

基于挤出 3D 打印层状隧洞超载破坏力学特性及数值模拟研究

荣耀^{1,2}, 刘强^{1,2}, 付康², 张承客¹, 俞俊平¹, 朱利晴¹, 吴江鹏¹, 孙洋³

(1. 江西省交通科学研究所公路桥梁与隧道结构江西省重点实验室, 江西 南昌 330200; 2. 华东交通大学土木建筑学院山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 江西交投咨询集团有限公司, 江西 南昌 330038)

摘要: 层状隧洞开挖过程中, 层理面、隧道轮廓及应力方向之间存在复杂的三维空间耦合关系, 使隧洞破坏呈现显著的复杂演化特征。挤出式水泥基 3D 打印技术具有类岩石特性, 成型速度快、离散性小、成本低等优点, 本研究采用挤出式水泥基 3D 打印技术来制备不同层理方向的层状圆形隧洞试样, 通过超载破坏试验和数值计算分析圆形层状隧洞在超载破坏作用下力学特性及裂纹演化机理。结果表明: 层理方向显著影响层状隧洞的力学性能, 水平层状隧洞的峰值强度高于竖直层状隧洞的峰值强度; 层理方向主要控制裂纹的扩展路径, 层理水平时, 裂纹主要穿越层理扩展, 层理竖直时, 裂纹更易沿层理弱面扩展; 两种层理方向的层状隧洞的起裂位置均位于隧洞顶端和底端; 圆形水平层状隧洞主要以拉剪复合破坏模式为主, 裂纹多贯通基质, 竖直圆形层状隧洞以顺层理弱面的张拉破坏为主。以上研究成果可为层状隧洞开挖和支护设计提供理论指导。

关键词: 水泥基 3D 打印; 层状隧洞; 数值模拟; 裂纹演化

中图分类号: U451

文献标志码: A

Mechanical Characteristics and Numerical Simulation of Overload Failure in Layered Tunnels via Extrusion 3D Printing

Rong Yao^{1,2}, Liu Qiang^{1,2}, Fu Kang², Zhang Chengke¹, Yu Junping¹, Zhu Liqing¹, Wu Jiangpeng¹, Sun Yang³

(1. Jiangxi Transportation Institute, China Jiangxi Provincial Key Laboratory of Highway Bridge and Tunnel Engineering, Jiangxi Communications Investment Maintenance Technology Group Co., Ltd, Nanchang 330200, China; 2. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Communications Investment Consulting Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China)

Abstract: During layered tunnel excavation, there is a complex three-dimensional spatial coupling relationship among bedding planes, tunnel contours, and stress directions, resulting in significant complex evolutionary characteristics of tunnel failure. Extrusion-based cementitious 3D printing technology offers advantages such as rock-like properties, rapid fabrication, low variability, and low cost. In this study, circular diversion tunnel models with different bedding orientations were fabricated using extrusion-based cementitious 3D printing. Overload failure tests and numerical simulations were conducted to analyze the mechanical characteristics and crack evolution mechanisms of layered circular tunnels under overload conditions. Results indicate that bedding orientation significantly influences the mechanical performance of layered tunnels. The peak strength of horizontal layered tunnels is higher than that of vertical ones. Bedding orientation primarily governs crack propagation paths. In horizontal bedding, cracks predominantly penetrate the layers, whereas in vertical bedding, cracks tend to propagate along weak bedding interfaces. For both orientations, crack initiation occurs at the tunnel crown and invert. Furthermore, horizontal layered tunnels exhibit a tensile-shear composite failure mode with matrix-penetrating cracks. In contrast, vertical layered tunnels show tensile failure along the bedding planes. These findings provide theoretical guidance for the excavation and support design of layered tunnels in stratified rock masses.

Key words: cementitious 3D printing; layered tunnels; numerical simulation; crack evolution

近年来, 我国基础设施建设进程持续加快, 隧道工程在交通、水利、能源等领域的应用日益广泛。层状岩体作为一种典型的各向异性地质材料, 广泛分布于隧道、边坡、地下储库及矿山工程等土木工程领域, 给隧道工程的围岩稳定性分析带来了巨大挑战。

国内外学者针对层状围岩的各向异性特征^[1,2]开展了大量研究。何长江等^[3]建立了顺层隧道节理岩体模型,采用有限元强度折减法研究了硬质岩层及软硬岩互层条件下,节理倾角和节理间距变化对隧道破坏模式及稳定性的影响。Xin 等^[4]为揭示隧道断面形状对围岩变形、应力分布及破裂机制的影响,开展了一系列矩形和圆形预制隧道围岩物理模型剪切试验,并对试验过程中的裂纹扩展特征及能量演化规律进行了分析。Sun 等^[5]从理论上推导了圆形和矩形隧道的抗拔力机理,并通过模型试验进行了验证。理论计算的抗拔力与试验值吻合良好,表明所提出的方程具有可行性,还利用综合力学平衡法确定了矩形盾构隧道在不同工况下的最小土覆土深度,从而为实际施工中建议的隧道埋深提供了更为合理的估算。Jiang 等^[6]针对矩形砂石隧洞的剪切破坏机制,在 3 种法向应力条件下对单矩形隧洞(SRT)和双矩形隧洞(DRT)试件进行了物理剪切试验。通过摄像技术记录试件内部损伤演化及外部裂纹扩展过程,并结合声发射监测手段,揭示了隧洞试件的细观破坏特征及演化规律。冯帆^[7]分析了含圆形和方形孔洞试样的裂纹演化特征,发现试样初始破坏均表现为孔洞上下壁产生轴向张拉裂纹,随后板裂裂纹与远场裂纹相互贯通并最终导致试件失稳破坏。同时,试样的力学性能及变形破坏特征与孔洞方位角密切相关。除物理模型试验外,许多学者还采用数值模拟方法研究层状围岩的稳定性^[8]。唐锐等^[9]基于有限元数值模型分析了不同层理条件下层状岩体对公路隧道围岩稳定性的影响,结果表明,隧道沿垂直于节理面的方向变形最为显著。任富强等^[10]针对动载作用下深埋巷道的横截面形状效应,制备了含 5 种不同孔洞形状的水泥砂浆类岩石材料试样,并利用落锤冲击试验系统研究了其动力响应特征。结合 PFC2D 数值模拟,进一步分析了试样的动态抗压强度特征及细观开裂机制。

