

超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程 三维地质力学模型试验研究

李利平^{1,2}, 李术才¹, 赵勇³, 李树忱¹, 王汉鹏¹, 刘钦¹, 赵岩¹, 原小帅¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 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 221008;
3. 铁道部工程设计鉴定中心 桥隧咨询部, 北京 100038)

摘要: 为研究超大断面隧道围岩随埋深逐渐增加的渐进性破坏过程, 通过大型三维均匀梯度加载地质力学模型试验系统和软弱破碎围岩及其支护系统相似材料的研制, 开展大跨度隧道围岩随埋深逐渐增加渐进破坏过程的大比尺模型试验, 真实再现全断面和台阶法开挖段周围岩及掌子面保留段软弱破碎围岩渐进破坏的全过程。首先, 以一定范围内埋深(200~1 020 m)的双线大跨度隧道软弱破碎围岩(铁路隧道 V 级)为研究对象, 采用铁晶粉、松香、石英砂、重晶石粉以及聚四氟乙烯棒等原料研制出具有应变软化特性的软弱破碎围岩、初喷混凝土以及锚杆等相似材料, 并配以能实现精细开挖和支护施作的微型设备及其配套工艺, 通过可实现三面均匀同步加载的大型三维地质力学模型试验台架模拟隧道全断面和台阶法施工的全过程, 并采用光纤光栅传感器、电阻式应变计、多点位移计以及微型压力盒全程监测隧道洞壁及其整数倍洞径(0~3 倍)范围内围岩的应力、位移以及近区荷载的变化信息; 然后, 对隧道全断面和台阶法开挖段以及掌子面保留段围岩进行超载试验, 按 50 m 埋深等荷加载改变隧道埋深, 直至隧道全断面无支护段围岩开始出现明显破裂特征, 然后再按 20 m 埋深等荷加载缓慢增加隧道埋深, 直至隧道全断面和台阶法支护段初喷混凝土大面积破坏脱落。试验结果表明: (1) 在埋深不断增加过程中, 隧道围岩破坏区域呈渐进扩大趋势, 全断面无支护段周边围岩最早发生破坏, 然后依次扩展至全断面支护段初喷混凝土和台阶法支护段初喷混凝土, 最终破坏区面积顺次由大到小; (2) 无支护段围岩破坏区和支护段衬砌结构破坏区均主要集中在拱顶上方区域, 是衬砌结构破坏和围岩塌落荷载的主要来源, 两侧边墙也存在局部破坏区, 自边墙上部至拱角部位破坏程度逐渐加剧; (3) 在埋深增加过程中, 支护段围岩位移增长率小于无支护段, 应力和荷载增长率恰相反, 支护结构承载效应明显; (4) 超载过程中, 围岩的破坏深度不断增加, 尤其是拱部呈现动态压力拱现象, 据此确定顶部加固范围在理论上具有可行性。研究的方法技术及结果将对类似工程研究具有一定的指导和借鉴意义。

关键词: 隧道工程; 超大断面隧道; 软弱破碎围岩; 渐进破坏过程; 模型试验; 演变规律

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)03 - 0550 - 11

3D GEOMECHANICAL MODEL FOR PROGRESSIVE FAILURE PROGRESS OF WEAK BROKEN SURROUNDING ROCK IN SUPER LARGE SECTION TUNNEL

LI Liping^{1, 2}, LI Shucai¹, ZHAO Yong³, LI Shuchen¹, WANG Hanpeng¹,
LIU Qin¹, ZHAO Yan¹, YUAN Xiaoshuai¹

(1. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*; 2. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China*; 3. *Consulting Department of Bridge and Tunnel, Identification Center for Engineering Design of Ministry of Railways, Beijing 100038, China*)

收稿日期: 2011 - 08 - 27; **修回日期:** 2011 - 11 - 25

基金项目: 铁道部科技研究开发计划资助项目(2009G005 - C); 国家自然科学基金资助项目(51009085); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1105)

作者简介: 李利平(1981 -), 男, 博士, 2004 年毕业于山东科技大学工程力学专业, 现任讲师、硕士生导师, 主要从事地下工程地质灾害灾变机制与控制方面的教学与研究工作。E-mail: yuliyangfan@163.com。通讯作者: 李术才(1965 -), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: lishucai@sdu.edu.cn

Abstract: To investigate the progressive failure progress of rock mass with increase of buried depth in super section tunnel, a 3D geomechanical model test system with homogeneous gradient loading and similar material of weak broken surrounding rock and support system were developed. Then the 3D model test was carried out which showed the progressive failure progress of weak broken surrounding rock of entire section method and bench method. Firstly, the weak broken surrounding rock in a range of 200 – 1 020 m in depth was taken as an example. The strain softening behavior of weak broken surrounding rock and shotcrete can be simulated by different proportion mixtures of iron powder, quartz sand, barite powder and rosin alcohol solutions. Polytef sticks can be used to simulate the bolts. Besides, combining the micro-devices of excavation and construction supporting the construction progress of entire section method and bench method can be well simulated by the 3D model. In addition, the changing information of stresses, displacements and loads in the scope of entire times of the tunnel diameter(0 – 3 times) can be monitored by fiber grating sensors, resistance strain gauge, multipoint extensometer and micro pressure cells. Secondly, an overloading test was carried out after the end of excavation. The loading gradient was 50 m on the direction of the burial depth until the significant failure characteristics occurred in the no supporting sections. Then the loading gradient was changed to 20 m until the initial shotcrete damaged in large areas. The test results show: (1) The failure zones of rock masses expand with the increase of the burial depth. The no supporting sections fail earliest. Then the failure zones extend to the supporting sections. And the final areas of failure zones decrease gradually. (2) The failure zones of rock masses of no supporting sections and the liner failure zones of supporting sections mainly focus on the crown which is the load sources of the liner failure and the collapse of the surrounding rock. There also exist failure zones on the side walls. The degree of damage increases from the upper part of the side wall to the skewback. (3) The growth rate of displacements in supporting sections is smaller than that in no supporting sections with the increase of burial depth. However, the growth rate of stresses and loads are just opposite. The supporting structures burden the loads obviously. (4) The failure depth of surrounding rocks increase continually in the overloading test. The dynamic pressure arching phenomenon occurs in the scope of crown. Hence, the top reinforcement theory is feasible in theory. The research methods and results will instruct similar engineering.

