

DOI: 10.11779/CJGE202008022

基于电机双轴加载的中小型隧道物理模拟试验系统研制与应用

李元海^{1, 2}, 刘德柱², 杨 硕¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为研究深部隧道围岩变形破裂过程及演化机理问题, 并针对当前隧道工程试验系统中存在的关键问题, 研制了一套结构紧凑、模型尺寸适中、稳压效果良好的双轴电机加载物理模拟试验系统。该系统由框架式反力架、伺服电机加载及控制系统、自行研制的数字照相变形量测系统和开挖辅助装置等部分组成, 不仅可以用于中小型隧道物理模拟试验, 还可完成普通相似材料的标准或非标准试件的单轴与双轴压缩试验研究等。最后给出类岩石材料单、双轴压缩试验及复合地层相似材料围岩变形破裂试验的应用实例, 部分试验结果与类似研究成果基本一致, 表明本套试验系统能够满足隧道围岩稳定性等问题研究的需要, 同时, 试验结果可为相关问题研究提供参考。

关键词: 隧道; 双轴加载; 相似模拟; 模型试验; 数字照相量测

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)08-1556-08

作者简介: 李元海(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程数字照相量测技术与应用以及地下工程安全分析与稳定性控制机理等方面的研究工作。E-mail: lyh@cumt.edu.cn。

Development and application of physical simulation test system for small and medium-sized tunnels based on biaxial motor loading

LI Yuan-hai^{1, 2}, LIU De-zhu², YANG Shuo¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To study the failure process of deformation and evolution mechanism of the surrounding rock in deep tunnels, as well as to solve the key problems of the current tunneling test system, a new motor biaxial loading system with compact structure, moderate size and stabilized loading is developed for simulating physical tunnels. The system consists mainly of a frame-type reaction frame, a servo-controlled motor testing system, a self-developed digital photographic deformation measurement system and auxiliary devices for excavation. It can be used for the physical simulation tests on small and medium-sized tunnels and the uniaxial and biaxial compression tests on standard or non-standard specimens made of the common similar materials. Finally, the uniaxial and biaxial compression tests on the rock-like specimens and the simulation experiments to study the deformation evolution of the surrounding rock in mixed strata are performed to verify the feasibility of the test system. Partial experimental results are basically consistent with those of the similar studies, which indicates that the proposed test system meets the needs of studying the stability of the surrounding rock and other issues. Furthermore, the results may also provide reference for the related researches.

Key words: tunnel; biaxial loading; similar simulation; model test; digital photogrammetry

0 引 言

地下硐室是岩石力学与工程研究中最重要、最复杂的领域之一^[1], 其中, 深部隧道围岩变形破裂过程与演化机理的研究更是领域内的热点问题, 对围岩稳定性控制有着重要意义。研制一套尺寸适中、双轴加载的隧道物理模拟试验系统, 可为研究深部硐室工程围岩变形过程与演化机理问题提供一个重要的试验研

究平台。

由于岩土工程的复杂性及不确定性, 相似模型试验是相关问题研究的重要手段之一^[2-4]。针对不同研究内容的相似模型试验, 其对应的试验系统也不尽相同。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2016CB46905); 国家自然科学基金项目(51174197)

收稿日期: 2019-10-31

近年来,国内外许多专家、学者对隧(巷)道物理模拟试验系统进行了研制、开发及应用并取得了丰富的成果,但仍然存在一些不足之处,如在加载控制方面,液压加载控制方式虽然加载强度大,稳压时间长,但其属于刚性加载,管路复杂、占据空间大且机械震动明显;再如在模型尺寸方面,大尺寸及超大尺寸模型能较大程度地减小边界效应影响且能够较真实地反映工程地质条件,但其研究、设计和制作周期长、费用高、利用率偏低。在中、小型隧道工程物理模拟试验系统中^[5],山东大学研制的高地应力真三维加载模型试验系统^[6]采用双缸回油卸压方式,可实现模型加、卸载试验,能自动进行试验模型的独立、同步真三维加载,模型尺寸为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$,可最大加荷 2000 kN ,其试验结果有效揭示了深部巷道围岩分区破裂的形成条件和破坏规律,但油压加载系统控制精确度较低且难免出现回油、漏油等问题,类似的还有国立首尔大学研制的平面应变隧道试验系统^[7],其外观尺寸为 $1500\text{ mm}\times 1500\text{ mm}\times 200\text{ mm}$,模型尺寸可根据研究需要进行改变,其采用液压加载控制方式可实现双轴加载;北京交通大学研制的隧道施工模拟平面应变模型试验系统^[8],由试验台架、加载系统、围岩压力监测系统、DSCM监测系统组成,其中加载系统有气囊和油压千斤顶两套加载系统可供选用,模型尺寸为 $1000\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 1620\text{ mm}$,但它只能在模型上端部进行加载,不能更好地模拟深部隧道地应力情况;伊朗大不里士大学研制的隧道模型离心试验系统^[9],采用液压千斤顶对隧道垂直正断层方向施加位移,对尺寸为 $700\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的隧道模型变形破坏机理进行了研究分析,但该装置结构复杂、费用及功耗较高,且油压千斤顶加载影响系统的平稳性及正确性。