由于天然岩石材料难于实现不同强度岩体的精准制备,且天然岩石离散型大,难于用于定量对比分析研究。学者常采用人工制备试样的方法来开展相关试验研究。Wang 等^[11, 12]利用类岩石材料,制备了含不同层理倾角和预制裂缝倾角组合的层状类岩石试样进行单轴压缩试验。然而,人工制样存在制作成本高、制样均匀性差、制样时间长等缺点,随着 3D 打印技术快速发展,许多学者探索将 3D 打印技术应用到层状岩体力学行为研究中。Liu 等^[13]采用水泥基 3D 打印技术制作了等面积圆形隧道和三心圆隧道,通过超载破坏试验对其变形和破坏机理进行了对比研究。并且江权等^[14]研制了一种复杂岩体与工程结构大型相似物理模型三维快速成型设备。水泥基 3D 打印材料具有较好的类岩石特性,且强度易调节、制作成本低^[15-17],因此,水泥基 3D 打印技术能够很好地运用在层状岩石及层状围岩的制备。

本研究创新性地采用了挤出水泥基 3D 打印技术来制作水平层理和竖直层理的层状隧洞模型,开展超载破坏试验并结合数值模拟,对比分析层理方向对层状圆形隧洞力学特性及裂纹演化的影响规律。

1 试样制备及试验过程

1.1 相似材料的选取

本研究采用水泥基挤出3D打印技术进行试样制备。课题组已有研究表明,在水泥基类岩石材料中引入聚丙烯酰胺(PAM)与纳米材料可显著提升试样的强度与脆性特征^[18, 19]。本试验选用粘结剂、细砂、增稠剂、纳米二氧化硅及聚丙烯纤维作为打印原料。其中,粘结剂由普通硅酸盐水泥(OPC)与硫铝酸盐快硬水泥(SAC)按24:1的质量比混合而成;增稠剂采用羟丙基甲基纤维素(HPMC)与阴离子聚丙烯酰胺(APAM)按3:1的质量比配制。纳米二氧化硅与聚丙烯纤维的相关物理参数如表1所示。课题组前期已通过开展大量的单轴压缩试验与巴西劈裂抗拉试验^[20],来选取3D打印层状隧洞试样的相似材料配比,其中江权等^[21]针对水泥基3D打印实体质量评价的问题,建立了一套考虑成型全过程的6指标评估体系及其质量分级方法,包括流动性、挤出性、凝结时间、可建造性、密实性以及变形率,从打印过程、堆积成型、实体精度三方面实现对3D打印实体模型的质量评价,采用不同阈值范围的两阶段正交设计与打印测试进行了水泥基3D打印材料的基础性配合比试验优选,获得了一种综合打印性能较好的基础性配合比,因此,选取的各组分质量比例见表2。

表 1 纳米二氧化硅和聚丙烯纤维的相关参数

Tab.1 Parameters of nano-silica and polypropylene fibers

纳米二氧化硅	数值	聚丙烯纤维	数值
密度 (g/cm ³)	2.2	密度 (g/cm ³)	0.91
平均颗粒粒径 (nm)	20~50	平均直径 (μmm)	33
比表面积 (m ² /g)	210	长度 (mm)	6

表 2 水泥基 3D 打印材料质量配合比

Tab.2 Mass mix proportions of 3DCP materials

普通硅酸盐水泥	硫铝酸盐快硬水泥	细砂	水	羟丙基甲基纤维素	聚丙烯酰胺	纳米二氧化硅	聚丙烯纤维
0.96	0.04	0.22	0.36	0.003	0.001	0.005	0.001

1.2 试样制备与制备方法

1) 水泥基3D打印系统

试验采用挤压式类岩石3D打印设备，该系统由运动控制模块、挤出组件及框架结构组成，打印尺寸为370mm×796mm×290mm，可满足中小型类岩石试样的制备需求。挤出部位采用小喷嘴设计，每层打印厚度为1.5~3 mm，印刷精度高达0.011 mm。该设备具有打印精度高、易于清洗、操作简便且无需模具成型等优点。在打印过程中，喷嘴仅在XY平面内移动，而Z轴方向的位移通过控制成型平台的升降实现，这种设计有效保证了打印过程的稳定性与试样的成型精度。

2) 试样制备

为研究层理角度对层状隧洞的力学性能及裂纹扩展规律的影响，试验制备流程如下：首先，通过挤压式3D打印技术打印层状岩石试样，其中，每层打印厚度为2mm。然后，在实验室中20℃下固化12小时，并在相对湿度为95±5%的20±2℃的固化室中养护28天。养护完成后，通过选取不同的切割角度从而来切割出水平层理和竖直层理的标准长方体试样，标准长方体试样的尺寸为100mm×50mm×25mm，然后根据试验要求在长方体试样的中部切割出直径为20mm的圆形隧洞，从而制备出层理水平和层理竖直的圆形层状隧洞，示意图如图1所示。最后，利用RMT-150C 岩石力学伺服加载系统对加工完成的试样进行单轴压缩试验。

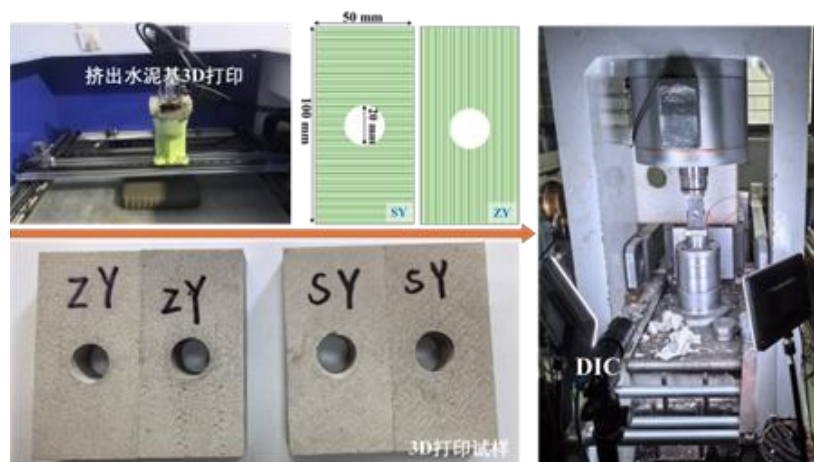


图 1 3D 打印层状隧洞超载破坏试验测试

Fig.1 Overload failure test of 3D-printed layered tunnels

1.3 试验系统与加载方案

1) 试验装置

试验测试系统由 RMT-150C 岩石力学伺服加载系统与高速摄像系统共同组成。为满足数字图像相关法（DIC）的分析需求，试验前在试样观测表面均匀喷涂随机散斑。高速摄像系统包括高速摄像头及高亮度冷光光源。在安装调试阶段，通过调整摄像头的物距与焦距，确保试样表面散斑区域处于视场中心且成像清晰。