Key words: tunnelling engineering; super large section tunnel; weak broken surrounding rock; progressive failure progress; model test; evolution law

1 引言

近些年来,我国铁路和公路建设事业蓬勃发展,修建技术得到了长足的进步,西部大开发战略的实施极大程度上加速了交通隧道向长、大、深方向的发展趋势。由于我国山地和丘陵地区占据国土面积的 75%左右,且西部多岩溶地区,高埋深条件下大断面隧道的修建极易引起塌方、涌水以及岩溶塌陷等大型地质灾害^[1-6]。其中,因围岩失稳破坏造成的塌方事故已成为隧道施工过程中最常见的灾害现象之一,且时常伴随淤泥等堆积体外泄、涌水以及间歇性危岩掉块等次生灾害现象^[4],轻则中断施工,重则造成隧道废弃易址,更甚者造成重大经济损失和人员伤亡^[1]。从历年来隧道塌方实例统计^[3]来看,地质条件是导致塌方发生的主要诱因,尤其是对于极软弱破碎围岩的地层,深埋条件下通常发生拱形

塌方形式^[5]。目前,关于隧道塌方的相关研究多集中在治理措施及原因分析上,对隧道塌方破坏机制及不同开挖条件下围岩渐进性破坏过程尚未有系统的研究。因此,随着越来越多的大断面铁路和公路隧道的修建,深埋、高地应力条件下,极软弱破碎围岩隧道的稳定性状况、渐进性破坏形态以及破坏机制等问题逐渐成为急需解决的科学问题,该方面的研究对大断面隧道塌方事故的预防和治理具有重要的工程价值和现实意义。

实质上,隧道围岩破坏是一个渐进性的破坏过程,该过程自原岩因开挖卸荷导致围岩应力重分布并伴随应变弱化而逐渐劣化直至破坏发生^[7-12]。地质力学模型试验和数值模拟是解决此类问题的主要研究方法^[13-16]。在数值计算分析方面,非连续体分析方法算法复杂,诸如 UDEC, DDA 等,不适合极软弱破碎岩体的稳定性分析。连续体分析方法则难以建立合适的岩体破坏准则,诸如 FLAC, ANASYS

等, 仅能通过应变软化模型或弱化强度参数的方法近似模拟岩体渐进破坏的过程。但通过该方法仍获得了一些有益的结论, 发现裂隙岩体隧道的渐进破坏模式受节理裂隙倾角影响较大^[17], 含层间错动带的岩质边坡渐进破坏模式可概括为起始于层间错动带的剪切破坏^[18]。在试验方面, 由于难以研制出具有应变软化特性的相似材料, 不能准确反映极软弱破碎围岩的特性, 试验结果往往不尽如人意。且相似材料一般强度较低, 必须通过自行设计流变装置进行其力学性能测试^[19]。此外, 试验装置也具有很大的局限性, 离心机试验可实现围岩塌落形态和过程的模拟^[20-22], 但无法模拟开挖。传统地质力学模型试验装置大多模拟尺寸较小, 且试验台架的刚度和液压控制系统难以满足高地应力和均匀梯度加载的精细要求, 并且也难以观察试验过程中洞周围岩的破坏现象和破坏渐进过程。近些年来, 李术才等^[23-26]针对上述问题开展了大量研究, 通过增设滚珠式滑动墙、玻璃观察窗以及内窥装置等方法, 较大地提高了试验的真实性和可视化程度, 但仍需从特性相似材料、真三轴加载以及模型内部可视化等方面予以提高。

为解决以往试验系统上的不足, 本文首先研制了一种具有应变软化特性的软弱破碎围岩的相似材料, 利用自主研发的大型组合式三维均匀梯度加载试验系统, 开展超大断面铁路隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程的模型试验, 分析不同开挖和支护段围岩损伤区及围岩位移、应力和荷载随埋深不断变化的响应规律, 揭示大断面隧道围岩渐进性塌方的破坏机制, 并讨论软弱破碎围岩的破坏特征和失稳判据。

2 均匀梯度加载试验系统的研制

为开展高地应力、大埋深条件下隧道开挖、支护和过载破坏试验, 研制具有全自动均匀梯度加载功能的三维组合式大型地质力学模型试验系统, 该系统具有峰值压力高、稳步加载、长时保压等显著优点, 且自动液压控制系统可实现同步均匀梯度加载。该系统主要由三维组合式钢结构台架和均匀加载液压控制系统两大部分组成(见图 1)。

2.1 三维组合式钢结构台架

模型试验平台主体主要由三维组合式钢结构台架构成, 是进行试验材料堆砌和模型体开挖以及支护的活动场所, 由钢结构试验台架、高强反力架以及减磨耐压装置三部分组成。

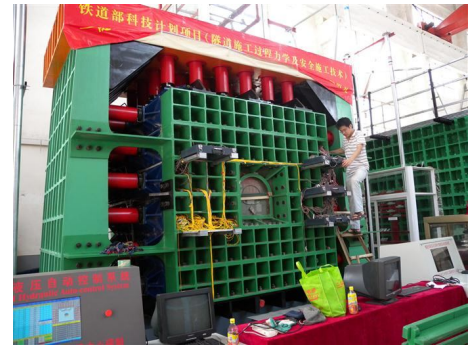


图 1 大型组合式钢结构试验台架

Fig.1 Large-scale test bench of combined steel structure

(1) 钢结构试验台架

钢结构试验台架由数榀可独立操作的高强度合金钢单元框架组合而成, 每榀框架厚 0.5 m, 高 3.25 m, 底部最大长度约 5.2 m, 相邻榀钢通过高强螺栓和法兰将顶梁、侧梁和底梁连接在一起, 配合前后反力墙和液压加载装置, 可适应不同模型尺寸的要求。此外, 单榀可用于开展平面应力和平面应变条件下的模型试验。

(2) 高强反力架

模型台架左右两侧和顶部为加载面, 前后面均为方形反力墙(尺寸为 2.4 m×2.4 m), 由抗冲击韧性和耐腐蚀能力较强的高强度合金钢材料组成。反力墙由长梁组成, 并连接于侧梁, 底部则与模型底板连接。前后反力墙由拉杆相连接, 且均在正中部留设有开挖洞口和透视观察窗, 最大洞径 30 cm, 透视窗口为高强钢化玻璃材料(尺寸为 0.8 m×0.8 m), 可观察洞内围岩变形和破坏现象。