针对试验系统中液压加载方式存在的不足问题,笔者此前研制了一套电机加载的小型隧道物理模拟试验系统^[10],主要由主机框架、全数字测量控制系统、轮辐式负荷传感器、伺服电机及驱动器加载系统、电动缸—丝杠—减速器传动系统、光栅尺等组成,最大轴向加载为 100 kN ,模型尺寸为 $400\text{ mm}\times 350\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,可采用透明岩体相似材料与数字照相量测技术对模型内部变形进行量测,但该试验系统为单轴加载,且加载强度偏低,本文研制的试验机是在该机基础上进行的优化升级,其加载维数由原来的单轴型升级为双轴型并可模拟深部隧(巷)道水平应力大于垂直应力的原岩应力场,最大加载由原来的 100 kN 升级为 300 kN ,试验模型的尺寸范围较之前更大。

基于试验加载控制方式与模型尺寸及其精确加载和利用效率等方面的综合考虑,本文研制了基于电机双轴加载的中小型隧道物理模拟试验系统,可对较大

埋深范围的隧(巷)道变形破裂演变及其机理问题进行模型试验研究。

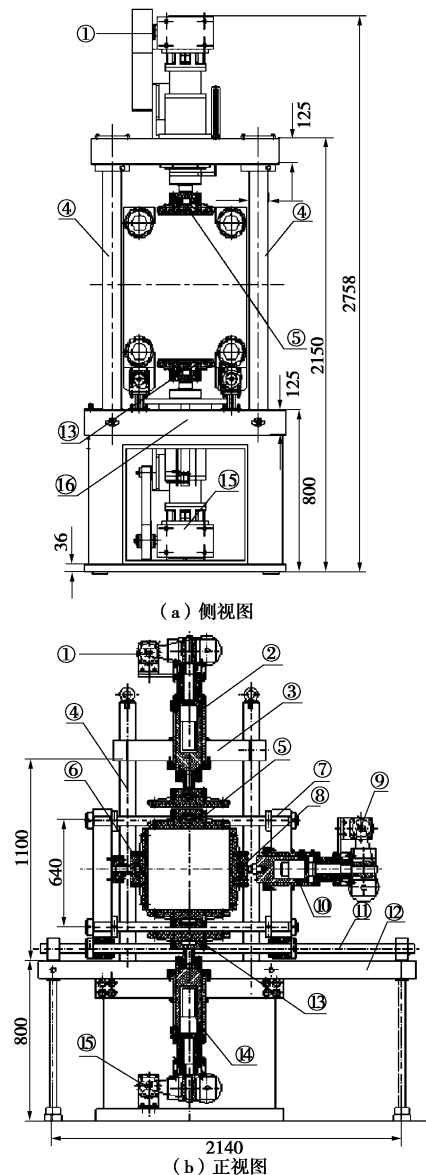
1 试验机系统设计与研制

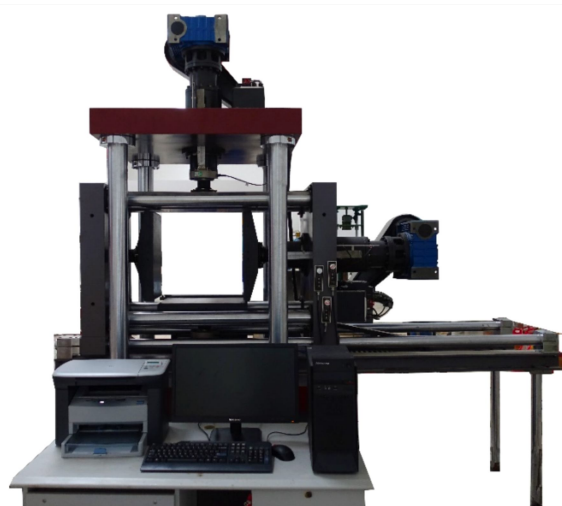
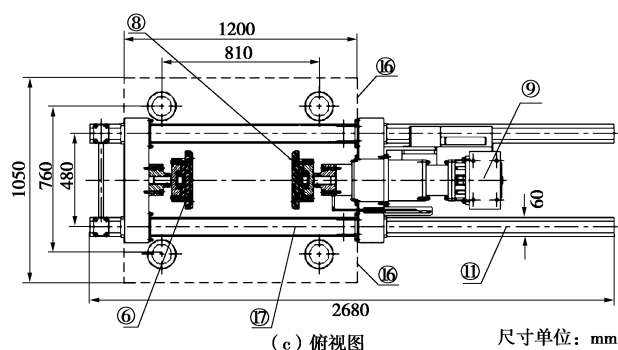
1.1 结构框架