2) 加载方案

单轴压缩试验加载方式采用位移控制，加载速率设定为0.05mm/s。试验开始时，需要确保加载系统与高速摄像系统同步启停，实时记录试样从初始加载至完全破坏的全过程演化特征。高速摄像机的采样频率设定为50帧，便于捕捉试样表面的裂纹萌生、扩展路径及宏观破坏形态，为后续的分析裂纹演化路径做准备。

3) 数据处理

试验结束后，利用 GOM Correlate专业DIC分析软件对采集的序列图像进行处理。通过对比变形前后图像中散斑特征点的位移变化，计算获取试样表面的全场位移矢量及应变演化规律。同时，提取RMT-150C系统记录的载荷与位移数据，计算并绘制应力-应变曲线。

2 试验结果分析

通过对不同工况的层状隧洞试样进行超载压缩破坏试验，获取了各工况试样的力学参数、应力-应变曲线及破坏过程中的裂纹演化特征，深入探究不同层理方向对试样的力学性能、破坏模式和裂纹扩展机理的影响规律。

2.1 层状隧洞的力学参数分析

表3汇总了水平层理和竖直层理下的层状圆形隧洞试样的峰值强度、峰值应变及弹性模量等力学参数。结果表明：层理方向对层状圆形隧洞的峰值强度具有显著的影响，水平层理下的峰值强度高于竖直层理条件下的峰值强度；弹性模量与峰值强度具有相同的变化规律；各工况下的平均峰值应变集中在14.15%~15.55%之间，说明层理方向对应变影响较小。

表 3 各工况试样力学参数
Tab.3 Mechanical parameters of specimens

编号	峰值强度 (MPa)	平均峰值强度 (MPa)	应变 (%)	平均应变 (%)	弹性模量 (GPa)	平均弹性模量 (GPa)
SY-1	29.14	28.38	15.55	15.28	2.11	2.05
SY-2	27.61		15.01		1.99	
ZY-1	24.06	24.48	14.15	14.48	2.01	1.97
ZY-2	24.89		14.81		1.92	

2.2 层状圆形隧洞试样的裂纹演化分析

为研究不同工况下层状隧洞试样在破坏过程中的裂纹演化分析，利用 GOM Correlate软件处理压缩过程中高速摄像机采集的试样变形图像进行分析从而得到DIC主应变云图，并结合应力-应变曲线选取各阶段的主应变云图，来进一步揭示层理方向对圆形层状隧洞试样的裂纹演化规律，通过对水平层理和竖直层理下的圆形层状隧洞试样在加载过程中典型阶段对应的DIC应变云图进行分析，如图2和图3。

如图2所示，SY试样经历了压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。在压密阶段，试样内部微孔隙逐渐闭合，DIC应变云图显示全场主应变极低且分布相对均匀，未出现明显的应变集中现象。进入弹性阶段后，应力-应变曲线呈近似线性关系，随着荷载增加，隧洞周围出现应力重分布，圆形隧洞顶部和底部，

由于拉应力集中出现轻微的局部应变集中区域。进入塑性阶段后，应变集中带从洞周迅速向上下两侧垂直扩展，裂纹表现出显著的穿层扩展特征，试样需要消耗更多的能量，从而使SY试样具有更高的峰值强度。最终试样在隧洞顶部和底部形成两条明显的张拉裂纹，同时试样左侧为剪切裂纹，右侧为张拉裂纹。试样达到峰值后承载力骤降。云图显示主应变带贯通整个试样，且孔周伴随显著的材料剥落，最终呈现出典型的穿越层理的拉剪复合破坏。

如图3所示，ZY试样同样经历了压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段。ZY试样在弹性阶段较早地在洞口的顶部和底部观测到应变集中现象，并且裂纹最初萌生在应变集中区域。在接近峰值强度时，应变带沿竖直层理弱面迅速剧烈发育。相比于水平层理，这种沿层理弱面扩展方式需要的耗散的能量很少，裂纹更易在层理弱面发生滑移与贯通，需要损耗更少的能量，导致其峰值强度低于SY试样。在破坏阶段，应力-应变曲线表现出明显的台阶式下跌，反映了层理面相继失稳的过程，DIC云图显示试样呈现明显的轴向劈裂破坏，孔洞周边由于层理间的相互挤压和失稳，出现了比SY试样更为严重的片帮和剥落现象，最终试样发生沿层理弱面的张拉破坏。

对比分析SY与ZY两组试样的试验结果发现，层理方向对裂纹的萌生与扩展具有显著的导向作用，竖直层理更容易诱导裂纹沿层理弱面扩展，而在水平层理下裂纹需要穿越层理弱面，在基质中贯通扩展，从而导致SY试样表现为穿越层理的拉剪复合破坏，ZY试样表现为沿层理弱面的张拉破坏为主。裂纹的最终萌生的位置均在洞口的顶部和底部，说明层理方向对裂纹起裂的位置影响不大。

