

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.091



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于3D打印模型试验的含结构面 异形隧洞的变形破坏研究

孟凡斐¹, 王酉钰², 李之建¹, 马国伟¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:隧洞交叉段稳定性受围岩结构面影响较大,物理模型试验是研究结构面影响机制的有效手段。针对模型难以制备的技术瓶颈,采用3D打印增减材技术制备含非贯通结构面的异形隧洞模型。基于数字图像相关技术与内窥摄像头观测模型在单轴加载下的破坏过程,评估打印路径对隧洞模型破坏模式的影响,并研究结构面倾角对异形隧洞破坏机制的影响规律。结果表明,3D打印路径对隧洞模型破坏模式的影响较小,采用3D打印增减材方法制备结构面起控制作用的隧洞模型具有有效性及可行性;含软弱填充物的非贯通结构面导致围岩应力向两侧岩柱卸荷,客观上保护了洞室,提高了隧洞的安全性;当结构面尖端距隧洞较远时,模型表现为贯通裂纹造成的岩柱失稳破坏,当结构面尖端位于隧洞附近时,模型表现为洞顶块体分离破坏;隧洞交叉段扩挖后形成的异形隧洞与常规隧洞的破坏机制不同,其拱结构效应明显减弱。

关键词:异形隧洞;结构面;模型试验;3D打印;数字图像相关技术

中图分类号: TU458; U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0036-09

Model testing research on deformation and failure of special section tunnel with structural plane based on 3D printing technique

MENG Fanfei¹, WANG Youyu², LI Zhijian¹, MA Guowei¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The stability of intersection part of tunnels is greatly affected by structural planes of surrounding rockmass. Physical model testing is an effective method to study the failure mechanism of structural planes. This paper presented special section tunnel models with discontinuities by 3D printing technique to overcome the difficulty of model preparation. The failure process of the model under uniaxial loading is observed based on digital image correlation technique and endoscope. The influence of printing path on the failure mode of tunnel model is evaluated, and the influence of the dip angle of structural planes on the

收稿日期: 2021-01-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51627812、U1965204)

作者简介: 孟凡斐(1994-),男,主要从事地下隧洞模型试验研究, E-mail: mengfanfeifrost@163.com.

王酉钰(通信作者),男,博士, E-mail: wangyuucqu@163.com.

Received: 2021-01-26

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51627812, U1965204)

Author brief: MENG Fanfei (1994-), main research interest: model test of underground tunnel, E-mail: mengfanfeifrost@163.com.

WANG Youyu (corresponding author), PhD, E-mail: wangyuucqu@163.com.

failure mechanism of special section tunnel is studied. Results show that printing path has marginal effect on the failure mode of the tunnel model, and it is effective and feasible to prepare the tunnel model that its failure mode controlled by structural planes using 3D printing. The non-through structural plane with weak filler transfer the surrounding rock stress to the rock pillars on both sides, which protects the surrounding rock from over-loading and improves the stability of the tunnel. When the tip of the structural plane is far away from the tunnel, the model shows the failure of the rock column caused by the through cracks. When the tip of the structural plane is near the tunnel, the model shows the separation failure of the roof block. The failure mechanism of the special section tunnel formed by the expanding excavation of the tunnel cross section is different from that of the conventional tunnel, and its arch structure effect is obviously weakened.

Keywords: special section tunnel; structural plane; model test; 3D printing; digital image correlation (DIC) technique

非贯通节理^[1-2]、断续延伸的软弱夹层^[3]等非贯通结构面的产状、位置和填充情况复杂难测^[4],常诱发塌方、块体失稳、岩爆等严重灾害,在隧洞工程领域受到广泛关注^[5]。研究非贯通结构面对围岩破坏机制的影响规律对提高岩体工程安全性具有重要意义。Zhou 等^[6]分析了锦屏二级水电站建设过程中小规模结构面引发的岩爆现象,根据致灾机理的不同将其划分为断层滑移型岩爆、剪切破裂型岩爆和屈曲型岩爆。Pan 等^[7]利用数字图像技术(DIC)和声发射系统观测含非贯通结构面隧洞模型的破坏过程,试验结果表明,填充物可以减轻结构面引发的灾害。Tang 等^[8]利用数字图像技术监测动态扰动下含有不同小断层的隧洞试件表面的应变场,研究表明小断层对隧洞稳定性的影响取决于断层到隧洞的距离以及断层倾角。Manouchehrian 等^[9]利用 Abaqus 模拟了静力和动力荷载作用下非贯通结构面在洞周引发的岩体变形破坏,研究结果表明,随着结构面长度的增加,隧洞的失稳破坏更为严重。

