

DOI: 10.11779/CJGE2018S2051

基于3D打印技术的模拟柱状节理岩体试样制备方法

肖维民^{1,2}, 黄巍^{1,2}, 丁蜜¹, 李志坚¹

(1. 四川农业大学土木工程学院, 四川 都江堰 611830; 2. 村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心, 四川 都江堰 611830)

摘要: 以规则正六棱柱型柱状节理岩体为对象, 介绍了基于3D打印技术的模拟柱状节理岩体试样制备方法, 即在SolidWork中建立柱状节理网络3D打印数字模型, 以光敏树脂为打印材料, 采用3D打印技术打印具有不同倾角的圆柱形柱状节理网络模型, 并以此为模具, 采用白水泥浆为模型材料进行浇筑, 经过拆模、黏结等程序制备具有不同倾角的模拟柱状节理岩体试件; 再通过对试件进行单轴抗压强度试验, 分析模拟柱状节理岩体试件的强度、变形和破坏特征, 初步验证了上述基于3D打印技术的制样方法能够较好考虑柱状节理岩体的结构特性, 反映柱状节理对岩体强度的弱化效应, 所制备的柱状节理岩体试件基本满足柱状节理岩体室内试验的要求。

关键词: 岩石力学; 柱状节理岩体; 3D打印

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0256-05

作者简介: 肖维民(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事节理岩体力学和水力学等方面的教学和科研工作。E-mail: sicauxwm@163.com。

Method for preparing artificial columnar jointed rock mass specimens by using 3D printing technology

XIAO Wei-min^{1,2}, HUANG Wei^{1,2}, DING Mi¹, LI Zhi-jian¹

(1. School of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China; 2. Sichuan Higher Education Engineering Research Center for Disaster Prevention and Mitigation of Village Construction, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: Taking regular hexagonal columnar jointed rock mass as an object, a method for preparing artificial columnar jointed rock mass specimens is proposed based on 3D printing technology. The 3D digital model for columnar joints network is firstly established by using the software Solidworks, then photopolymer resin is chosen as the printing material and cylindrical columnar joint network models with different dip angles are printed by a 3D printer. Then taking these cylindrical columnar joint network models as moulds, the artificial columnar jointed rock mass specimens are prepared following the processes of pouring white cement slurry into the mould, demoulding prisms from the cylindrical columnar joint network model and gluing the prisms. The uniaxial compression tests are performed on these artificial columnar jointed rock mass specimens, and the uniaxial compression strengths, deformations and failure properties are analyzed. Based on the above, the reliability of the proposed method was verified preliminarily. From the results, it is indicated that the structural properties and the weakening effect of columnar joints on the strength of columnar jointed rock mass are well duplicated by the proposed method, and the specimens can meet the laboratory experiment requirements well.

Key words: rock mechanics; columnar jointed rock mass; 3D printing

0 引言

柱状节理是玄武岩喷发溢流过程中冷却收缩形成的一种张性破裂构造, 属于原生节理, 它往往将岩体切割成规则或者不规则棱柱体。近年来, 依托金沙江上游白鹤滩水电站柱状节理岩体坝基工程, 国内学者采用现场试验和数值模拟方法对柱状节理岩体力学各向异性特性进行了深入研究^[1-6], 研究成果对指导柱状节理岩体开挖施工具有重要的实践意义。但是, 要系统开展柱状节理岩体工程特性的研究, 就需要对大量

柱状节理岩体样本进行分析, 因此寻求一种能够获取大量柱状节理岩体样本的方法成为研究柱状节理岩体工程特性亟待解决的关键技术问题之一。已有部分研究人员采用模型试验方法制作小尺寸模拟柱状节理岩体试件, 通过对试件进行室内力学性能测试, 得到柱

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502242); 四川省教育厅科研创新团队项目(16TD0006); 四川省教育厅青年基金项目(16ZB0054)