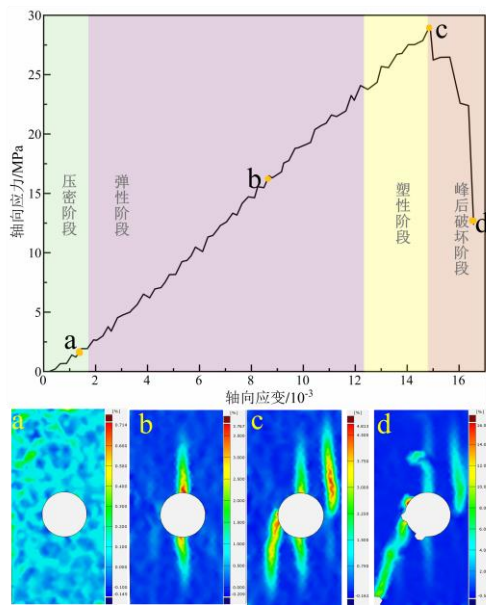


图2 SY试样的DIC主应变云图

Fig.2 DIC principal strain contour maps of SY

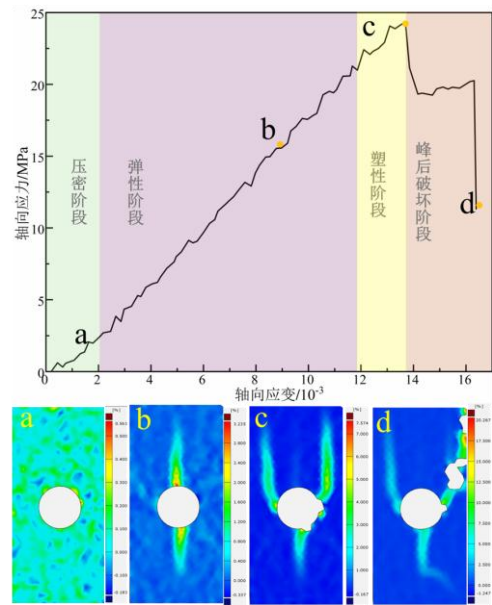


图3 ZY试样的DIC应变云图

Fig.3 DIC principal strain contour maps of ZY

3 数值模拟结果分析

为进一步揭示层状隧洞试样在单轴压缩过程中的细观损伤演化机制，采用PFC2D建立与室内试验相对应的数值模型，对不同隧洞截面形状与层理方向下试样的宏观力学参数、微裂纹扩展、接触力链演化以及最终破坏模式进行分析，并与室内试验结果进行对比验证。

3.1 数值模型建立

利用PFC建立的3D打印层状隧洞数值模型，考虑到3D打印层状隧洞试样存在层理面，将试样模型分为岩石试样自身基质和层理结构面，其中岩石基质选取平行粘结模型（Parallel bond model, PBM），该模型能够同时传递颗粒间的法向力、切向力以及弯矩和扭矩，从而较好地表征岩石材料的整体性和抗拉、抗剪力特性；层理结构面采用光滑节理模型（Smooth joint model, SJM），该模型允许颗粒在节理面处发生相对滑动，从而能够真实反映层状岩体沿层理结构面发生剪切滑移和张开破坏的力学特征。3D打印层状隧洞

数值模型的尺寸与室内试验中3D打印层状隧洞试样的尺寸保持一致。通过删除数值模型中特定区域内的颗粒以构建孔洞结构，从而形成直径为20mm的圆形隧洞，与室内试验的试样的层厚保持一致，每层层厚均为2mm，最终生成的层状隧洞数值模型流程如图4所示。

为了保证数值模型能够较好反映室内试验结果，本章对水平层理下圆形层状隧洞模型进行参数标定，通过对比室内试验的应力-应变曲线及破坏图来选取一组合适的细观参数。根据室内单轴压缩试验获得的力学特性和破坏模式，对模型初步赋予一组能够反映岩石特性的细观参数。将数值模拟结果与室内单轴压缩试验结果进行对比，并对细观参数进行不断调整与计算，使模拟得到的力学特性参数及试样破坏模式逐渐与室内试验结果一致，从而完成模型的细观参数标定。最终得到圆形水平层状隧洞数值模型的合理细观参数，其标定结果如表5所示。该组细观参数可进一步应用于其他工况下层状隧洞试样的数值模拟。图5为水平层状圆形隧洞数值模拟结果与室内试验结果的对比图。

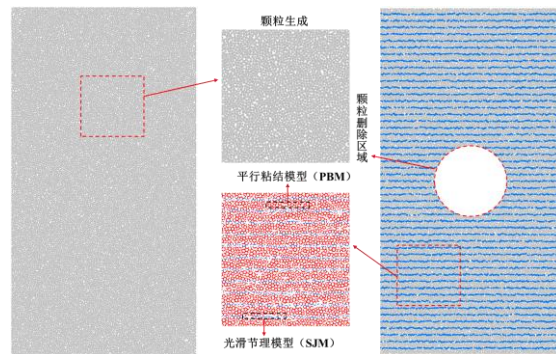


图4 层状圆形隧洞数值模型建立流程

Fig. 4 Numerical modeling process of layered circular tunnels

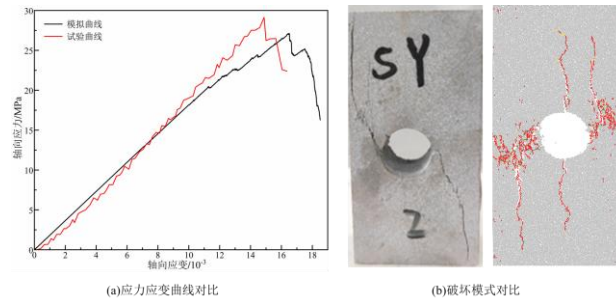


图5 圆形层状隧洞试样室内试验与数值模拟试验结果对比

Fig.5 Comparison of laboratory tests and numerical simulation test results of circular layered tunnel specimens

表4 层状隧洞数值模型细观力学参数

Tab.4 Micro-mechanical parameters of layered tunnel numerical models

细观参数	取值
颗粒最小半径(m)	0.18
颗粒粒径比 Rrat	1.62
摩擦系数 pb_fric	0.5
平行粘结模量 pb_emod (GPa)	3
平行粘结刚度比 pb_krat	1.5
平行粘结摩擦角 pb_fa(°)	40
加载速度(m/s)	0.05