图1为试验系统结构设计与实物图。

试验系统结构框架主要由垂直向双加载系统与水平向自适应调中单加载系统组成。

垂直向双加载系统由工作平台、四立柱、上横梁、两套机电式活塞加载器构成。机电式活塞加载器安装在工作台和上横梁中央,机电式活塞加载器由交流伺服电机、同步带传动系统、蜗轮蜗杆减速机、直径为 $\Phi 80\text{ mm}$ 的滚珠丝杠副、内镶自润滑轴承的导向缸、电动式直线加载活塞(配有限位开关)、传感器和压板组件组成。其中,本试验系统配有的压板有两种结构形式,一种是定位紧固型,用于定位和平行压缩,另一种是内镶自润滑关节轴承的自动调心型,用于压板面与模型紧密接触使应力均匀分布。





(d) 实物图
注: ①-上伺服电机; ②-上电动加载缸; ③-上横梁; ④-立柱;
⑤-上加载板; ⑥-水平被动加载板; ⑦-四杠式水平加载框架;
⑧-水平主动加载板; ⑨-水平伺服电机; ⑩-水平电动加载缸;
⑪-水平导轨; ⑫-水平支撑框架; ⑬-下加载板; ⑭-下电动加载缸;
⑮-下伺服电机; ⑯-工作平台; ⑰-光杠

图1 试验系统结构设计及实物图

Fig. 1 Diagram and photo of testing system

水平向自适应调中单向加载系统是由四杠式水平加载框架、水平导轨及水平支撑框架构成。其中四杠式水平加载框架两侧承载板用4根光杠联接而成,左、右两侧承载板分别固定有水平被动加载板和水平主动加载板。四杠式水平加载框架可沿水平导轨自由移动,也可用卡环定位在水平导轨预定位置,根据试验需求,四杠式水平加载框架可通过水平导轨推出主机中心,以增加试验空间。

1.2 工作原理

试验加载系统采用伺服电机作为动力源,垂直方向上、下各有一支加载缸,水平方向采用一支加载缸。通过减速机构—丝杠传动—载荷施加压板在垂直、水平两方向同时对模型进行加载。水平向自适应调中单向加载系统在加载过程中,当水平主动加载板向模型中心方向(向左)靠近并接触模型后,模型予以水平主动加载板反作用力并带动四杠式水平加载框架移动,使水平被动加载板向模型中心方向(向右)靠近并接触模型后,产生同主动加载板大小相等但方向相反的作用力,以保证模型几何中心基本不发生变化,

从而满足对称加载的试验要求。垂直向双加载系统及水平向自适应调中单向加载系统可分别控制,也可协调控制。加载框架采用模块化结构,水平向自适应调中单向加载系统可方便移出主加载空间,试验系统可根据试验需求进行单轴或双轴加载。

1.3 系统特色及技术指标

该试验系统主要有以下5方面的特色:

(1) 加载结构: 具有3个主动加载点,垂直方向上、下各一点,水平方向单侧一点,其加载几何中心的偏移量通过四杠式水平加载框架来保证,可进行单轴、双轴加载试验且切换操作方便。

(2) 加载方式: 采用伺服电机加载,可实现按力和位移两种控制方式的单轴单、双向及双轴加载功能。

(3) 框架结构: 主机框架采用四立柱竖直加载框架与四杠式水平加载框架,结构紧凑且加载空间可视范围大,方便数字照相变形观测。

(4) 平衡系统: 水平向自适应调中单向加载系统独立于垂直向双加载系统,水平向仅需采用一个电动加载缸即可实现在模型几何中心基本保持不变的情况下满足对称加载的试验需求。

(5) 试验模型: 模型尺寸长×高×宽最大为600 mm×600 mm×400 mm,除了能完成尺寸相对较大的相似模型试验研究外,还能与其他小部件配合实现小尺寸类岩石材料的标准或非标准试件的单轴与双轴压缩等试验。

系统主要技术指标如下:

(1) 垂直方向试验力为2×300 (300 kN/活塞),水平方向试验力为300 (300 kN/活塞),加载力值精度为±1%。

(2) 速度调节范围0.005~100 mm/min (无级调速),匀试验力速率控制误差为±0.5%,速度示值相对误差为±0.5%。

(3) 单个加载点工作行程: 0~100 mm,加载点位移分辨率为0.001 mm,位移示值相对误差为±0.5%。

(4) 连续稳压试验时间为≥480 h,稳压精度为±1%。

(5) 试样几何中心变动量≤0.5 mm。

2 隧道试验模拟方法

2.1 模型制作

针对相似模型试验和试件试验,笔者设计了一套隧道模型箱和试件制作模具。

(1) 相似模型

既有研究表明,以河沙为骨料和石蜡为胶结剂的混合物较其它相似模拟材料具有良好的塑性,更加适

合模拟隧道围岩变形特征, 且具有试验周期短、材料力学性能稳定和材料可复用等优点^[11]。因此, 本文在相似模型试验中采用不同配比的砂和石蜡混合物来模拟实际工程中的软、硬围岩。