收稿日期: 2018-07-22

状节理岩体的力学响应规律^[7-10]。

3D打印技术是近年来快速发展起来的一种快速成型技术, 其以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可黏合材料, 通过逐层喷涂堆叠累积方式来构造三维固体结构^[11]。3D打印技术最先主要应用于医学、航空航天、电子元件等领域, 近年来部分岩石力学专家对3D打印技术在裂隙岩体中的应用展开了初步研究, 如: Ju等^[12]利用Object Connex500 3D打印机, 以透明光聚合材料Vero Clear为基质材料、网格支撑材料Fullcure 705为非充填裂隙材料, 制备了裂隙煤岩3D模型(如图1所示), 该裂隙煤岩模型具有与天然煤岩一致的裂隙结构特征, 模型的力学性能指标也接近于天然裂隙煤岩; Lin等^[13]以白鹤滩水电站典型玄武岩柱状节理岩体为对象, 首先尝试采用光敏树脂作为节理材料打印不规则柱状节理网络, 制作了不规则柱状节理岩体试件, 但由于光敏树脂作为节理材料被保留在制备好的柱状节理岩体试件中, 因此试验过程中光敏树脂节理网络本身强度对柱状节理岩体试件的变形和强度有一定的影响; 王培涛等^[14]以PLA高分子塑料为打印材料, 采用3D打印技术制备了随机粗糙裂隙网络, 并在所得裂隙网络模型尺寸范围内浇筑水泥浆得到裂隙岩体模型, 与Lin等的研究类似, PLA随机粗糙裂隙网络也是保留在裂隙岩体中的, 且并未考虑其对裂隙岩体强度的影响。尽管利用3D打印技术可以实现复杂裂隙网络的重构, 为复杂裂隙岩体的室内模型试验研究提供有效途径, 但是3D打印技术在裂隙岩体中的应用还处于初步探索阶段, 究其原因在于以下两方面: ①受限于打印材料的种类, 目前能够完全满足岩石和节理力学特性的3D打印材料还很少; ②打印价格昂贵, 如Jiang等^[15]所述, 采用PLA材料打印用于单轴压缩试验的标准圆柱体试件($\phi 50\text{ mm} \times H100\text{ mm}$)所需打印材料费为18.13美元/个, 这对于需要大批量试件开展室内试验研究的岩石力学学科而言, 是一笔不菲的费用。



图1 裂隙煤岩3D打印模型^[19]

Fig. 1 3D printing model for fractured coal rock

鉴于此, 本文根据柱状节理岩体试件制备难点在于柱状节理网络难以复制的实际情况, 结合3D打印技术在复杂节理网络重构方面的优势, 从节约成本角度出发应用3D打印技术重构柱状节理网络三维模型, 然

后采用类岩石材料进行浇筑, 再通过拆模、黏结等过程最终得到模拟柱状节理岩体试件, 并通过室内单轴压缩试验对其强度和变形特性进行初步测试, 验证此制样方法的可靠性。

1 柱状节理网络3D打印

1.1 3D打印材料的选取

3D打印材料是3D打印技术发展的物质基础, 也是制约3D打印技术应用的瓶颈。目前, 根据3D打印工艺不同, 常用3D打印材料包括工程塑料、光敏树脂、橡胶类材料、金属材料、陶瓷材料和彩色石膏材料等^[16]。由于在此主要采用3D打印技术重构柱状节理岩体中的复杂节理网络模型, 在选择3D打印材料时主要考虑其强度、固化成型速度、耐高温性、防水性能和材料表面质量等因素, 最终选用乳白色光敏树脂作为打印柱状节理网络模型的基质材料, 其物理力学参数如表1所示。该材料最小打印精度为0.5 mm。

表1 光敏树脂材料的物理力学参数

Table1 Physical and mechanical parameters of photopolymer resin

参数	洛式硬度	抗拉强度/MPa	延伸率/%	弹性模量/GPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	吸水率/%
数值	81	50.0	20	2.495	75.0	2.137	1.15

1.2 不同倾角下的柱状节理网络3D模型

按照冷却收缩学说的观点^[17], 理想均质玄武岩柱状节理岩体的柱列截面应为正六边形, 但由于熔岩的不均质性, 冷却收缩过程中实际生成的柱状节理岩体柱列截面一般为六边形、四边形、五边形及七边形等多边形的组合, 但六边形在柱状节理岩体柱列截面多边形组合中是占优势的。