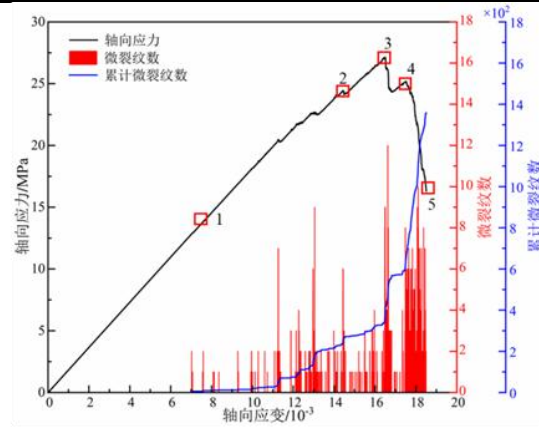
平行粘结抗拉强度 pb_ten (MPa)	38
平行粘结粘聚力 pb_coh (MPa)	43
光滑节理法向刚度 sj_kn (GPa)	1000
光滑节理切向刚度 sj_ks (GPa)	500
光滑节理摩擦系数 sj_fric	0.6
光滑节理抗拉强度 sj_ten (MPa)	15
光滑节理粘聚力 sj_coh (MPa)	20

3.2 层状圆形隧洞模型的微裂纹演化分析

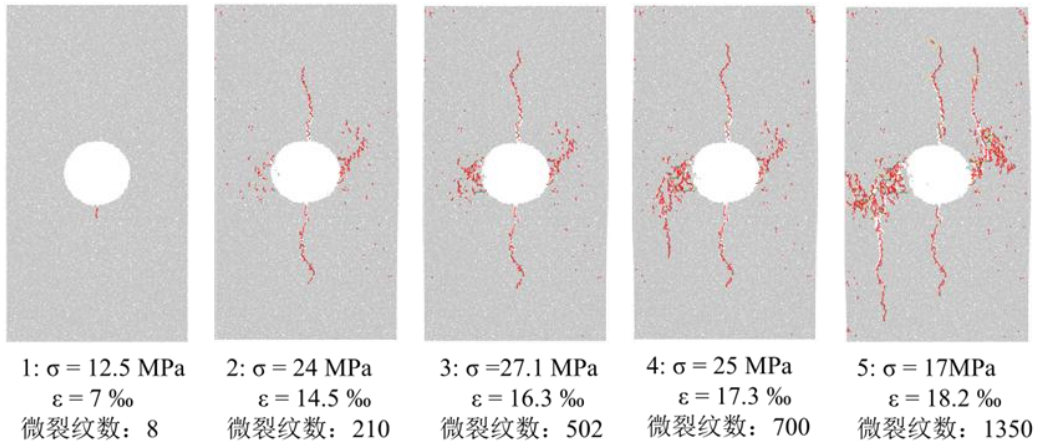
由于室内物理试验无法很好的观察到试样破坏过程中的微裂纹扩展与微裂纹类型，但是PFC可以很好得记录下微裂纹在单轴压缩模拟过程中数量变化、类型及演化路径，从而从细观角度来研究不同层理方向下对层状隧洞试样在破坏过程中微裂纹扩展、接触力链演化及最终的破坏模式的影响规律。模拟过程中记录了试样的应力-应变曲线、微裂纹演化曲线、裂纹扩展过程图以及颗粒间接触力链分布，如图8和图9所示。其中，红色表示平行粘结模型中的拉伸微裂纹，蓝色表示平行粘结模型中的剪切微裂纹，黄色表示光滑节理模型中的拉伸微裂纹，绿色表示光滑节理模型中的剪切微裂纹。

如图6为圆形水平层状隧洞试样单轴压缩数值模拟过程，试验进行到点1时，试样轴向应力为12.5MPa，轴向应变为7%，微裂纹数仅为8，应力-应变曲线基本保持线性增长，累计微裂纹曲线接近水平，说明试样整体仍处于弹性变形阶段，从微裂纹分布图发现，在圆形隧洞的底部萌生出少量微裂纹，说明微裂纹的起裂位置位于隧洞底部，并且该时刻对应的接触力链分布图发现，孔洞上、下方形成较明显的应力集中区，说明隧洞顶部和底部附近首先承担较高接触应力，而两侧局部也已有轻微扰动。试验进行至点2时，此时轴向应力为24MPa，轴向应变为14.5%，微裂纹数增至210。轴向应力仍持续上升，且微裂纹数量和累计微裂纹数均开始明显增加，表明试样已弹性阶段进入损伤稳定发展阶段。由微裂纹分布图可知，孔洞上方和下方逐渐形成近轴向裂纹带，同时孔洞右侧开始出现较多微裂纹聚集区。说明随着加载增加，孔洞上下方的拉应力集中区促使裂纹沿加载方向扩展，而右侧局部区域在受力重分布作用下也开始参与破坏。对应的接触力链图中，孔洞上、下方应力集中进一步增强，并在孔洞两侧尤其是右侧出现局部力链扰动和偏转，说明试样局部应力集中与重分布同步发展。试验继续进行，轴向应力达到峰值，在圆形孔洞周围出现明显贯通的宏观裂纹，达到峰值后，轴向应力降低出现短暂的平台，并且微裂纹数缓慢增长，应力维持平台结束，到达时刻4，此时微裂纹分布与峰值时没有明显变化，随着试验进行，轴向应力出现骤降，伴随着微裂纹快速增长，此时累计微裂纹数快速上升，试样内部损伤进一步加重，导致试样发生失稳破坏。最终微裂纹分布表明，孔洞上、下方形成了较明显的轴向主裂纹带，裂纹已基本向试样上下边界扩展；同时孔洞右侧形成较大范围的密集破坏区。特征点5对应的接触力链图显示，孔洞周边原有密集力链大范围减弱甚至消失，说明主裂纹贯通后试样内部有效承载路径已被明显破坏，仅在远离主裂纹区的局部区域仍保留一定承载能力。