试验模型箱采用“外围钢框架+有机玻璃板”结构, 如图2所示, 其中外围钢框架由8根直径为 $\Phi 20$ mm 螺杆、4块20 mm 厚的切割钢板和固定底座构成, 玻璃板材质为有机玻璃, 分别在模型箱外围钢框架底部、前、后、左、右各布置一块玻璃板组成“开口玻璃箱”。钢框架后板及后部玻璃板分别开有一直径为 $\Phi 150$ mm、 $\Phi 80$ mm 的圆孔, 用以隧道开挖工作, 在进行开挖工作之前, 用“十字架”封孔铁盘将圆孔封住, 框架前板留有相应视窗, 用以数字照相观测。

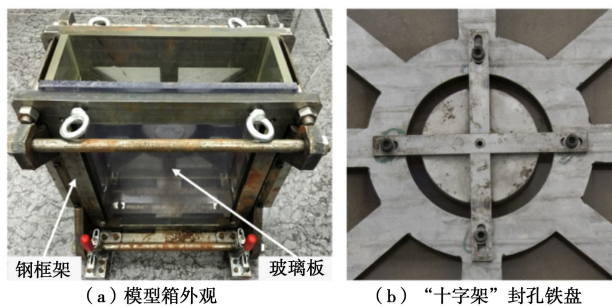


图2 模型箱实物图

Fig. 2 Photos of model box

模型采用分层多次浇筑碾压成型的方法, 制作过程包括材料称重混合、加热搅拌、摊铺碾压、埋设传感器等。模型制作完成后, 放置1~2 d 完全冷却后, 方可继续开展加载、开挖等试验操作。

(2) 试件模型

石膏是岩土工程物理模型试验制作的常用材料之一, 石膏作为类岩石材料具有力学性能稳定、模型制作方便、表面光滑便于制斑与照相观测等优点。所以, 本文的类岩石试件采用石膏制作。

试件制作模具由底座、四周侧板以及直径为 $\Phi 40$ mm 圆柱体等附件组成, 模具内边尺寸长 \times 高 \times 宽为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 45\text{ mm}$, 其中底座与侧板采用质量较轻、强度较大的10 mm 厚铝合金板加工而成。试件模型的制作包括材料称重、混合搅拌、浇筑振捣、脱模养护和表面喷漆制斑等过程。试件模具见图3所示。

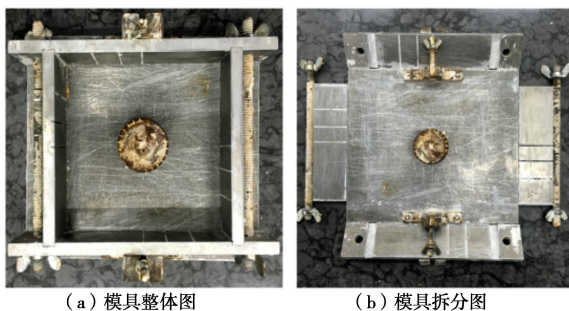


图3 试件模具图

Fig. 3 Mold of specimen

2.2 加载方法

隧道相似模型试验通常有先加载后开挖和先开挖后加载两种加载方式, 两种加载方式的边界条件和加载路径不同, 自然会对试验结果有不同的影响。为了更贴近实际工程中深部隧道围岩应力演化过程, 本试验采用先加载后开挖的加载方式, 即先通过伺服电机控制系统控制模型边界加载, 按力控制加载方式将垂直向与水平向荷载加载至设计值, 保载一定时间待围岩内部应力传递调整完成后, 采用位移控制加载方式对隧道模型顶端进行加载, 直至隧道围岩失稳破坏。

2.3 开挖装置

隧道模型开挖采用自行研制的隧道掘进机模拟试验装置, 包括动力装置、空心钻杆、刀盘和螺旋叶片等。其中掘进机由电机驱动, 并通过减速开关调节掘进速度。空心钻杆长度可根据试验要求进行调节, 空心钻杆前端固定有直径为 $\Phi 75$ mm 的刀盘, 刀盘后部的空心钻杆沿轴向延伸固定有螺旋叶片, 其中输出轴、镂空钻杆、空心钻杆和刀盘在同一轴线上, 隧道掘进机装置及开挖过程见图4。待加载至设计荷载, 保载一定时间后, 拆下“十字架”封孔铁盘, 隧道全断面一次完成开挖。