(3) 减磨耐压装置

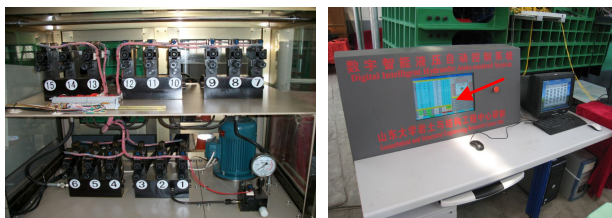
在开挖和过载试验中, 模型体与加荷压板及反力墙的接触面将产生一定的摩擦力, 尤其在过载过程中, 对模型体变形产生不可忽略的约束作用。因此, 在模型体铺设过程中, 四面预置聚四氟乙烯薄膜, 厚度仅 3 mm, 且具有耐高压、耐腐蚀、高润滑和不黏附的特点, 在固体材料中摩擦因数和表面张力最小, 异常光滑, 极少黏附其他物质。此外, 还可通过换置滚珠式滑动墙, 即在模型体表面与结构墙之间设置组合型滚珠群, 其摩擦因数仅为聚四氟乙烯薄膜摩擦因数的 1/30, 最大摩擦因数仅为 0.005, 朱维申等^[16]对此有详细介绍, 不再赘述。

2.2 均匀加载液压控制系统

液压控制系统是通过加载板对模型体进行加载和卸载的控制装置, 由液压控制装置、液压传递装置和液压传力装置三大部分组成。

(1) 液压控制装置

液压控制装置主要包括液压站、控制柜和软件系统三部分(见图 2)。其中，液压站伺服控制液压油进入十五路控制系统，通过液压控制柜实时控制和显示各路系统压力，并由自主开发的软件系统进行数据显示和调控。



(a) 液压站 (b) 控制柜

图 2 液压伺服控制系统

Fig.2 Hydraulic servo control system

(2) 液压传递装置

液压传递装置包括分油器和高压管路，油管内径 7 mm，耐压高达 31.5 MPa。即便各路系统所带的油缸数不尽相同，分油器可确保在压力相等的条件下将液压油输入到十五路控制系统中，通过铜质的耐高压油管和压力变送器连接各个液压千斤顶，从而实现对千斤顶群出力的控制，具体见图 3。



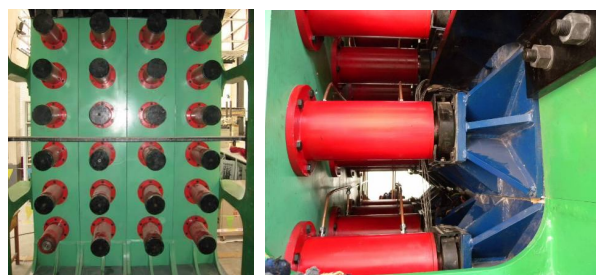
图 3 分油器和高压管路

Fig.3 Hydraulic oil distributor and high pressure piping

(3) 液压传力装置

液压传力装置主要包括千斤顶群、推力器和传压垫块三部分，液压缸与模型上表面之间设两级传力垫块，并在千斤顶和传力垫块之间增设球绞，以实现加载力的调整和均匀加载，千斤顶群见图 4。

两个侧面和顶面共均匀布置千斤顶 72 个，型号为 CL125×80/200，最大工作行程 200 mm，最大推力可达 300 kN，千斤顶顶部安置球绞以使模型表面受力均匀，出力误差在 60~300 kN 范围内不超过荷载量的 3%。工作时，千斤顶通过顶部作用于加



(a) 千金顶板 (b) 千斤顶

图 4 千斤顶群

Fig.4 Jack groups

载单元的传力垫块上来实现整体面加载，可以模拟地应力沿垂向的梯度变化。

2.3 多元信息监测系统

为消除监测方法、仪器和数据处理软件对采集信息造成的差异性，基于光纤光栅传感技术构建了以全自动信息采集的光纤监测系统为核心的多元信息并行实时监测方法，并辅以自主研发和改进的高精度机械式和光栅尺型微型多点位移计、数字图像以及钻孔电视等其他手段，全面捕捉开挖和过载过程中试验材料位移场、应力场以及渗流场等多场信息的微小变化信号和大幅度波动值。

(1) 自主研发的监测方法

① 多元信息光纤监测系统

基于波分复用技术和 F-P 腔解调技术，对光纤光栅传感网络进行优化设计，先后研制了具有体积小、精度高、量程大和成活率高的光纤应力、位移、渗压、温度和微震等波长调制型光无源测试传感器，由多通道光栅解调仪耦合连接，实现多元信息的并行实时同步采集^[23]。同时，通过编制海量数据处理的计算程序，实现对多元信息实时在线数据采集、分析和预警处理。监测系统采用的光纤光栅传感器性能指标见表 1。

表 1 光纤光栅传感器性能指标

Table 1 Performance parameters of fiber bragg grating(FBG) sensors

类型	量程	分辨率	测量误差	接口方式	外观尺寸/mm
光纤应变传感器	-5 000~5 000 $\mu\epsilon$	$\pm 1 \mu\epsilon$	$< 3 \mu\epsilon$	标准 FC 接口	30×30×30
光纤位移传感器	-10~20 mm	$\pm 1 \mu m$	$< 5 \mu m$	标准 FC 接口	$\phi 6 \times 60$
光纤渗压传感器	0~100 kPa	$\pm 20 Pa$	$< 1 kPa$	标准 FC 接口	$\phi 25 \times 50$
光纤温度传感器	-30 $^{\circ}C$ ~100 $^{\circ}C$	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}C$	$< 0.2 \text{ }^{\circ}C$	标准 FC 接口	$\phi 3 \times 40$
光纤微震传感器	10~150 Hz	1 Hz	2 Hz	标准 FC 接口	$\phi 100 \times 60 / \phi 25 \times 50$

② 微型多点位移计

位移是反映围岩稳定性最直观、最易量测准确的物理量之一，除光纤 Bragg 光栅棒式位移传感器外，自主研发了机械式和光栅尺型微型高精度多点位移量测系统，量测精度均可达到 $1\ \mu\text{m}$ 。前者是通过外接数显 TESA 千分表来直接获取岩体内部位移信息，通过电子插送式千分表转换器实现数字全自动实时采集，最大量程可达 $\pm 30\ \text{mm}$ ，机械式微型多点位移计工作原理如图 5 所示；后者通过莫尔条纹测量来显示一对光栅副中的主光栅(标尺光栅)和副光栅(指示光栅)产生的相对位移，量程范围主要取决于光栅尺的类型，光栅尺多点位移计数据采集系统见图 6。

