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*, 2015, 34(5): 957-963. (in Chinese))
- [14] JI H, ZHANG J C, XU W Y, et al. Experimental investigation of the anisotropic mechanical properties of a columnar jointed rock mass: observations from laboratory-based physical modelling[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2017, 50(4): 1-13.
- [15] LIN Zhinan, XU Weiya, WANG Huanling, et al. Anisotropic characteristic of irregular columnar-jointed rock mass based on physical model test[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(5): 1728-1734.
- [16] 巢志明, 王环玲, 徐卫亚, 等. 循环加卸载下柱状节理材料渗透率和孔隙度演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 124-141. (CHAO Zhiming, WANG Huanling, XU Weiya, et al. Permeability and porosity of columnar jointed rock under cyclic loading and unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 124-141. (in Chinese))
- [17] 周维垣, 杨若琼, 刘耀儒, 等. 高拱坝整体稳定地质力学模型试验研究[J]. *水力发电学报*, 2005, 24(1): 53-58, 64. (ZHOU Weiyuan, YANG Ruojiong, LIU Yaoru, et al. Research on geomechanical model of rupture tests of arch dams for their stability[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(1): 53-58, 64. (in Chinese))