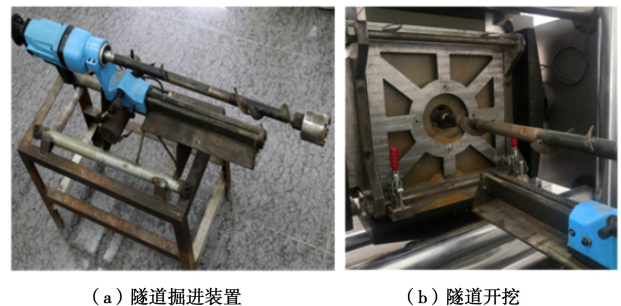


图4 隧道掘进装置及开挖示意图

Fig. 4 Tunnel-boring machine and schematic of excavation

2.4 量测方法

数字照相量测作为非接触和全场精细变形量测的先进技术, 在岩土材料变形演变的过程观测和定性定量分析方面具有突出的优越性。

数字照相量测系统由图像采集设备、照明装置和图像分析程序组成。本文试验采用笔者自行研制的数字照相变形量测软件系统, 包括图像分析程序 PhotoInfor 和结果后处理程序 PostViewer 两部分^[12]。实践证明, 采用有效像素为1020万像素的数码相机在一般岩土模型试验中, 数字照相量测能够识别0.02 mm 以下的微小位移^[13], 其量测精度完全满足常规岩土工程相似模型试验的精度要求。

3 应用实例

3.1 相似模型试验

为研究深部复合地层无支护条件下隧道围岩变形破裂规律，同时检验试验机的基本功能，进行了一组隧道相似模型试验。根据相似理论，取几何相似比 $C_L=86$ ，设计模型尺寸长×高×宽为 400 mm×400 mm×120 mm，隧道开挖直径为 $\Phi 75$ mm。根据模型强度的相似要求，选用质量配比为 100：3 和 100：7 的砂和石蜡混合物分别模拟泥岩（软岩）和砂岩（硬岩），相似材料的岩石力学参数见表 1。相似模型试验地层模型如图 5 所示。

表 1 岩石力学参数

岩石类型	Table 1 Mechanical parameters of rock				
	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	密度 ρ /(kg·m ⁻³)
软岩	0.20	0.05	0.19	0.29	1452
硬岩	0.58	0.09	0.51	0.26	1529

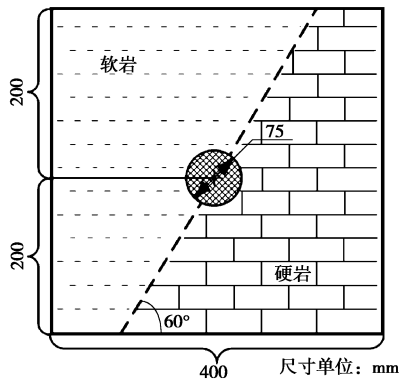
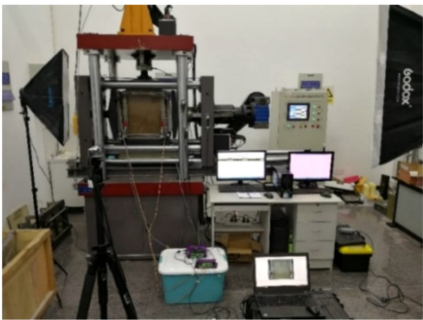


图 5 相似模型试验地层模型图

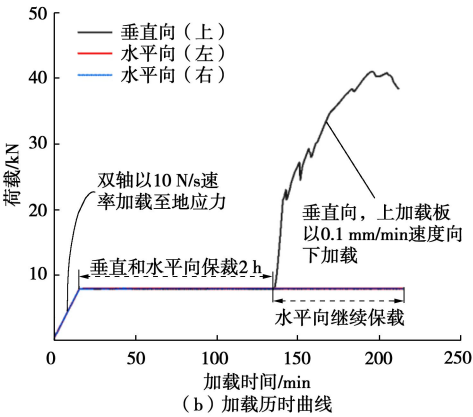
Fig. 5 Formation combination of simulation experiments

模型采用分层浇筑碾压成型的方法，隧道开挖采用前文所述隧道掘进装置，先以 10 N/s 速率将垂直向与水平向荷载同时加至设计地应力 0.17 MPa（对应实际地应力 20.0 MPa），保载 2 h 后，保持水平荷载不变，然后上加载板以 0.1 mm/min 的加载速度向下加载，直至模型破坏。围岩表面位移量测采用数字照相量测技术，图像采集选用德国 Basler AG 公司生产的工业相机，图像分辨率为 1220 万像素。试验系统布置及加载历时曲线如图 6 所示。

限于篇幅，这里仅给出隧道开挖后上部荷载加至 0.80 MPa 及围岩发生破裂时的围岩图像和分析结果，见表 2。在竖向荷载为 0.80 MPa 情况下，围岩位移矢量及位移云图沿软、硬岩分界面（虚线）切分为有明显区别的两部分，软岩部分位移矢量整体表现向下位



(a) 试验系统布置



(b) 加载历时曲线

图 6 模型试验系统布置及加载历时曲线图

Fig. 6 Layout of similar model test system and characteristic curves of loading curves