学者们对含非贯通结构面隧洞的失稳机制进行了大量研究,取得了丰富的成果。目前,该方面的研究主要集中在隧洞直线段。实际上,各类地下工程中还存在着跨度骤增、断面形式复杂的隧洞交叉段。含非贯通结构面隧洞交叉段的破坏机制更加复杂和重要,模型试验是研究此类问题的有效方法。3D 打印技术在制作复杂模型方面具有显著优势,在利用 3D 打印模型研究岩体问题时,模型成型方法有两类:一类是直接打印复杂的岩体模型,如 Song 等^[10]、Jiang 等^[11]利用石膏粉和 PLA 作为打印材料制作的隧道模型和裂隙模型,打印材料的力学性质

与岩石的力学性质有较大差距;另一类是打印模具后浇筑材料成型,如苏海健等^[12]制作的内置粗糙节理类岩石试样、王本鑫等^[13]制作的粗糙交叉节理类岩石试样,成型后打印模具难以取出,无法替换填充材料。与上述成型方法相比,增减材 3D 打印技术利用固定在减材头上的光滑钢针刻划制作结构面和隧洞,结构面和隧洞临空面平整,可填充不同种类的材料;所用材料的力学性质接近砂岩,可用于模拟岩体的脆性破坏。

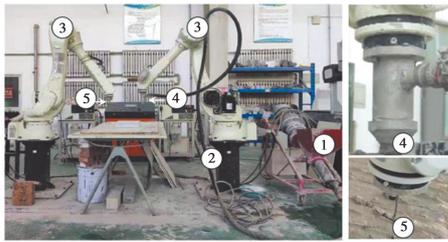
笔者采用 3D 打印水泥基材料增减材技术制备含非贯通结构面的异形隧洞模型,利用 DIC 观测模型在单轴加载下的破坏过程,评估打印路径对隧洞模型破坏模式的影响,并研究结构面倾角对异形隧洞破坏机制的影响规律,为隧洞围岩稳定性评估提供试验数据及理论参考。

1 试验方案

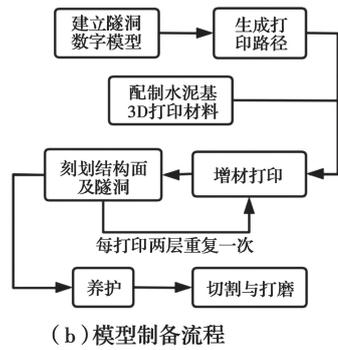
1.1 模型制备方法

基于双机械臂自主研发了水泥基材料的增减材 3D 打印系统,如图 1(a)所示。该系统由水泥基材料的挤出型增材单元和减材切割单元组成,包括两台机械臂,一台机械臂上装有打印头,用于水泥基材料的挤出与堆积建造(混凝土 3D 打印),以制备实体模型;另一台机械臂上装有减材头,用于切割去除已打印的实体结构,以制备裂隙及空洞。模型的制备流程如图 1(b)所示,在制备过程中,每增材两层进行一次减材工作(图 1(c)),最后对制备的模型进行养护及切割打磨以备试验。

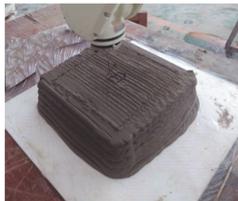
3D 打印水泥基材料由石英砂、复合硅酸盐水



注：①混凝土泵 ②泵送管 ③机械臂 ④增材头 ⑤减材头
(a) 双机械臂式水泥基材料增减材系统



(b) 模型制备流程



(c) 模型制备过程

图 1 隧洞模型制备方法

Fig. 1 Fabrication method of tunnel models

泥、工业固废粉末、水和外加剂配制而成，材料质量配合比(总质量为 1)为：复合硅酸盐水泥 35%、石英砂 48%、粉煤灰 2%、硅灰 3%、减水剂 0.2%、水 11.8%。参照 Ma 等^[14]的测试方法，测得材料的扩展直径为 177 mm。经试验测试，材料的力学指标如表 1 所示，与砂岩相近，且表现出类似真实岩体的脆性破坏特性^[15]，适合模拟真实砂岩材料的力学特性。

表 1 3D 打印水泥基材料与砂岩力学参数对比

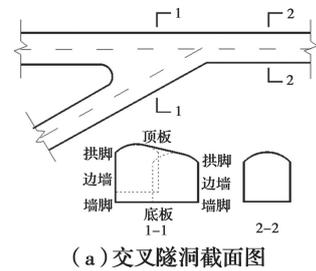
Table 1 Comparison of mechanical parameters between 3D printed cementitious material and sand rock

材料类别	密度/ (g · cm ⁻³)	弹性模 量/GPa	抗压强 度/MPa	抗拉强 度/MPa	泊松 比
砂岩	2.3	23.0	32.0	3.80	0.29
3D 打印材料	2.3	28.3	34.3	2.84	0.25