为了使柱状节理网络模型具有典型性, 在此以规则正六棱柱型柱状节理岩体为原型, 采用Solidworks软件建立不同倾角下的柱状节理网络3D打印模型: 首先确定正六边形的边长 a , 在Solidworks软件中绘制正六边形组合的柱列截面, 定义柱列截面所在平面为水平面, 沿垂直柱列截面方向拉伸得到三维柱状节理网络模型; 然后用与柱列截面法向成不同倾角 β 、直径为50 mm的圆柱面去切割此三维柱状节理网络模型(模拟现场钻芯取岩体试样过程), 并对圆柱面所包含的柱状节理网络模型进行修剪得到直径×高度为50 mm×100 mm的圆柱体柱状节理网络数字模型; 再将所得数字模型导入3D打印机, 采用光敏树脂材料进行打印就得到不同倾角的柱状节理网络实体模型, 具体流程如图2所示。按照上述流程, 设置正六边形边长 a 为1 cm, 打印壁厚为1.4 mm, 倾角 β 分别取值0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°和90°, 经

3D 打印后所得规则柱状节理网络 3D 数字模型和光敏树脂实体模型如图 3 所示。限于篇幅在此仅列举 $\beta=0^\circ$ 时的柱状节理网络 3D 数字模型和光敏树脂实体模型。

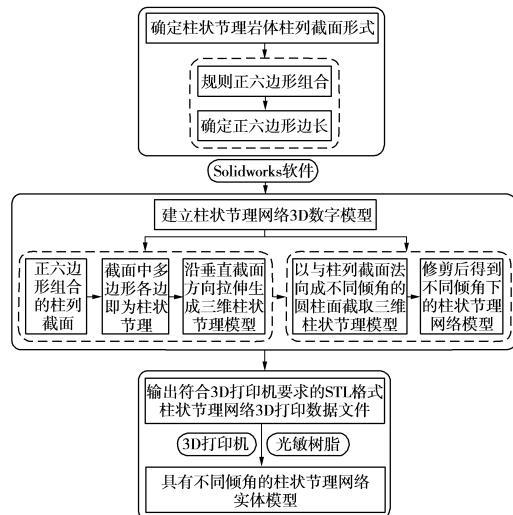


图 2 柱状节理网络模型 3D 打印流程图

Fig. 2 Flow chart of 3D printing of columnar joint networks

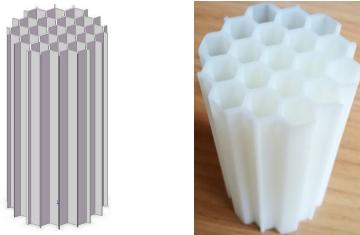


图 3 规则柱状节理网络 3D 数字模型和实体模型($\beta=0^\circ$)

Fig. 3 3D digital and printing models for regular columnar joint network

2 模拟柱状节理岩体试件的制备

为了制备模拟柱状节理岩体试件, 采用水灰比为 0.4 的净白水泥浆作为岩块模型材料, 其基本力学参数通过单轴压缩试验和完整试块直剪试验确定, 典型的试验曲线如图 4 所示, 基本力学参数汇总见表 2。

表 2 模型材料基本力学参数

Table 2 Mechanical parameters of model materials

参数	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 ϕ ($^\circ$)
数值	16.33	1.865	5.421	37.9

在浇筑柱状节理岩体试件时, 首先在塑料盆中按水灰比为 0.4 配置白水泥浆, 并保证盆中浆液深度在 11 cm 左右, 再将图 3 所示 3D 打印柱状节理网络实体模型慢慢浸没在盆中, 在浸没过程中轻微摇动模具以保证水泥浆液均匀流入模具, 当白水泥浆均匀充满整个模具后, 用内径为 5 cm、净高为 10 cm 的圆柱形有机玻璃套筒将模具套入其中, 待白水泥浆达到初凝后取出常温养护 2 h 拆除套筒, 得到如图 5 (a) 所示包

含柱状节理网络模型的柱状节理岩体试件; 待模型材料干燥后将充填在柱状节理网络模型空隙中的柱体取出, 并采用 502 胶水点黏结的方式沿柱体侧面将相邻柱体逐一黏结在一起, 得到如图 5 (b) 所示模拟柱状节理岩体试件。由图可知: 采用上述方法制备的模拟柱状节理岩体试件存在部分柱体间缝隙较大等现象, 这主要是由于白水泥浆固化过程中的水化热导致部分长径比较大的柱体沿长度方向发生翘曲, 引起侧面不平, 进而导致相邻柱体在黏结时不能完全吻合而造成的。为了保证柱体柱面间的紧密吻合, 在后续研究中将考虑采用水溶性材料打印柱状节理网络 3D 实体模型, 然后浇筑一次成型, 避免了柱体拆模再黏结等过程。