移趋势，而硬岩部分位移矢量在压应力的作用下，整体表现向右下方向位移趋势，如表 2 中空心箭头标示，且软岩部分较硬岩部分位移变化更为明显。

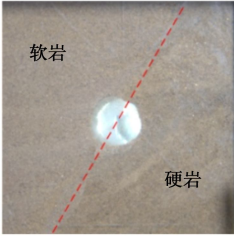
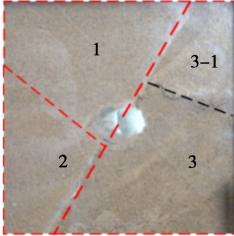
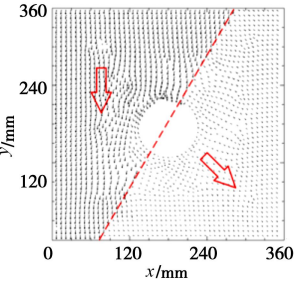
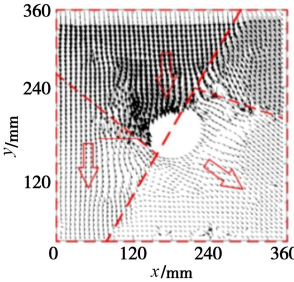
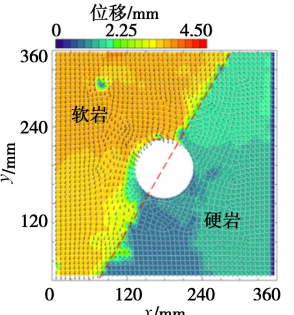
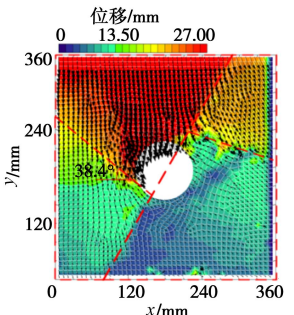
如表 2 所示，为了更加形象地表述，用虚线框将围岩发生破裂时的图像分为 3 部分，第 1 部分围岩沿左侧拱腰斜向上 38.4° 近似直线及软、硬岩分界面有向隧道内滑动的趋势；第 2 部分围岩整体表现向下位移趋势；第 3 部分围岩在压力的作用下整体表现为向右下位移趋势，但其右上角 3-1 部分位移变化更为明显，分析原因可能是随着竖向荷载的增大，垂直于软、硬岩接触面向下的压应力分量也随之增大，当 3-1 下边界处围岩应力超过其围岩屈服强度时，产生裂缝，致使 3-1 部分围岩成为独立部分，位移变化更明显。

3.2 试件模型试验

本试验采用初凝时间约为 6 min，细度约为 1500 目的高强石膏，选用水膏比为 0.5：1 的配比，通过基本力学试验，获得的模型材料的基本力学参数见表 3。

试件为含 $\Phi 40$ mm 圆孔的 150 mm×150 mm×45 mm 方形板状。单轴压缩试验采用位移控制双向协调加载方式，即试验机上、下加载板均以 0.05 mm/min 的速度对试件进行加载；双轴压缩试验中，先以 10 N/s 速率将垂直向与水平向荷载同时加至 3.0 MPa，保持

表 2 复合地层围岩破坏及分析
Table 2 Analysis of surrounding rock in mix strata

类型	试验过程中	围岩破裂时
围岩图像		
		
		

水平荷载不变, 竖向上、下加载板以 0.1 mm/min 的相对速度协调加载, 直至试件破坏。单双轴试验加载历时曲线如图 7 所示。

表 3 模型材料基本力学参数

Table 4 Basic mechanical parameters of model materials				
抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
7.82	2.16	0.12	2.40	18.4

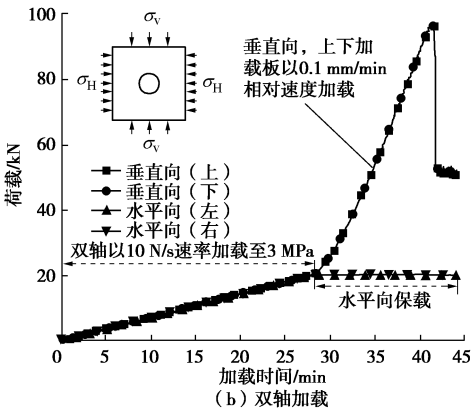
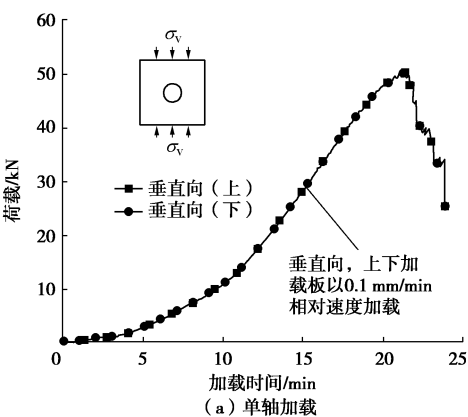