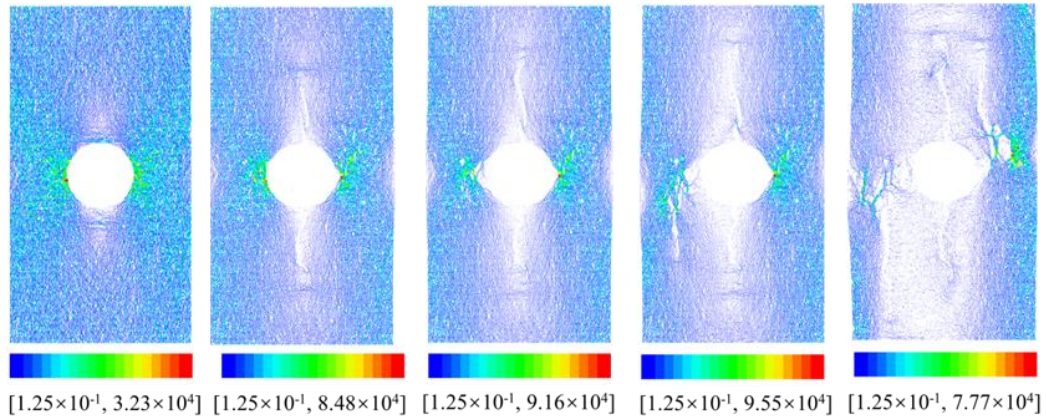
竖直层理条件下的圆形孔洞的层状类岩石试样的微裂纹演化过程与水平层理条件下相似，但发现竖直线理条件下出现大量的黄色微裂纹，说明裂纹扩展更容易发生在层理弱面，如图7所示。数值模拟结果中，光滑节理模型中的拉伸微裂纹增多，表明竖直层理下微裂纹更容易顺层理弱面发展。尤其在孔洞下方，顺层理方向的裂纹扩展特征更为明显，说明竖直层理条件下圆形孔洞试样的最终失稳不仅受孔洞缺陷引起的应力集中导致，还受到层理弱面导向作用的影响。这与室内试验结果一致，说明数值模拟能够验证室内试验结果的准确性。



(a) 应力-应变曲线及微裂纹数量曲线



(b) 微裂纹演化过程



(c) 接触力链演化过程

图 6 水平层状隧洞裂纹演化过程

Fig.6 Crack evolution process of horizontal layered tunnels

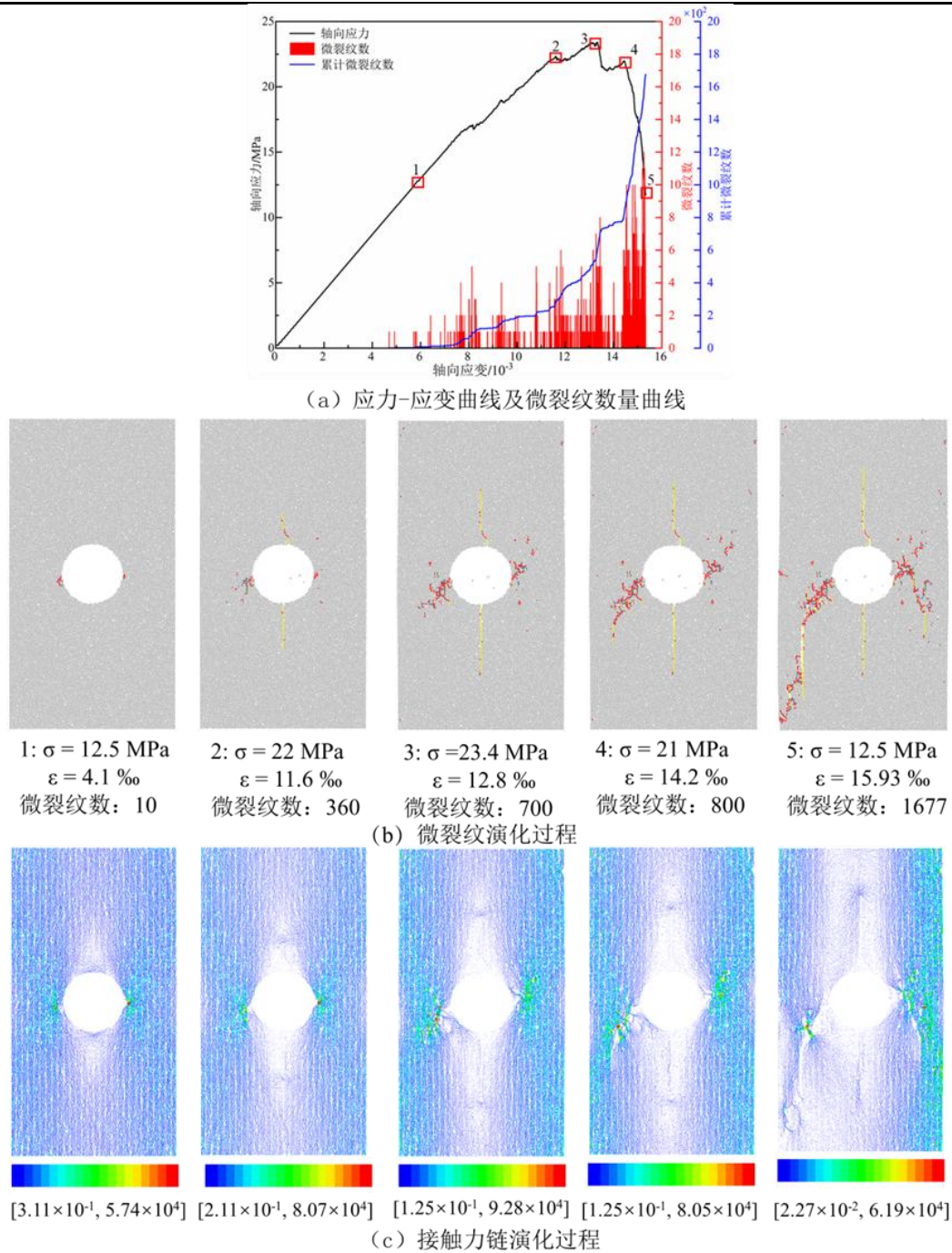


图 7 竖直层状隧洞裂纹演化过程

Fig.7 Crack evolution process of vertical layered tunnels

3.3 层状圆形隧洞试样位移场及破坏模式分析

进一步结合PFC2D数值模拟结果,对层状隧洞试样在单轴压缩条件下的细观位移场及破坏模式进行分析。揭示不同层理方向的条件试样裂纹类型及破坏模式差异,并进一步阐明层理方向和隧洞形状对试样最终破坏模式的影响规律。将裂纹分为直接拉伸(direct tensile, DT)、相对拉伸(relative tensile, RT),直接剪切(direct shear, DS)、相对剪切(relative shear, RS)和拉伸剪切裂纹(shear tensile, ST)^[22]。

如图8所示,试样最终形成了较为明显的轴向贯通裂纹,主裂纹主要由隧洞顶部和底部处起裂,并沿加载方向朝上下边界扩展。结合最终微裂纹分布可知,图中红色微裂纹占据主导,说明该工况下试样破坏主要受PBM中的拉伸微裂纹控制;蓝色剪切微裂纹数量相对较少,主要集中在孔洞两侧局部区域;黄色和