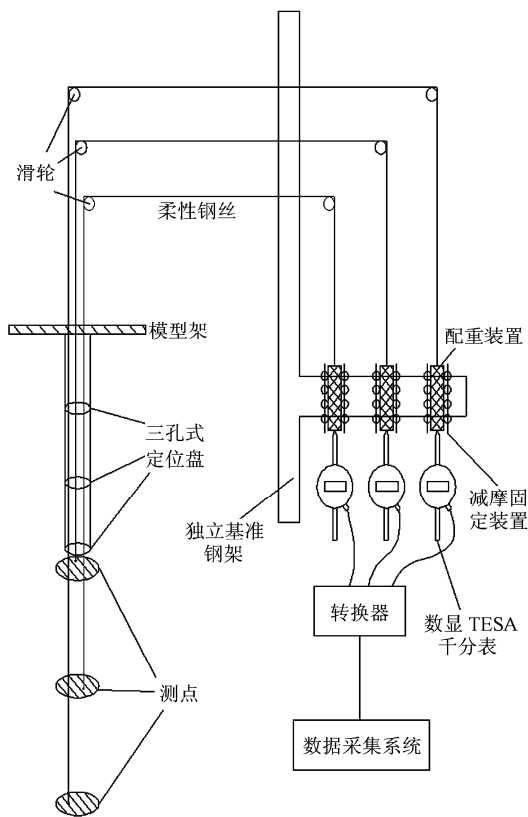
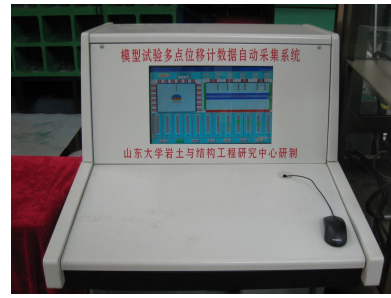


图 5 机械式微型多点位移计工作原理示意图

Fig.5 Schematic diagram for working principle of mechanic miniature multi-point extensometer



(a) 外观图



(b) 显示系统

图 6 光栅尺多点位移计数据采集系统

Fig.6 Grating multi-point displacement meter data acquisition system

(2) 其他辅助监测方法

除以上自主研发的监测元件和设备外，通过改进和购置数字图像仪、高速摄影机以及形变电阻率仪等仪器，观察和记录试验过程中岩体内部及洞室围岩的受力变形和破坏现象。

3 隧道围岩渐进破坏过程模型试验

3.1 试验内容设计

(1) 工程背景

本试验以兰渝线两水隧道为工程背景，取现场监测段 DK357+700~800 为试验段，该段地势较为平缓，埋深范围 190~210 m，主导岩层产状为 $N10^\circ \sim 75^\circ W/30^\circ \sim 65^\circ S$ 。通过现场监测数据位移反分析及查找相关规范，确定试验段及其围岩的基本物理力学参数见表 2。

表 2 软弱破碎围岩基本物理力学参数

Table 2 Basic physico-mechanical parameters of weak broken surrounding rock

介质	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松 比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
地层围岩	2.50	15.00	2.000 0	0.35	1.500	37
相似材料	2.46~ 2.58	0.28~ 0.32	0.038 4~ 0.043 9	0.33~ 0.36	0.028~ 0.031	36~41
相似比	1 : 1	1 : 50	1 : 50	1 : 1	1 : 50	1 : 1

隧道洞身主要穿越薄层炭质千枚岩极破碎地层，局部夹有板岩，褶皱发育，薄片、薄层状岩层被节理切割成碎块状，且有少量裂隙水出现，开挖后成粉末状，围岩遇水明显软化松散，岩体破碎完整性较差，极易坍塌失稳。

(2) 试验内容

模型体尺寸为 $2.0\ \text{m} \times 2.4\ \text{m} \times 2.4\ \text{m}$ (长 \times 宽 \times 高)，几何相似比、应力相似比均取 1 : 50，容重相似比

1:1。开挖位置位于模型体中部，满足边界条件的要求。开挖设计断面为 250 km/h 客运专线，实际净空面积为 110 m²，属超大断面铁路双线隧道。隧道模拟开挖长度 2 m，由等分的四部分组成，分别为台阶法支护开挖段、全断面支护开挖段、全断面无支护开挖段和掌子面保留超载试验段。其中，台阶法和全断面支护均滞后掌子面一个循环进尺，即 2 cm，上、下台阶开挖高度均为 10.75 cm，落地为 2 m，上、下台阶长度均为 10 cm。顺次开挖成洞后进行超载破坏试验，研究超载过程中不同开挖试验段和掌子面保留段的岩体内部及围岩的受力和变形规律。

(3) 监测设计

为捕捉隧道施工过程中围岩的空间受力和变形信息，采用光纤光栅传感器、多点位移计以及微型压力盒等监测元件，共设置 6 个主监测断面，每个断面上应力和位移传感器各占 1/2 断面，呈左右对称布置，且间距均为洞半径的整数倍，其中拱顶、拱脚、边墙和拱腰部位沿岩体深度方向测点均为 5 个、底板测点 1 个。另布置位移监测断面 6 个，均位于拱顶，压力监测断面 2 个(共 28 个测点)，掌子面正中部和底板各有 2 个测点，主要集中在拱顶、拱腰和边墙，且压力盒埋设部位其量程和精度有所区别。本次试验，共采用光纤位移传感器 104 个、光纤应力传感器 27 个、多点位移计 12 个、微型压力 28 个以及电阻式应变砖 117 个。

3.2 相似材料的研制

相似材料主要包括软弱破碎围岩、初喷混凝土以及锚杆等支护结构的模拟材料。其中，围岩以自主研发的 IBSM 型相似材料为原料^[19-25]，配置强度极低且能反映一定流变特性的软弱破碎围岩的相似材料，其它则采用 $\phi 2 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 聚四氟乙烯棒来模拟。

(1) 软弱破碎围岩相似材料

试验段洞身穿越岩层主要为志留系中、上统千枚岩、炭质千枚岩，且岩层产状多变，整体岩质较软且破碎，具有一定的流变特性。相似材料选取精铁粉、重晶石粉、石英砂为骨料，配以酒精、松香溶液为胶结剂，测试其基本物理力学参数，并通过自主研发的适合低强度材料流变特性测试的流变装置，对配置的软弱破碎围岩的应变软化特性进行系统测试。

从测试结果来看，在过载情况下，相似材料的变形历经了减速蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个典