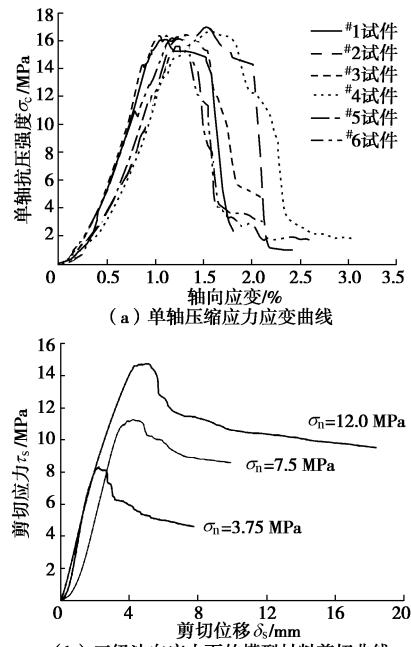


图 4 模型材料典型试验曲线

Fig. 4 Typical experimental curves of model materials



(a) 未脱模柱体

(b) 黏结好的试件

图 5 模拟柱状节理岩体试件

Fig. 5 Artificial columnar jointed rock mass specimens

3 模拟柱状节理岩体单轴压缩特性

将制备好的具有不同倾角模拟柱状节理岩体试件保持常温养护 28 d, 然后在村镇建设防灾减灾四川省高等学校工程研究中心 YZW50 岩石剪切试验系统上进行单轴压缩试验, 典型的单轴压缩应力 - 应变曲线

如图 6 所示, 根据应力 - 应变曲线可以得到不同倾角模拟柱状节理岩体试件单轴抗压强度 σ_r 。

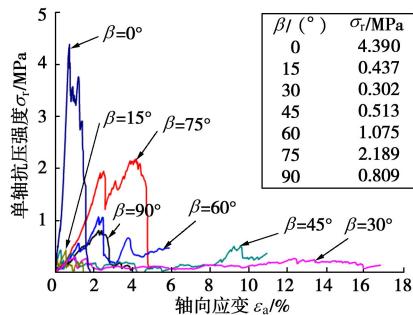


图 6 模拟柱状节理岩体试件典型单轴压缩试验曲线

Fig. 6 Typical stress-strain curves of artificial columnar jointed rock mass specimens

同文献[8]一样, 将模拟柱状节理岩体试件单轴抗压强度以模型材料单轴抗压强度归一化处理, 得到模拟柱状节理岩体试件的归一化单轴抗压强度, 其随柱体倾角的变化规律如图 7 所示。

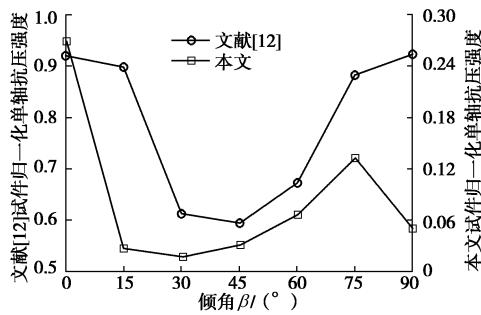


图 7 模拟柱状节理岩体试件单轴抗压强度随倾角变化规律
Fig. 7 Uniaxial compression strength vs. dip angle β of artificial columnar jointed rock mass specimens

由图可知: 本文模拟柱状节理岩体试件单轴抗压强度随柱体倾角的变化趋势与文献[8]所得结论比较一致, σ_r 均在 $\beta=0^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 时分别达到最大值和最小值, 但由于柱体间的黏结强度比文献[8]中低得多, 因此本文模拟柱状节理岩体归一化单轴抗压强度也低得多, 能够较好地反映节理对岩体强度的弱化效应。另外, 从图 7 所示应力 - 应变曲线可知: 在倾角 $\beta=30^\circ$, 45° 和 60° 时, 模拟柱状节理岩体的力学响应表现出一定的理想塑性特征, 这主要是由于试件在达到峰值强度后沿节理面发生剪切滑移引起的 (如图 8 (c) ~ (e) 所示); 而在其他倾角情况下, 模拟柱状节理岩体表现出明显的脆性破坏特征, 达到峰值强度后应力 - 应变曲线迅速衰减。此外, 从图 8 所示模拟柱状节理岩体试件破坏特征可知: 在单轴压缩条件下, 模拟柱状节理岩体试件的主要破坏模式是沿柱状节理的剪切滑移破坏, 并伴随明显的侧向扩容现象, 这与部分节理岩体模型试验结果是一致的, 说明