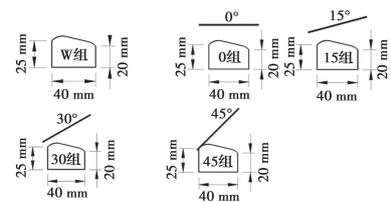
1.2 模型设计

选取积石峡水电站导流洞和泄洪洞交叉段中部

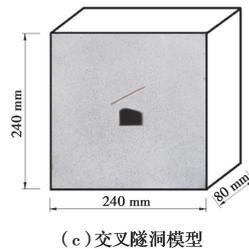
的异形断面为研究对象，隧洞跨度为 28 m，高约 22 m。隧洞的初始地应力主要为自重应力，围岩以中细砂岩和砾岩为主。顶板失稳是常见的隧洞失稳现象^[16]，而此隧洞交叉段顶部岩体中有多类非贯通结构面，因此，有必要对含结构面隧洞的稳定性进行研究。将结构面走向简化为与导流洞走向一致，此时隧洞可简化为图 2(c)所示的平面应变模型；在此基础上，将洞顶结构面概化为图 2(b)所示的 4 类模型，分别代表水平未揭露结构面(0 组)、倾斜未揭露结构面(15 组、30 组)和倾斜揭露结构面(45 组)。此外，设置了不含结构面的 w 组作为对照组。



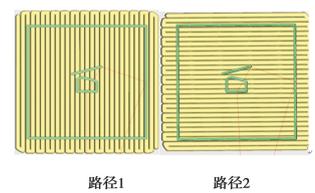
(a) 交叉隧洞截面图



(b) 含结构面交叉隧洞截面设计



(c) 交叉隧洞模型



(d) 打印路径

图 2 交叉隧洞模型设计

Fig. 2 Model design of intersection tunnel

制备 5 组隧洞模型，以探究洞顶结构面倾角对交叉隧洞稳定性的影响。如表 2 所示，不含结构面的为 w 组，按照结构面倾角不同，模型分为 0 组、15 组、30 组、45 组。模型尺寸如图 2(b)、(c)所示，非贯通结构面长度为 60 mm，厚度为 1.5 mm，填充物为黄土。为研究打印路径对模型破坏模式的影响，每组采用两种打印路径进行制备，如图 2(d)所示。经测量，隧洞洞跨、最大洞高、结构面长度、结构面厚度的平均打印误差分别为 1.4、1.1、1.2、0.04 mm，最大打印误差小于 5%。

表 2 模型设计方案
Table 2 Model design

组类	洞顶结构面倾角/(°)
w 组	无
0 组	0
15 组	15
30 组	30
45 组	45

1.3 测试方法

如图 3 所示,采用先开洞后加载的方法,通过在模型顶部不断加载来模拟隧洞开挖后围岩应力集中的过程。由于隧洞围岩强度较高,围岩变形主要源于地应力而非围岩所受重力,因此,可不考虑重力加速度对围岩变形的影响。相应地,在试验中,模型材料的力学性质接近砂岩,在加载过程中,模型所受的重力荷载远低于模型初裂和失稳破坏时的荷载,重力加速度对围岩变形的影响非常小,这与工程原型一致。

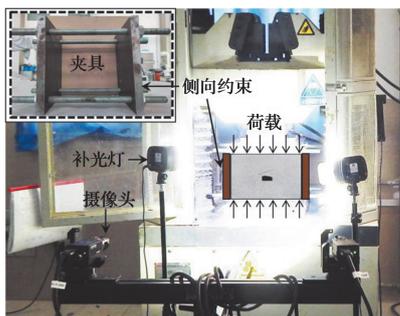


图 3 测试装置

Fig. 3 Testing setup

试验开始前,在模型顶部、底部和两侧均涂抹一层凡士林,垫设钢板并安装夹具,采用量程为 1 000 kN 的 WAW-1000 型电液伺服试验机以 0.1 mm/min 的速度对试件进行竖向加载,设计 2 cm 厚的钢夹具限制模型的侧向变形,当荷载骤降至峰值荷载的 80% 以下后停止试验,即以围岩承载力骤降作为隧洞失稳破坏的标志。

围岩变形场是分析隧洞模型失稳过程的重要依据^[17-18],采用数字图像相关(DIC)技术观察隧洞模型在竖向荷载下的破坏过程,将试件表面磨平,然后在模型正面依次喷涂白色底漆和黑色斑点来制作散斑场。在试件前方放置两个高精度数码相机以捕获试件表面的图像,并在试件侧面放置两个补光灯,以在试件表面产生均匀强度的光。使用校准板对试验