型的蠕变过程，最终发生破坏；若载荷过小，即低应力条件下，该材料则只表现出减速蠕变和稳态蠕变前 2 个阶段。同时，在千枚岩相似材料单轴蠕变测试过程中，材料的蠕变特性随压缩应力的增大而逐渐增强，具有明显的蠕变性，可一定程度上反映千枚岩地层软弱破碎围岩的蠕变特性。

(2) 支护体系相似材料

① 初喷混凝土

为消除围岩和混凝土相似材料因原料不同而造成的特殊界面效应，同样采用 IBSM 型原料进行配比，更吻合现场施作初喷混凝土原料来源于爆破围岩碎石的情况。根据现场实际情况，选取强度等级为 C25 的初喷混凝土，主要材料抗压强度、抗拉强度和弹性模量相似，具体见表 3。

表 3 初喷混凝土相似材料力学参数对比表

Table 3 Physico-mechanical parameters of shotcrete and similar material

介质	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	内摩擦角/(°)	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
C25 混凝土	25.00	1.300	23.00	37	0.35	2.2
相似材料	0.45~0.55	0.022~0.030	0.42~0.50	36~41	0.33~0.36	2.0~2.3

注：C25 喷射混凝土参数取自《铁路隧道设计规范》(TB10003—2005)。

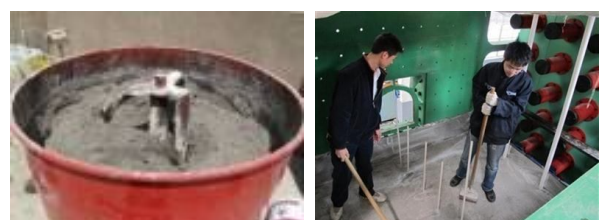
② 锚杆

考虑面积和刚度等效原则，聚四氟乙烯棒在满足锚杆基本物理力学参数相似的条件下，通过在聚四氟乙烯材料棒表面涂抹胶结剂，黏结石英砂来模拟同围岩的相互作用，形成可同试验相似材料相互黏结的锚杆模拟材料，植入围岩模拟材料内部后，与围岩共同受力。

3.3 模型体制作与施工模拟

(1) 试验模型体制作

两水隧道三维地质力学模型采用夯实填筑法制作，首先按配比大量配置材料，并均匀搅拌，在模型架内由下至上分层摊铺、夯实，在设计标高处分层埋设量测元件，周围缓慢夯实，继续填料直至模型架顶部(见图 7)。



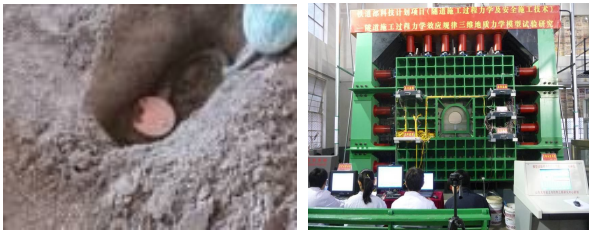


图7 模型体制作过程

Fig.7 Making process of model body

(2) 开挖与支护工艺

就定向开挖、轮廓控制、锚杆定位以及喷射混凝土厚度控制等一系列问题，自主研发了可伸缩式长铲、锚杆定位器以及混凝土施作器等，形成了可实现精细开挖和支护施作的微型设备及其配套工艺(见图8)。



图8 施工模拟工艺与设备

Fig.8 Technology and equipments for construction simulation

3.4 渐进性破坏加载方式

两水隧道DK357+700~800 试验段埋深约 200 m, 模型自洞口向里连续等距 0.5 m 采用台阶法支护开挖、全断面支护开挖和全断面无支护开挖完毕后，预留掌子面前方 0.5 m 未开挖段，然后进行逐级超载破坏试验，观察不同段围岩的渐进破坏现象，初喷混凝土相似材料力学参数对比见表 4。

表4 初喷混凝土相似材料参数对比表

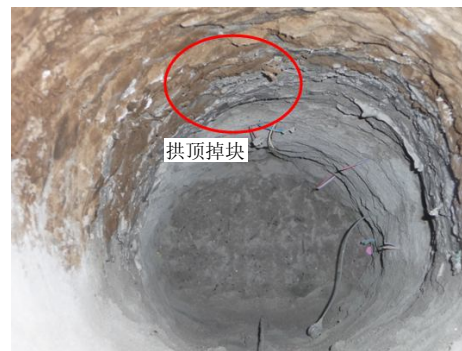
Table 4 Contrast of parameters of shotcrete and similar material

加载序号	梯度增加埋深/m	模拟埋深范围/m
1~6	50	250~500
7~11	50	500~750
12~14	50	750~900
15~16	30	900~960
17~18	20	960~1 000
19~20	10	1 000~1 020

4 试验观察与结果分析

4.1 不同试验段围岩的渐进性破坏过程

开挖成洞后，按超载方案逐渐增加隧道模拟埋深，4 个测试段的围岩均出现规律性破坏。当埋深增至 300 m 时，拱顶围岩出现局部拉剪破坏，掌子面附近的全断面无支护开挖段最早出现开裂、掉块现象，且主要集中在隧道拱顶部位，边墙部位未见明显破坏(见图 9(a))，图 9 中，Z 为沿开挖方向的坐标。埋深增加至 600 m 时，该测试段拱顶和边墙均发生大面积的破坏，围岩模拟材料不断掉落，同时在全断面有支护开挖段的拱顶和边墙处的支护材料开始逐渐开裂、脱落(见图 9(b))。加载至 700 m 埋深时，台阶法施工局部拱顶支护材料开始破坏、开裂(见图 9(c))。同时 Z = 100~150 m 范围内的围岩掉块、坍塌现象较为严重，即全断面无支护开挖的测试段为最薄弱部位，但由于掌子面的约束效应，



(a) Z = 125 cm 处拱顶围岩破坏、掉块



(b) Z = 85 cm 处拱顶、边墙支护开裂、脱落



(c) Z=0~50 cm 范围局部拱顶支护开裂、脱落
Z=100~150 cm 范围围岩大面积破坏



(d) Z = 0~50 cm 范围支护大面积破坏、脱落

图 9 不同测试段围岩和支护的渐进性破坏过程

Fig.9 Progressive failure of surrounding rock and supporting system for different test sections