图 7 单双轴试验加载历时曲线

Fig. 7 Stress-time curves of uniaxial and biaxial compression tests

(1) 单轴压缩破坏特点

位移矢量图能很好地反映试件在压缩过程中的变形特点, 图 8 为单轴压缩条件下试件破坏模式与位移矢量图, 图 8 (b) 中箭头表示试件表面位移方向, 箭头长短表示位移量的大小。为了更加清晰地反映位移大小, 对位移矢量的大小进行了同比例放大, 并在图中绘制了宏观裂纹两侧的位移趋势, 用空心箭头表示, 并用实心箭头分别表示沿裂纹垂向和切向的位移分量。

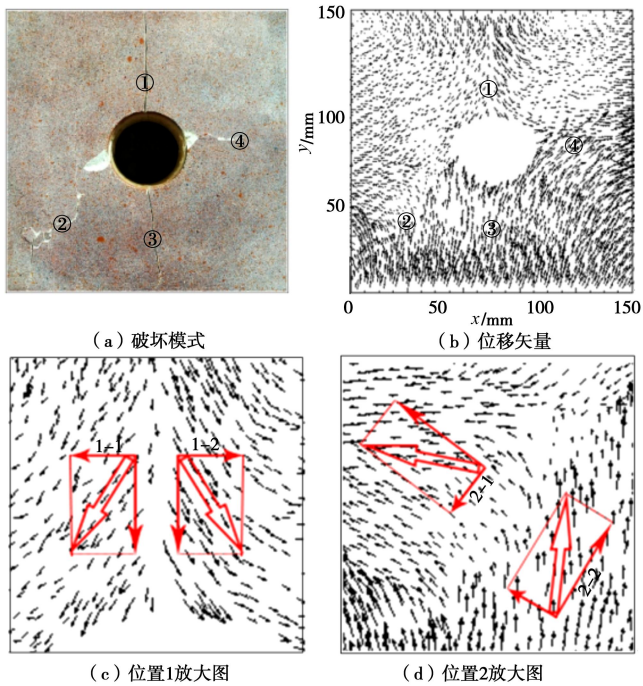


图 8 单轴压缩试件破坏模式与位移矢量图

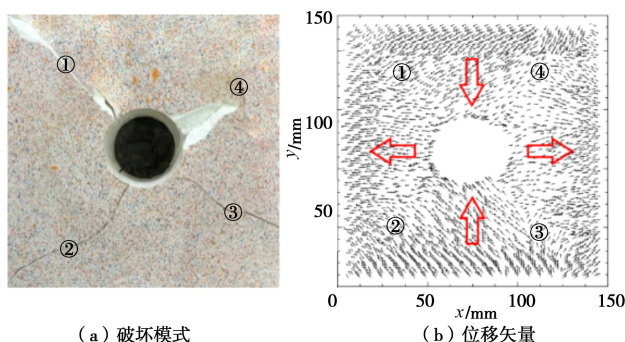
Fig. 8 Failure modes of uniaxial compression and diagram of displacement vector

如图 8 (c) 所示, 孔洞上部区域在向下位移过程中, 裂缝①两侧位移矢量沿裂缝垂向的分量 1-1 和 1-2, 在拉应力的作用下相互背离, 当拉应力大于该处的抗拉强度的时候, 产生拉伸裂纹。如图 8 (d) 所示, 裂缝②两侧位移矢量沿裂缝切向的分量 2-1 和 2-2, 在

剪应力的作用下有相反位移趋势,当剪应力超过该处的抗剪强度时,产生剪切裂纹。裂缝③与裂缝①,裂缝④与裂缝②产生原因接近一致,在此不作赘述。如图 8(a)所示,试件宏观裂缝与位移矢量图裂缝位置一一对应。

(2) 双轴压缩破坏特点

在双向荷载作用下,如图 9(b)所示,圆形孔洞上下区域有向靠近孔洞方向位移趋势,左右区域向背离孔洞方向发生位移。在该侧压条件下,双轴压缩破坏模式同单轴压缩破坏模式具有类似性,但和单轴压缩破裂模式相比,由于侧压的作用,限制了孔洞上下部分拉伸裂纹的出现及发展,同时又减小了试件的水平向变形,试件整体表现为类 X 型(图 9(a))剪切破坏。