进行位置校准,试验时,首先采集若干参照图像,然后进行加载,在加载过程中,每 2 s 采集一张图像。通过 Vic-3D 软件比较变形图像与初始参照图像的灰度分布,获得研究区域的位移场和应变场。同时,采用内窥镜观测隧洞内部损伤破坏。为获得完整的 DIC 变形图像,模型前后面不施加约束。

2 3D 打印路径对破坏模式的影响

采用水泥基材料的增减材 3D 打印系统制备物理模型,采用增材 3D 打印方法制备模型实体,采用减材系统制备隧洞及结构面。3D 打印方法采用层层堆积的建造方式,打印条间及层间存在界面问题,会引起实体模型的各向异性特征,进而影响结构面尖端、断面突变处等应力集中区域的变形过程。为评估 3D 打印方法对带结构面隧洞模型失稳模式的影响程度,采用如图 2(d)所示的两种打印路径进行试件制备。前期研究表明,通过调整材料流动性和打印条间搭接宽度(喷头直径的 30%)可有效提高实体模型的各向同性,降低弱面对模型破坏模式的影响^[19]。利用此方法打印边长为 8 cm 的立方体,经 CT 扫描试验,模型内部未发现明显的层间弱面现象(图 4)。采用同样方法制备异形隧洞模型。

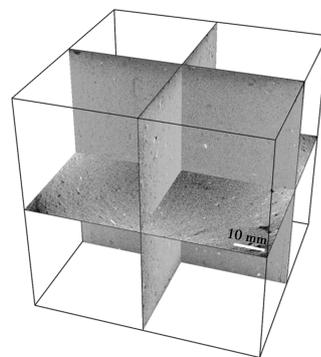


图 4 CT 扫描切片图像

Fig. 4 CT scanning slice image

2.1 裂纹扩展

图 5 为模型加载过程中的水平位移场云图。岩体中水平位移发生突变代表裂纹的产生,根据水平位移场中色块分界线的收束表征裂缝的发展情况^[20]。如图 5(b)所示,0-1 隧洞围岩中的裂缝几乎同时萌生于结构面上侧和底板中部,随着荷载的增加,结构面尖端出现裂缝并逐步向下扩展,直至丧失承载力。虽然 0-2 隧洞的打印路径与 0-1 模型不同,但模型中贯通裂缝的位置和长度基本一致。如图 5(a)、(c)、(d)、(e)所示,同组隧洞中裂缝的萌生位

置、扩展方向和开展顺序基本相同。

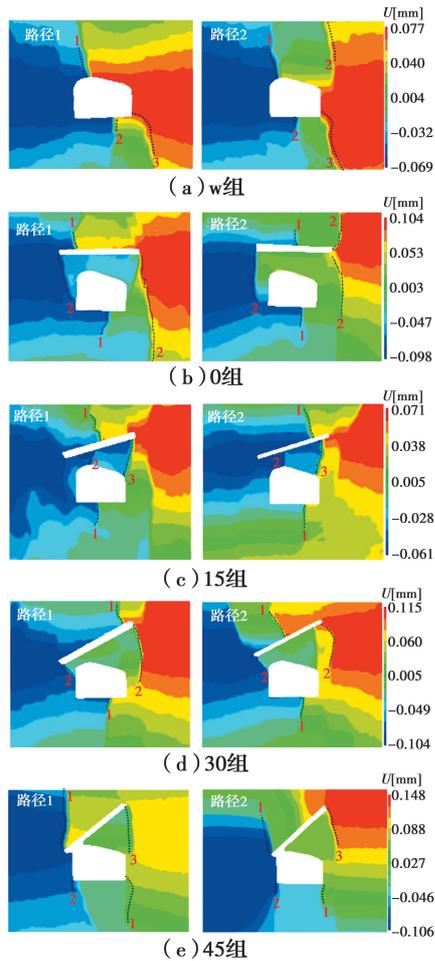
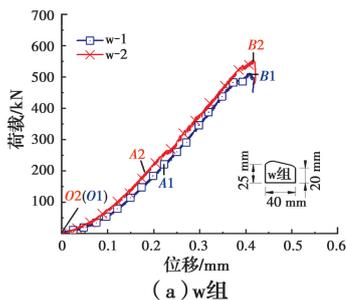


图 5 模型的水平位移场

Fig. 5 Horizontal displacement field of models

2.2 荷载-位移曲线

图 6 为模型的荷载-位移曲线。由图可知,各隧洞模型的曲线趋势基本一致,分为压密段、线弹性段和开裂段,其中压密段和线弹性段可统称为弹性段(OA),开裂段(AB)为围岩初裂至变形破坏的过程。以 0 组隧洞为例,两个试件的峰值位移相差 7.6%,两条曲线非常接近。由图 6 可知,各组隧洞的荷载-位移曲线基本一致,且由图 9 可知,同组隧洞两个试件的极限荷载最大相差 10.3%。这说明,3D 打印路径对隧洞模型破坏模式的影响较小,不会改变其