尚未完全坍塌。加载至 900 m 埋深时, Z = 0~50 m 范围内的围岩和支护材料大面积不断剥落破坏, 开挖段已出现整体坍塌迹象。

4.2 渐进性破坏过程中岩体位移变化规律

选取不同测试段 A, B, C 和 D 进行分析, 距洞口的距离分别为 0.4, 0.7, 1.05 和 1.35 m。

(1) 测试段 A—台阶法有支护开挖

图 10 为台阶法支护段周边围岩位移变化曲线, 其中, AT - 1, A2 - 1 和 AB 分别为拱顶沉降、水平收敛和底板隆起的监测曲线。加载初期围岩变形以水平收敛和底板隆起为主, 沉降变化较为缓慢, 支护结构承载效应明显, 塌落拱尚未形成; 埋深增至 700 m 时, 局部拱顶支护开裂, 沉降量进入急剧增长阶段, 拱顶塌落拱逐渐形成, 随着拱顶围岩和支护材料的不断剥落, 周边围岩开始外扩, 底板同时下沉, 呈现较为吻合的变化趋势。

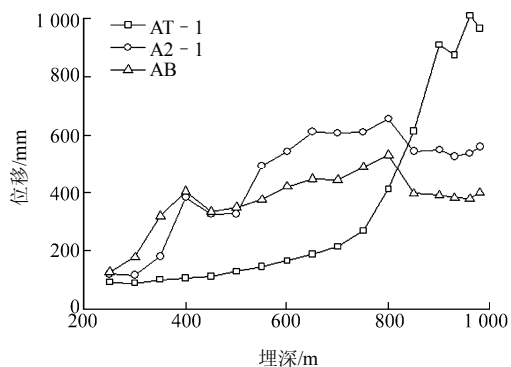


图 10 台阶法支护段周边围岩位移变化曲线

Fig.10 Displacement curves of surrounding rock for test section of bench method with support system

(2) 测试段 B—全断面有支护开挖

图 11 为全断面支护段周边围岩位移变化曲线, 其中, BT - 1 和 B3 - 1 分别为拱顶沉降和拱角部位变形的监测曲线。埋深 500 m 时, 拱顶围岩沉降变

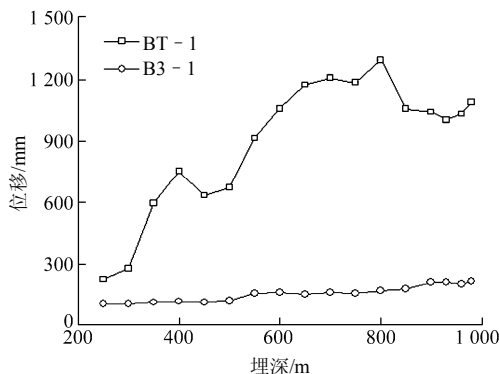


图 11 全断面支护段周边围岩位移变化曲线

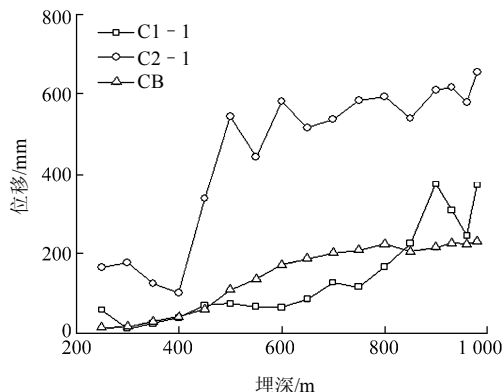
Fig.11 Displacement curves of surrounding rock for test section of full face method with support system

形逐渐加剧, 增至 600 m 埋深时, 拱顶围岩和支护材料受拉开始逐渐开裂破坏, 支护结构完全破坏, 围岩产生大变形破坏。拱顶沉降变形转移了增加的埋设荷载, 拱角部位的围岩变形受影响不大, 一直缓慢增长。但此时全断面无支护段的围岩已大面积破坏塌落, 围岩丧失自承能力, 拱顶塌落拱已形成, 掌子面附近临空面被掉落的模拟材料堆积。

(3) 测试段 C, D—全断面无支护开挖

图 12(a)为全断面无支护段掌子面远侧监测断面围岩周边位移的变化曲线, 其中, C1 - 1, C2 - 1 和 CB 分别为拱肩、拱腰和底板处围岩监测点的变形曲线。由于该测试断面拱顶塌落拱最早形成, 拱顶监测元件超出量程失效, 在上覆荷载不断增加的过程中, 隧道边墙部位围岩逐渐外扩, 尤其是拱腰部位最为显著。埋深增至 400 m 时, 监测点位移均急剧上升, 伴随塌落拱的形成过程, 边墙部位逐渐出现大面积的片帮、劈裂破坏。

图 12(b)为全断面无支护段掌子面近侧监测断面围岩周边位移的变化曲线, 其中, D2 - 1, D3 - 1 和 DB 分别为拱腰、拱角和底板处围岩监测点的变化曲线。由于掌子面的约束效应, 拱角处围岩的变



(a) 掌子面远侧

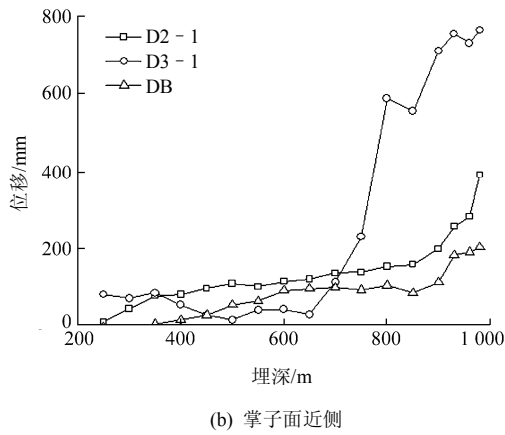


图 12 全断面无支护段周边位移变化曲线
Fig.12 Displacement curves of surrounding rock for test section of full face method without support system

形更为显著, 尤其当埋深增至 700 m 时, 变形值发生突跳, 全断面测试段 B, C 和 D 均出现了大面的坍塌破坏, 测试段 A 拱顶的围岩和支护材料也开始逐渐开裂破坏, 隧道濒临大面积坍塌性失稳破坏。

4.3 不同试验段围岩状态的对比分析

(1) 超载过程围岩应力变化状态

在超载过程中, 开挖临空面条件、支护型式等造成了围岩荷载释放过程的差异性, 支护的存在抑制了荷载的释放程度, 而未开挖段自掌子面至远处围岩荷载释放急剧减弱, 埋深增加的上覆荷载大部分直接作用在隧道轮廓线范围内的模拟材料上。以不同测试段的拱顶垂直应力为例(见图 13), 围岩的损伤破坏区主要集中在拱顶部位, 构成塌落荷载主要诱因, 未开挖段拱顶垂直应力始终最大, 支护段居中, 未支护段最小, 其荷载释放最快。