(a) 破坏模式

(b) 位移矢量

图 9 双轴压缩试件破坏模式与位移矢量图

Fig. 9 Failure modes of biaxial compression and diagram of displacement vector

含孔洞类岩石单、双轴压缩下的试件破坏模式同相关学者所做的含圆孔岩石单、双轴压缩 PFC 颗粒流模拟研究的结果^[14]具有部分一致性,其对比如表 4 所示。

表 4 本文试件破坏模式与既有研究对比

Table 4 Comparison of sample failure modes with previous studies

试验	PFC 模拟结果 ^[14]	本文试验结果
单轴压缩		
双轴压缩		

由表 4 可看出,本文双轴压缩试验试件破坏呈类 X 型剪切破坏模式同既有 PFC 颗粒流模拟的结果总体

规律表现一致,单轴压缩试验试件破坏模式未呈现较好的对称性,裂缝位置及其扩展范围同 PFC 颗粒流模拟的结果有所差异,可能是本文试件不均匀性且孔洞直径较大所致。

4 结 论

(1)自行研制了中小型电机双轴加载隧道相似模拟试验系统,其由加载试验机核心系统及其配套的隧道模型箱、开挖掘进和数字照相变形量测等辅助装置与测试系统组成。

(2)加载试验机采用稳压效果较好且易于精确控制的伺服电机作为动力源,共有 3 个可独立工作的主动加载点,可实现单轴单、双向及双轴加载功能,能较好地模拟深部地下工程复杂的受力环境。

(3)试验系统为结构紧凑、占地空间小的框架式结构,由相互独立、互不影响的垂直向双加载系统和水平向自适应调中单加载系统组成。水平向可实现在模型几何中心基本不发生改变的情况下精确对称加载。

(4)试验系统应用范围较为灵活,既可满足尺寸相对较大、不同埋深的隧道相似模型试验要求,又可进行尺寸相对较小的类岩石材料试件的单、双轴压缩试验研究。

(5)初步试验应用与对比分析表明,利用本套试验系统获得的部分试验结果与相关研究成果基本一致,表明本试验系统具有可靠性,可为研究隧道围岩变形破裂过程及演化机理等问题提供有效的试验平台支持。

参考文献:

- [1] 李术才,刘 钦,李利平,等. 隧道施工过程大比尺模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1368 - 1374. (LI Shu-cai, LIU Qin, LI Li-ping, et al. Development of large-scale geomechanical model test system for tunnel construction and it's application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1368 - 1374. (in Chinese))
- [2] 沈 泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(5): 32 - 36. (SHEN Tai. Development of geomechanic model experiment techniques[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(5): 32 - 36. (in Chinese))
- [3] 陈安敏,顾金才,沈 俊,等. 岩土工程多功能模拟试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 372 - 378. (CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al.

- Development and application of multifunctional apparatus for geotechnical engineering model tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 372 - 378. (in Chinese))
- [4] 王汉鹏, 李术才, 郑学芬, 等. 地质力学模型试验新技术研究进展及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2765 - 2771. (WANG Han-peng, LI Shu-cai, ZHENG Xue-fen, et al. Geo-mechanical model test new technology research development and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2765 - 2771. (in Chinese))
- [5] 李元海, 杜建明, 刘毅. 隧道工程物理模拟试验技术现状与趋势分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, **38**(1): 11 - 21. (LI Yuan-hai, DU Jian-ming, LIU Yi. The present situation and development trend of physical simulation experiment technology about tunnel engineering[J]. Tunnel Construction, 2018, **38**(1): 11 - 21. (in Chinese))
- [6] 张强勇, 陈旭光, 林波, 等. 高地应力真三维加载模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1588 - 1593. (ZHANG Qiang-yong, CHEN Guang-xu, LIN Bo, et al. Development and application of high-geostress true 3D loading geomechanics model test system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1588 - 1593. (in Chinese))
- [7] SEOKWON J, JONGWOO K, YOUNGHO S, et al. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock a scaled model test and numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(3): 1 - 6.
- [8] 李英杰, 张顶立, 宋义敏, 等. 软弱破碎深埋隧道围岩渐进性破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1138 - 1147. (LI Ying-jie, ZHANG Ding-li, SONG Yi-min, et al. Experimental research of progressive damage of surrounding rock for soft fractured deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1138 - 1147. (in Chinese))
- [9] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 108 - 119.
- [10] 李元海, 林志斌. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2030 - 2039. (LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin. Innovative experimental method based on development of transparent rock mass materials for physical tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 2030 - 2039. (in Chinese))
- [11] LI Y H, TANG X J, YANG S, et al. Evolution of the broken rock zone in the mixed ground tunnel based on the DSCM[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **84**: 248 - 258.
- [12] 李元海, 靖洪文, 曾庆友. 岩土工程数字照相量测软件系统开发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3859 - 3866. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZENG Qing-you. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3859 - 3866. (in Chinese))
- [13] 张乾兵, 朱维申, 孙林锋, 等. 数字照相量测在大型洞群模型试验中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 447 - 452. (ZHANG Qian-bing, ZHU Wei-shen, SUN Lin-feng, et al. Application of digital photogrammetric techniques in 3D model tests on large caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 447 - 452. (in Chinese))
- [14] 黎崇金, 李夕兵, 李地元. 含孔洞大理石岩破坏特性的颗粒流分析[J]. 工程科学学报, 2017, **39**(12): 1791 - 1801. (LI Chong-jin, LI Xi-bing, LI Di-yuan. Particle flow analysis of fracture characteristics of marble with a single hole[J]. Journal of Engineering Science, 2017, **39**(12): 1791 - 1801. (in Chinese))