(a) w组

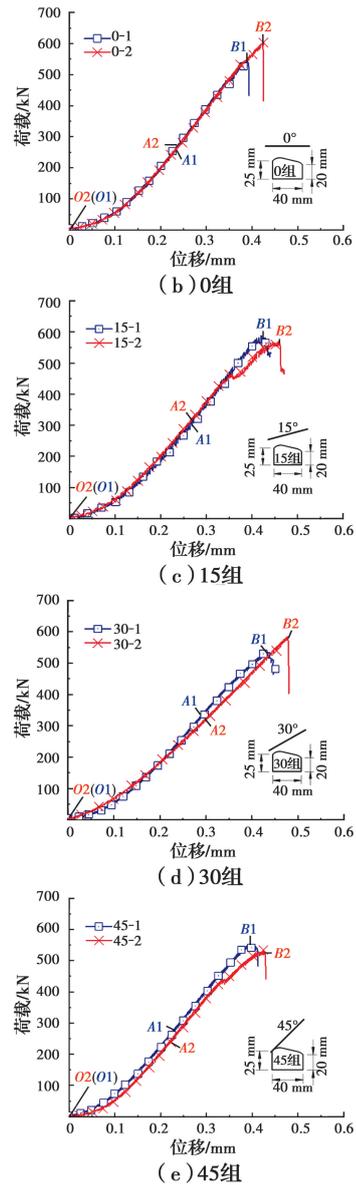


图 6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

裂纹的扩展模式,采用研发的增减材系统制备的含结构面隧洞物理模型进行隧洞破坏机理的研究具有有效性及可行性。

3 结构面倾角对破坏模式的影响

3.1 位移场分析

3.1.1 围岩破裂过程 如图 7(a)所示,对于无结构面隧洞 w 组,顶板中部偏左处首先开裂,随后底板中部距右拱脚约 1/3 洞跨处有细小裂纹出现并竖直向下扩展,分别为顶板沉降、底鼓导致的受拉破坏。继续加载,右墙脚处有裂纹萌生。最终,左拱腰处岩体突然脱离(图 8)。

当结构面倾角为 0°时,如图 7(b)所示,首先在

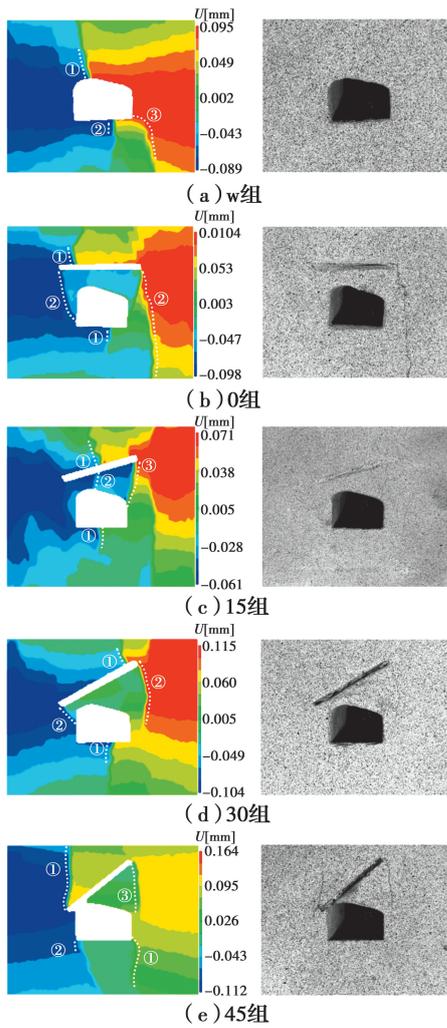


图 7 隧洞相对位移场及围岩破裂过程

Fig. 7 Relative displacement field of tunnel and failure process of surrounding rock



图 8 不含结构面隧洞模型的落块现象

Fig. 8 Falling rocks in tunnel model without structural plane
 结构面上侧和底板中部出现裂纹,底鼓裂纹距右墙脚约 1/3 洞跨;随着荷载的增加,结构面两尖端出现向下延伸的裂纹;进一步增加荷载,左右两侧的岩柱突然断开,结构面右尖端引发的裂纹贯穿至下边界。