绿色微裂纹分布范围有限,表明SJM所表征的层理面开裂与剪滑作用相对较弱。从局部位移矢量特征看,孔洞上、下方主裂纹两侧颗粒明显向两侧分离,表现出典型的DT裂纹特征,在裂纹扩展过程中,部分裂纹段两侧位移矢量方向相同但是位移大小不同,表现为RT裂纹特征;在孔洞附近及局部裂纹转折部位,裂纹两侧颗粒除法向张开外还伴随一定切向错动,表现为ST裂纹。此外,隧洞肩部附近还可观察到颗粒沿裂纹面发生局部滑移,对应DS裂纹。可见试样裂纹演化以拉伸裂纹为主,剪切裂纹仅在局部应力集中区域出现,并且微裂纹主要是在基质中贯通和扩展,试样最终破坏模式表现为以穿越层理弱面的拉剪复合破坏。

如图9所示,层理方向对裂纹扩展路径的控制作用更加明显。由最终微裂纹分布可知,隧洞上方和下方沿试样中轴线形成了连续黄色微裂纹带,说明该工况下主裂纹主要由SJM中的拉伸微裂纹构成,即裂纹更倾向于沿层理弱面扩展。与此同时,孔洞两侧及肩部附近仍存在一定数量的红色和绿色微裂纹,分别对应PBM中的拉伸微裂纹和SJM中的剪切微裂纹,表明隧洞周边局部区域仍发生了基质开裂与层理面剪滑的共同作用。结合局部位移矢量图可知,隧洞上方主裂纹附近颗粒明显向裂纹两侧张开,属于典型的DT裂纹。隧洞左下侧和右侧局部区域中,裂纹两侧颗粒既存在法向分离又存在切向错动为ST裂纹。在部分扩展段中,裂纹两侧颗粒呈现明显的相对分离运动特征为RT裂纹。孔洞侧壁附近则可见颗粒沿裂纹面发生局部滑移,对应DS裂纹。这表明图9所示工况下,虽然孔洞周围局部区域仍存在剪切破坏,但控制试样整体失稳的主裂纹由沿层理弱面扩展的张拉裂纹所主导的张拉破坏。

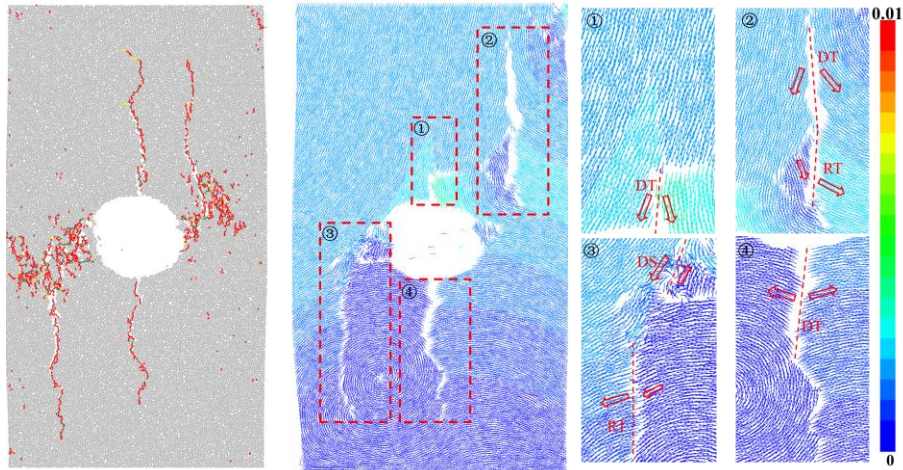


图 8 水平层状隧洞位移场

Fig.8 Displacement field of horizontal layered tunnels

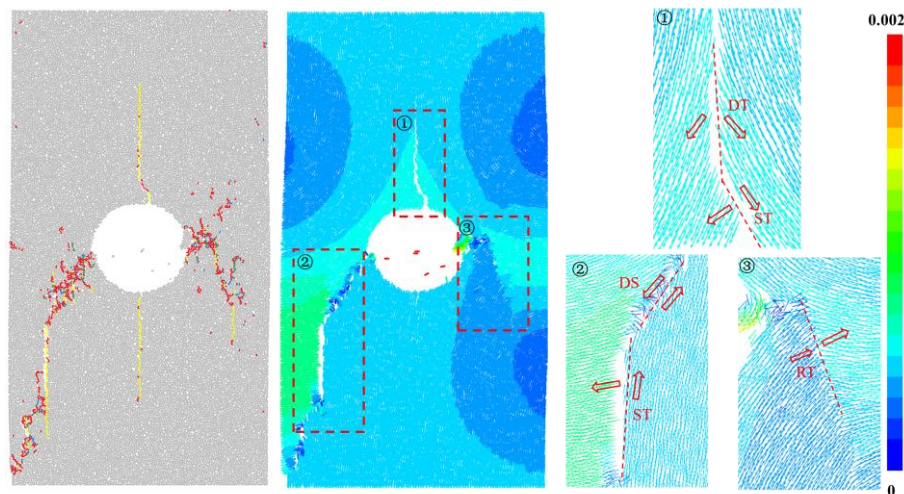


图 9 竖直层状隧洞位移场

Fig.9 Displacement field of vertical layered tunnels

4 结论

利用水泥基3D技术分别制备了水平层理和竖直层理条件下的圆形层状隧洞试样,采用室内试验与PFC2D数值模拟相结合的方法,系统研究了圆形层状隧洞试样在不同层理方向条件下的力学特性、裂纹演化规律及破坏模式。主要结论如下:

1) 水泥基3D打印技术可以较好用于层状隧洞变形破坏及裂纹演化机理分析。层理方向会显著影响层状圆形隧洞试样的力学性能。水平层状圆形隧洞的峰值强度高于竖直层状圆形隧洞的峰值强度,并且弹性模量具有相同的变化趋势。

2) 室内试验和数值模型表明,层理方向主要控制裂纹的扩展路径。水平层理条件下,裂纹主要穿越层理弱面扩展;竖直层理条件下,裂纹更易沿层理弱面进行扩展。试样裂纹起裂位置均位于隧洞顶端和底端。