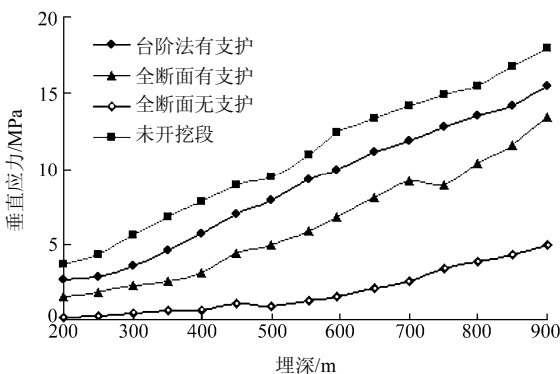


图 13 不同测试段拱顶垂直应力随埋深的变化曲线
Fig.13 Vertical stress curves of tunnel vault with burial depth for different test sections

同样, 不同测试段拱顶垂直应力增量变化也反

应了荷载释放过程的差异性(见图 14)。在超载过程中, 围岩损伤破坏区域随深度增加不断扩大, 压力拱向围岩内部延伸, 即在超载过程中呈现动态压力拱现象。不同测试段围岩的径向压力和周向压力均随埋深增大均出现不同程度的上升, 最大值的深度位置通常对应压力拱的边界区域。

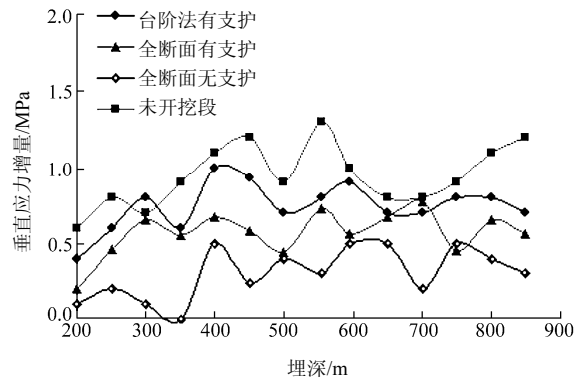


图 14 不同测试段拱顶垂直应力增量随埋深的变化曲线
Fig.14 Vertical stress increment curves of tunnel vault with burial depth for different test sections

(2) 超载过程围岩位移变化状态

图 15 为不同测试段拱顶沉降随埋深的变化曲线, 支护型式和开挖方法是影响围岩周边变形的主要因素。支护的施作有效地抑制了围岩变形, 尤其是拱顶沉降, 台阶法施工较全断面开挖更有利于沉降变形的控制, 两者均起到了减缓塌落拱形成破坏趋势的作用。

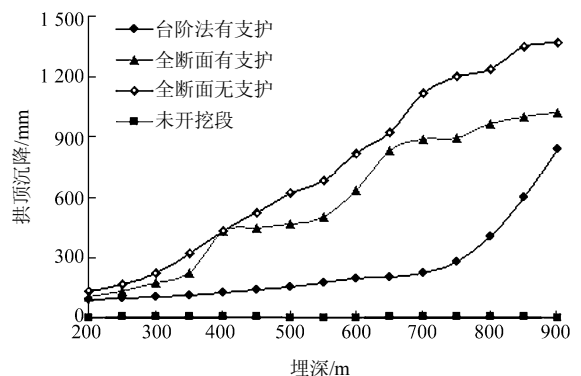


图 15 不同测试段拱顶沉降随埋深的变化曲线
Fig.15 Settlement curves of tunnel vault with burial depth for different test sections

不同测试段拱顶沉降增量随埋深增加也呈现出规律性变化(见图 16)。在施作支护的条件下, 全断面和台阶法施工拱顶沉降增量变化相对缓和, 但整体呈渐增趋势, 而无支护开挖拱顶沉降增量存在缓

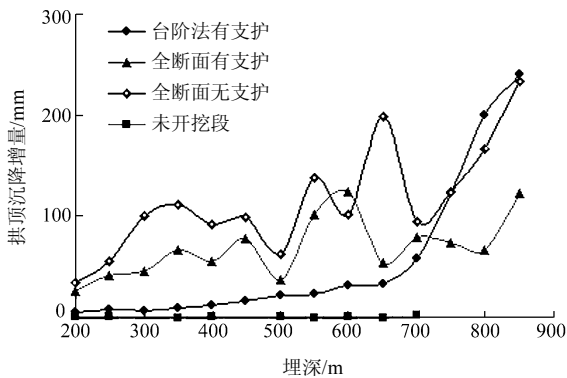


图 16 不同测试段拱顶沉降增量随埋深的变化曲线

Fig.16 Settlement increment curves of tunnel vault with burial depth for different test sections

慢增长期和急剧增长期,在进入 700 m 埋深后,沉降增量成倍增长,周边围岩的破坏深度较快地向深部延伸,逐渐进入围岩整体坍塌期。

在不同测试段埋深增加过程中,支护段围岩位移增长率小于无支护段,应力和荷载增长率恰恰相反,支护结构承载效应明显,并且在很大程度上抑制了损伤破坏区向围岩深部的延伸,使拱顶塌落拱完全形成的时间滞后。

5 结 论

本文针对超大断面隧道软弱破碎围岩渐进性破坏机制问题,从软弱破碎围岩流变相似材料、大比尺模拟平台、多元信息采集系统以及一系列精细模拟工艺方面,开展了较为系统的研究工作,构建了适合超大断面隧道软弱破碎地层不同工法施工全过程和围岩渐进性破坏过程模拟的大型三维地质力学模型试验系统,取得的主要进展和结论如下:

(1) 研制了当前最大的三维均匀梯度加载模型试验系统,模型架尺寸为 5.2 m×4.5 m×2.7 m,水平和垂直最大荷载 9 600 kN,最大荷载集度 2.5 MPa,稳压时间超过 360 h,保压偏差为±0.2 MPa,系统最大压力为 30 MPa,具有高压稳定、长时保压以及同步均匀加载等显著优点,可模拟平面和三维地质条件下地下工程不同地层开挖支护施工的全过程和围岩渐进性破坏的超载过程。