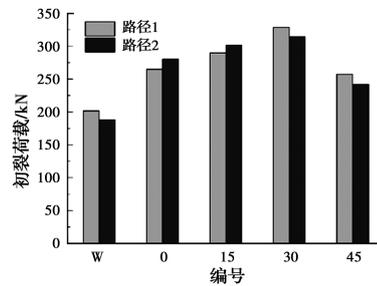
当结构面倾角为 15°时,如图 7(c)所示,首先在结构面上侧和底板中部出现裂纹,底鼓裂纹距右拱脚约 1/2 洞跨。随着加载的进行,拱顶中部出现一

条竖向裂纹。最终,结构面右尖端和隧洞右拱腰之间的岩体突然断开,顶板右侧的岩体被切分为脱离块体。

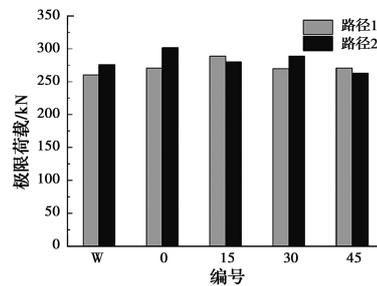
当结构面倾角为 30°时,如图 7(d)所示,首先在结构面上侧和底板中部出现裂纹,底鼓裂纹距右拱脚约 1/3 洞跨。随着加载的进行,结构面两端萌生裂纹并向下扩展,左侧裂纹贯通左边墙中部,右侧裂纹向下弧形扩展。最终,右侧裂纹尖端和右侧拱脚之间的岩体被瞬间剪断,顶板被分割成横跨整个异形断面的巨大块体。

当结构面倾角为 45°时,如图 7(e)所示,在结构面尖端和隧洞右墙脚同时出现初始裂纹。随着加载进行,左墙脚和结构面右尖端出现新裂纹,最终,隧洞顶部的三角形悬挑岩体从围岩中瞬间脱离。

由此可见,不含结构面隧洞产生贯通隧洞的裂纹,0°倾角结构面的尖端位于围岩较深处,模型的破坏主要由岩柱失稳造成,洞周围岩较完整;而倾角为 15°、30°和 45°的结构面的尖端靠近临空面,失稳时隧洞顶部出现不同规模的脱离块体。结合特征荷载数据(图 9)可知,非贯通结构面导致围岩应力向两侧岩柱卸荷,阻碍或延缓了顶板裂纹的萌生及扩展,保护了围岩,显著提高了隧洞的初裂荷载。



(a) 初裂荷载



(b) 极限荷载

图 9 特征荷载

Fig. 9 Characteristic loads

直墙拱形洞室的拱结构导致其顶板比底板更难出现受拉破坏,然而不含结构面的异形隧洞(w组)的初始裂纹却位于顶板中部偏左的位置,这表明直墙拱形隧洞交叉、扩挖后其围岩中的拱结构效应明

显减弱,异形隧洞顶板的稳定性降低。

3.1.2 顶底板收敛变形 提取距左墙脚 0.25、0.5、0.75 倍洞跨处顶底板收敛位移量,绘制收敛位移随时间的变化曲线,如图 10 所示。由图可知,w 组隧洞顶底板的最大相对位移小于平均洞高的 1%,且远大于 0 组、15 组和 30 组隧洞的顶底板相对位移。45 组隧洞的结构面与隧洞相切,在加载初期,其相对位移量小于 w 组,之后,随着底鼓变形和顶部岩体的沉降迅速增加至 0.29 mm,比 w 组隧洞最大位移量高出 36%。

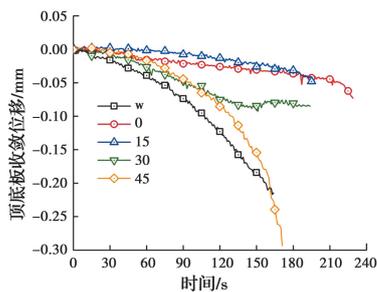


图 10 顶板和底板的收敛位移

Fig. 10 Convergence displacement of roof and floor

对比各组隧洞顶底板收敛变形可知,w 组和 45 组隧洞的收敛位移明显超过 0 组、15 组和 30 组。顶板和底板的收敛位移为顶板沉降量和底板底鼓量之和,试验在洞顶设置了结构面,因此,各组隧洞收敛位移的差别主要源于顶板沉降量的变化。w 组不含洞顶结构面,在竖向荷载作用下,顶板有较大的变形。当结构面倾角为 0° 、 15° 、 30° 时,结构面未揭露,在竖向荷载下,含软弱填充物的结构面刚度较低,竖向荷载主要由两侧岩柱承担,结构面下盘岩体处于较低的应力状态,因此,洞顶沉降量增长缓慢,收敛位移较小。当倾角为 45° 时,结构面在左拱脚处露头,形成图 11(e) 所示的顶部悬挑岩体,在加载初期,悬挑岩体应力状态较低,因而顶板沉降量增长缓慢,顶板和底板的收敛位移与 0 组、15 组和 30 组较接近;随着结构面右端裂缝向下扩展,裂缝上粗下细,说明悬挑岩体逆时针刚体转动,这导致加载后期顶板沉降量显著增加,顶板和底板的收敛位移与 w 组接近。