3) 室内试验结果和数值模拟结果表明,水平层状圆形隧洞以拉剪复合破坏为主,裂纹主要在基质中扩展贯通;竖直层状圆形隧洞试样主要为顺层理的张拉破坏为主。

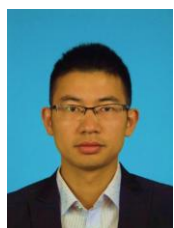
参考文献:

- [1] 刘德柱,李元海. 软弱缓倾层状隧道围岩变形破裂规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1527-1535.
Liu Dezhu, Li Yuanhai. Experimental investigation on the law of deformation and fracture of surrounding rock of soft and gently inclined layered tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1527-1535.
- [2] 刘旺,刘永胜,翟茂林. 含交叉裂隙红砂岩能量耗散与声发射特征研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 38-48.
Liu Wang, Liu Yongsheng, Zhai Maolin. Study on energy dissipation and acoustic emission characteristics of red sandstone with cross-fractures [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 38-48.
- [3] 何长江,冯君,江南,等. 节理特性对顺层隧道破坏模式及稳定影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 599-607.
He Changjiang, Feng Jun, Jiang Nan, et al. Analysis on the influence of rock joint characteristics on failure mode and stability of bedding tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 599-607.
- [4] Xin Jie, Jiang Quan, Li Shaojun, et al. Fracturing and energy evolution of rock around prefabricated rectangular and circular tunnels under shearing load: a comparative analysis [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(12): 9057-9084.
- [5] Sun Weixin, Han Fucheng, Liu Hanlong, et al. Determination of minimum overburden depth for underwater shield tunnel in sands: comparison between circular and rectangular tunnels [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(7): 1671-1686.
- [6] Jiang Quan, Xin Jie, Xu Dingping, et al. Shear failure process of rectangular tunnel: physical experimental test and numerical back-analysis [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 120: 103384.
- [7] 冯帆,李夕兵,李地元,等. 基于有限元/离散元耦合分析方法的含预制裂隙圆形孔洞试样破坏特性数值分析[J]. 岩石力学, 2017, 38(增刊2): 337-348.
Feng Fan, Li Xibing, Li Diyu, et al. Numerical analysis of failure characteristics of circular hole specimen containing pre-existing flaw based on finite/discrete elements [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 337-348.
- [8] 李地元,李夕兵,李春林,等. 单轴压缩下含预制孔洞板状花岗岩试样力学响应的试验和数值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1198-1206.
Li Diyu, Li Xibing, Li Chunlin, et al. Experimental and numerical studies of mechanical response of plate-shape granite samples containing prefabricated holes under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1198-1206.
- [9] 唐锐,安俊吉,向龙,等. 层状岩体对公路隧道围岩稳定性的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊2): 216-224.
Tang Rui, An Junji, Xiang Long, et al. Analysis of the impact of layered rock mass on stability of a highway tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S2): 216-224.

- [10] 任富强, 谷金泽, 孙博, 等. 含不同孔洞类岩石材料的动力响应机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45 (增刊 1): 654-664.
Ren Fuqiang, Gu Jinze, Sun Bo, et al. Dynamic response mechanism of rock-like materials with different shape holes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (S1): 654-664.
- [11] Wang Dingjian, Tang Huiming, Elsworth D, et al. Fracture evolution in artificial bedded rocks containing a structural flaw under uniaxial compression [J]. Engineering Geology, 2019, 250: 130-141.
- [12] Wang Dingjian, Tang Huiming, Shen Peiwu, et al. Co-effects of bedding planes and parallel flaws on fracture evolution in anisotropic rocks [J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105382.
- [13] Liu Qiang, Jiang Quan, Yu Yang, et al. Extrusion 3D printing circular and horseshoe tunnel physical models: a comparative study of deformation and brittle failure [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 129: 104229.
- [14] 江权, 刘强, 张世殊, 等. 复杂岩体与工程结构大型相似物理模型三维快速成型设备研制及实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45 (3): 668-683.
Jiang Quan, Liu Qiang, Zhang Shishu, et al. Development of 3D rapid prototyping system for large-scale physical modeling of complex rock masses and engineering structures with case study analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2026, 45 (3): 668-683.
- [15] Jiang Quan, Liu Qiang, Wu Jiayao, et al. A review of similar physical simulation in geotechnical engineering: advances in the past 25 years [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2026, 18 (4): 3281-3328.
- [16] Liu Qiang, Zhang Xinwei, Jiang Quan, et al. Effects of nano-Al₂O₃ nano-MgO and nano-Fe₂O₃ on the properties of cement-based 3D printing: a comparative study [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113322.
- [17] 江权, 刘强. 地下洞室变形破坏物理模拟的力学相似畸变映射原理与实例分析[J]. 岩土力学, 2024, 45 (1): 20-37.
Jiang Quan, Liu Qiang. Mechanical similarity distortion mapping principle and case analysis for underground cavern physical simulation of deformation and failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (1): 20-37.
- [18] Jiang Quan, Liu Qiang, Wu Si, et al. Modification effect of nanosilica and polypropylene fiber for extrusion-based 3D printing concrete: printability and mechanical anisotropy [J]. Additive Manufacturing, 2022, 56: 102944.
- [19] Liu Qiang, Jiang Quan, Huang Mojia, et al. The fresh and hardened properties of 3D printing cement-base materials with self-cleaning nano-TiO₂: an exploratory study [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379: 134804.
- [20] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining [M]. 3rd ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006.
- [21] 江权, 吴思, 刘强, 等. 水泥基 3D 打印材料基础配合比试验与质量评价[J]. 岩土力学, 2023, 44 (5): 1245-1259.
Jiang Quan, Wu Si, Liu Qiang, et al. Basic mix ratio test and corresponding quality evaluation for cement-based 3D printing materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44 (5): 1245-1259.
- [22] Pan Jiliang, Wu Xu, Guo Qifeng, et al. Uniaxial experimental study of the deformation behavior and energy evolution of conjugate jointed rock based on AE and DIC methods [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8850250.



第一作者: 荣耀 (1979—), 男, 正高, 博士, 博士生导师, 研究方向为岩土隧道工程。



通信作者: 刘强 (1988—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为地下隧洞与智能建照。