在此所制备的模拟柱状节理岩体试件在很大程度上能够基本满足室内试验的要求。



图 8 模拟柱状节理岩体试件典型破坏特征

Fig. 8 Failure characteristics of artificial columnar jointed rock mass specimens

4 结语

采用 3D 打印技术制备圆柱形柱状节理网络模型, 并以此为模具, 采用白水泥浆为模型材料进行浇筑, 再经过拆模、黏结等程序制备具有不同倾角的模拟柱状节理岩体试件, 通过对试件进行单轴抗压强度试验, 分析模拟柱状节理岩体试件的强度、变形和破坏特征, 初步验证上述基于 3D 打印技术的制样方法能够较好地考虑柱状节理岩体的结构特性, 反映柱状节理对岩体强度的弱化效应, 基本满足柱状节理岩体室内试验的要求。

参考文献:

- [1] 宁宇, 徐卫亚, 郑文棠, 等. 柱状节理岩体随机模拟及其表征单元尺寸研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1202 - 1208. (NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang, et al. Study of random simulation of columnar jointed rock mass and its representative elementary volume scale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1202 - 1208. (in Chinese))
- [2] 闫东旭, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体宏观等效特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))

- [3] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体各向异性特性及尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(7): 1405 - 1414. (ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, CAI Yong-chang. Research on anisotropic characteristics and size effect of columnar jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(7): 1405 - 1414. (in Chinese))
- [4] 狄圣杰, 徐卫亚, 王伟, 等. 柱状节理岩体原位变形试验力学浅析与模拟[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 501 - 508. (DI Sheng-jie, XU Wei-ya, WANG Wei, et al. Mechanical analysis and simulation of in-situ deformation test of columnar jointed rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 501 - 508. (in Chinese))
- [5] 郑文棠, 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 Wen-tang, XU Wei-ya, WU Ai-qing, et al. Numerical in situ testing of excavation experimental cavity on columnar joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 253 - 257. (in Chinese))
- [6] 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 Wei-ya, ZHENG Wen-tang, 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))
- [7] 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**(增刊 1): 163 - 171. (LIU Hai-ning, WANG Jun-mei, WANG Si-jing. Experimental research of columnar jointed basalt with true triaxial apparatus at Baihetan Hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 163 - 171. (in Chinese))
- [8] 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与强度各向异性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 957 - 963. (XIAO Wei-min, DENG Rong-gui, FU Xiao-min, et al. Model studies on deformation and strength anisotropy of columnar jointed rock masses under uniaxial compression condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 957 - 963. (in Chinese))
- [9] 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 and Rock Engineering, 2017, **50**(7): 1919 - 1931.
- [10] JIN Chang-yu, LI Shen-gang, LIU Jian-po. Anisotropic mechanical behaviors of columnar jointed basalt under compression[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016.
- [11] CAMPBELL T, IVANOVA O. 3D printing of multifunctional nano-composites[J]. Nano Today, 2013, **8**(2): 119 - 120.
- [12] JU Y, XIE H P, ZHENG Z M, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, **59**(36): 5354 - 5365.
- [13] LIN Zhi-nan, XU Wei-ya, WANG Huan-ling, et al. Anisotropic characteristics of irregular columnar-jointed rock mass based on physical model test[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, **21**(5): 1728 - 1734.
- [14] 王培涛, 刘雨, 章亮, 等. 基于 3D 打印技术的裂隙岩体单轴压缩特性试验初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(2): 364 - 373. (WANG Pei-tao, LIU Yu, ZHANG Liang, et al. Preliminary experimental study on uniaxial compressive properties of 3D printed fractured rock models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(2): 364 - 373. (in Chinese))
- [15] JIANG C, ZHAO G F. A preliminary study of 3D printing on rock mechanics[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, **48**(3): 1041 - 1050.
- [16] 王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 3D 打印材料应用和研究现状[J]. 航空材料学报, 2016, **36**(4): 89 - 98. (WANG Yan-qing, SHEN Jing-xing, WU Hai-quan. Application and research status of alternative materials for 3D-printing technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, **36**(4): 89 - 98. (in Chinese))
- [17] IDDINGS J P. The columnar structure in the igneous rock on Grange Mountain, New Jersey[J]. American Journal of Science, 1886, **131**(185): 321 - 330.

(本文责编 胡海霞)