结合极限荷载可知,当非贯通结构面未揭露时,结构面改变了应力传递模式,将荷载传递给两侧的岩柱,保护了顶板,提高了顶部围岩的稳定性;当非贯通结构面揭露时,结构面将丧失对洞周岩体的保护作用(45 组)。

3.2 应变分析

3.2.1 弹性阶段(OA 段) 隧洞模型的主应变场如图 11 所示,由图 11 可知,不含结构面隧洞的应变集中区出现在顶板中部偏左处、底板中部偏右处,非对称的断面形式导致隧洞变形偏移;当结构面倾角为 0° 、 15° 和 30° 时,隧洞的应变集中在结构面尖端、结构面上侧中部、底板中部;当结构面倾角为 45° 时,围岩的应变集中区出现在右侧墙脚处。由应变集中区的位置和形状可知,初始裂纹均为拉裂纹。

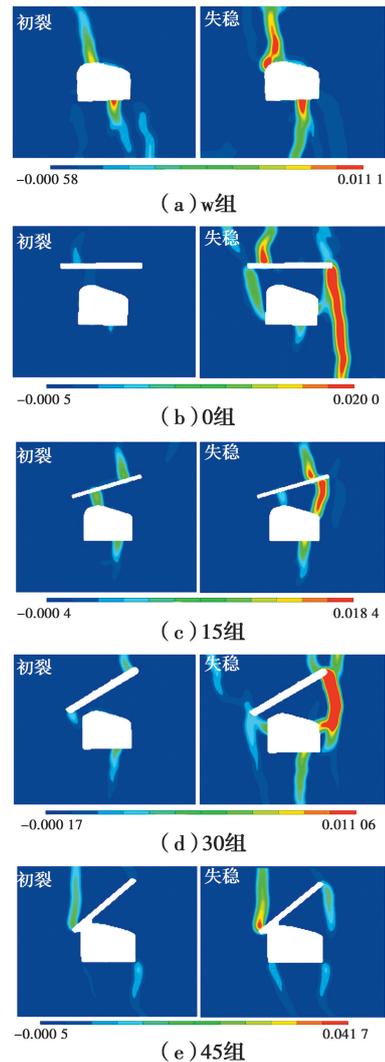


图 11 隧洞模型的主应变场

Fig. 11 Principal strain field of the tunnel models

3.2.2 破裂阶段(AB 段) 初裂后,各组隧洞模型的失稳过程有显著差异。w 组隧洞围岩中没有新的应变集中区出现,最终拱顶应变集中区的底端扭向左侧拱脚,此时左侧拱腰处出现落块现象;0 组隧洞初裂后,应变集中区域自结构面尖端向上下延伸,最终左侧应变集中区突然延伸至边墙,右侧应变集中区突然延伸至模型下边界;15 组隧洞初裂后,顶板

中部率先出现应变集中区域,最后,结构面右端和右侧拱脚之间突现应变集中区,裂隙开展并导致模型失稳;30组隧洞初裂后,结构面左端的应变集中区延伸至左边墙中部,同时,结构面右端出现新的应变集中区域并向下方开展,当向下延伸至右拱脚附近时,结构面右端的应变集中区域突然水平延伸至右侧拱脚;45组隧洞初裂后,结构面两尖端、两拱脚的带状应变集中区不断扩展,失稳时结构面右端的应变集中区骤然延伸至右侧拱脚附近。

4 结论

1)3D打印路径对隧洞模型破坏模式的影响较小,采用增减材系统制备结构面起主要控制作用的裂隙围岩隧洞模型并研究隧洞破坏机理具有有效性及可行性。

2)含软弱填充物的非贯通结构面导致围岩应力向两侧岩柱卸荷,客观上保护了围岩,提高了隧洞的稳定性。

3)0°倾角结构面的尖端距隧洞较远,模型的破坏模式为岩柱失稳破坏,洞周围岩较完整;倾角为15°、30°和45°的结构面的尖端位于隧洞附近,裂缝由结构面尖端延展至临空面,形成脱离块体,模型表现为块体分离破坏。

4)直墙拱形隧洞交叉、扩挖后,其围岩中的拱结构效应明显减弱,与对称隧洞断面在围岩应力分布和破坏模式上存在明显的差异性。

参考文献:

- [1] 葛云峰,唐辉明,王亮清,等. 大数量非贯通节理岩体离散元数值模拟实现方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(Sup2): 3760-3773.
GE Y F, TANG H M, WANG L Q, et al. Realization method of discrete element numerical simulation of large number of non-persistent jointed rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup2): 3760-3773. (in Chinese)
- [2] 赵延林,彭青阳,万文,等. 直剪作用下不共面断续节理岩桥破坏试验与数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(1): 59-67.
ZHAO Y L, PENG Q Y, WAN W, et al. Experimental and numerical analysis on rupture of rock bridge with non-coplanar intermittent joints under direct shear [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2014, 36(1): 59-67. (in Chinese)
- [3] 黄锋,朱合华,徐前卫. 含软弱夹层隧道围岩松动破坏模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (Sup1): 2915-2924.
HUANG F, ZHU H H, XU Q W. Model test and analysis about loose failure of tunnel surrounding rock mass containing weak interlayer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (Sup1): 2915-2924. (in Chinese)
- [4] 崔臻,冷先伦,朱泽奇,等. 非贯通随机节理岩体的结构效应对地下洞室地震响应的影响[J]. 岩土力学, 2014, 35(Sup2): 645-652.
CUI Z, LENG X L, ZHU Z Q, et al. Structure effects of random joint network rock mass on seismic response of underground caverns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup2): 645-652. (in Chinese)
- [5] 向天兵,冯夏庭,江权,等. 大型洞室群围岩破坏模式的动态识别与调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 871-883.
XIANG T B, FENG X T, JIANG Q, et al. Failure mode dynamic recognition and control for surrounding rock of large-scale cavern group [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 871-883. (in Chinese)
- [6] ZHOU H, MENG F Z, ZHANG C Q, et al. Analysis of rockburst mechanisms induced by structural planes in deep tunnels [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1435-1451.
- [7] PAN P Z, MIAO S T, WU Z H, et al. Laboratory observation of spalling process induced by tangential stress concentration in hard rock tunnel [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20 (3): 04020011.
- [8] TANG Z L, YAO W, ZHANG J C, et al. Experimental evaluation of PMMA simulated tunnel stability under dynamic disturbance using digital image correlation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103039.
- [9] MANOUCHEHRIAN A, CAI M. Analysis of rockburst in tunnels subjected to static and dynamic loads [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(6): 1031-1040.
- [10] SONG L B, JIANG Q, SHI Y E, et al. Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: Study of tunnels [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(8): 2617-2637.
- [11] JIANG Q, LIU X P, YAN F, et al. Failure performance of 3DP physical twin-tunnel model and corresponding safety factor evaluation [J]. Rock

- Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(1): 109-128.
- [12] 苏海健, 郭庆振, 靖洪文, 等. 基于3D打印的内置粗糙节理岩体力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 840-846.
SU H J, GUO Q Z, JING H W, et al. Study on the mechanical properties of rock mass containing an interior rough joint based on the 3D printing technology [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(4): 840-846. (in Chinese)
- [13] 王本鑫, 金爱兵, 孙浩, 等. 基于DIC的含不同角度3D打印粗糙交叉节理试样破裂机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 439-450, 461.
WANG B X, JIN A B, SUN H, et al. Study on fracture mechanism of specimens with 3D printed rough cross joints at different angles based on DIC [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 439-450, 461. (in Chinese)
- [14] MA G W, LI Z J, WANG L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 613-627.
- [15] WANG Y Y, WANG L, MENG F F, et al. Strength test of 3D printed artificial rock mass with pre-existing fracture [J]. Underground Space, 2021, 6: 492-505.
- [16] XIANG Y Z, LIU H L, ZHANG W G, et al. Application of transparent soil model test and DEM simulation in study of tunnel failure mechanism [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 178-184.
- [17] ZHANG W G, GU X, ZHONG W H, et al. Review of transparent soil model testing technique for underground construction: Ground visualization and result digitalization [J/OL]. Underground Space. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.05.003>
- [18] 刘汉龙, 钟海怡, 顾鑫, 等. 平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1): 1-10.
LIU H L, ZHONG H Y, GU X, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnel excavation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 1-10.
- [19] 田泽皓, 王里, 张心颖, 等. 3D打印混凝土层间弱面的形成机制与改善方法[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7): 2052-2058.
TIAN Z H, WANG L, ZHANG X Y, et al. Formation mechanism and improvement solutions for weak interlayer surfaces of 3D printing concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7): 2052-2058. (in Chinese)
- [20] 李二强, 冯吉利, 朱天宇, 等. 基于数字图像相关方法的层状板岩I型断裂特性研究[J/OL]. 采矿与安全工程学报. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2020.0375>.
LI E Q, FENG J L, ZHU T Y, et al. Investigation on mode I fracture characteristics of layered slate by digital image correlation [J/OL]. Journal of Mining and Safety Engineering. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2020.0375>. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)