(2) 以松香、石英砂、重晶石粉以及聚四氟乙烯棒等为原料,采用自主设计的超低强度材料蠕变测试装置研制了兼具低强度和应变软化特性的软弱破碎围岩、初喷混凝土以及锚杆等相似材料,配合能实现精细开挖和支护施工的微型设备及其配套工艺,实现了软弱破碎地层台阶法支护、全断面法支护和全断面法无支护施工的全过程和围岩渐进性破

坏过程的物理模拟。

(3) 在超载过程中,围岩破坏区域呈渐进扩大趋势,全断面无支护段周边围岩最早发生破坏,然后依次扩展至全断面支护段初喷混凝土和台阶法支护段初喷混凝土,最终破坏区面积顺次由大到小;无支护段围岩破坏区和支护段衬砌结构破坏区均主要集中在拱顶上方区域,是衬砌结构破坏和围岩塌落荷载的主要来源,两侧边墙也存在局部破坏区,自边墙上部至拱脚部位破坏程度逐渐加剧。

(4) 在埋深增加过程中,支护段围岩位移增长率小于无支护段,应力和荷载增长率则相反,支护结构承载效应明显;超载过程中,围岩的破坏深度不断增加,尤其是拱部呈现动态压力拱现象,据此确定顶部加固范围在理论上具有可行性,为超大断面隧道软弱破碎围岩的锚固和注浆范围的确定提供了一条可行的途径。

参考文献(References):

- [1] MANDAL S K, SINGH M M. Evaluating extent and causes of overbreak in tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2009, 24(1): 22 - 36.
- [2] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(7): 1 297 - 1 307.(LI Shucui, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(7): 1 297 - 1 307.(in Chinese))
- [3] 陈洁金, 周 峰, 阳军生, 等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2 365 - 2 370.(CHEN Jiejing, ZHOU Feng, YANG Junsheng, et al. Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2 365 - 2 370.(in Chinese))
- [4] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机制及其应用研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2009.(LI Liping. Study on catastrophe evolution mechanism of karst water inrush and its engineering application of high risk karst tunnel[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2009.(in Chinese))
- [5] 汪成兵, 朱中华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(3): 450 - 456.(WANG Chengbing, ZHU Hehua. Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(3): 450 - 456.(in Chinese))
- [6] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 523 - 528.(LI Liping, LI Shucui, ZHANG Qingsong. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 523 - 528.(in Chinese))
- [7] 卢文波, 周创兵, 陈 明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(11): 2 184 - 2 194.(LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, CHEN Ming, et al. Research on transient characteristics

- of excavation unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 184 - 2 194.(in Chinese))
- [8] 伍法权, 刘 彤, 汤献良, 等. 坝基岩体开挖卸荷与分带研究——以小湾水电站坝基岩体开挖为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1 091 - 1 098.(WU Faquan, LIU Tong, TANG Xianliang, et al. Research on unloading and zonation of rock mass dam foundation excavation—a case study of Xiaowan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1 091 - 1 098.(in Chinese))
- [9] ZHOU X P, QIAN Q H, ZHANG B H. Zonal disintegration mechanism of deep crack-weakened rock masses under dynamic unloading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, 22(3): 240 - 250.
- [10] 夏才初, 李宏哲, 刘 胜, 等. 含节理岩石试件的卸荷变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 697 - 704.(XIA Caichu, LI Hongzhe, LIU Sheng, et al. Study of deformation properties of jointed specimens under unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 697 - 704.(in Chinese))
- [11] 邓华锋, 李建林, 易庆林, 等. 软岩高边坡开挖卸荷变形研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1 731 - 1 734.(DENG Huafeng, LI Jianlin, YI Qinglin, et al. Research on unloading deformation of soft rock high slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1 731 - 1 734.(in Chinese))
- [12] 任爱武, 伍法权, 王 东, 等. 大规模岩体开挖卸荷现象及其力学模式分析[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(5): 34 - 41.(REN Aiwu, WU Faquan, WANG Dong, et al. Analysis of unloading phenomenon of rock excavation and its mechanics model of Xiaowan power station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(5): 34 - 41.(in Chinese))
- [13] 王汉鹏, 李术才, 张强勇. 分岔隧道模型试验与数值模拟超载安全度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2 521 - 2 526.(WANG Hanpeng, LI Shucai, ZHANG Qiangyong. Model test and numerical simulation of overload safety of forked tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2 521 - 2 526.(in Chinese))
- [14] 朱合华, 黄 锋, 徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 113 - 1 122.(ZHU Hehua, HUANG Feng, XU Qianwei. Model test and numerical simulation for progressive failure of weak and fractured tunnel surrounding rock under different overburden depths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1 113 - 1 122.(in Chinese))
- [15] 吴顺川, 张晓平, 刘 洋. 基于颗粒元模拟的含软弱夹层类土质边坡变形破坏过程分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2 899 - 2 904.(WU Shunchuan, ZHANG Xiaoping, LIU Yang. Analysis of failure process of similar soil slope with weak intercalated layer based on particle flow simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2 899 - 2 904.(in Chinese))
- [16] 朱维申, 张乾兵, 李 勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 1 - 7.(ZHU Weishen, ZHANG Qianbing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true triaxial loading and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 1 - 7.(in Chinese))
- [17] 崔 激, 张社荣, 刘东海. 节理岩体中隧洞开挖的渐进破坏模式[J]. 天津大学学报, 2009, 42(5): 382 - 387.(CUI Wei, ZHANG Sherong, LIU Donghai. Gradual failure mode of tunnel after excavation in jointed rock mass[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(5): 382 - 387.(in Chinese))
- [18] 杨令强, 马 静, 陈祖坪. 岩质边坡渐进破坏的三维随机分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 468 - 472.(YANG Lingqiang, MA Jing, CHEN Zuping. Three-dimensional stochastic analysis of progressive failure of rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 468 - 472.(in Chinese))
- [19] 张强勇, 刘德军, 贾 超, 等. 盐岩油气储库介质力学模型相似材料的研制[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 581 - 3 586.(ZHANG Qiangyong, LIU Dejun, JIA Chao, et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 581 - 3 586.(in Chinese))
- [20] 黄茂松, 曹 杰. 隧道地震响应简化分析与动力离心试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 271 - 280.(HUANG Maosong, CAO Jie. Simplified analysis of tunnel earthquake response and centrifuge modelling calibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 271 - 280.(in Chinese))
- [21] 马险峰, 余 龙, 李向红. 不同下卧层盾构隧道长期沉降离心模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 14 - 20.(MA Xianfeng, YU Long, LI Xianghong. Centrifuge modelling of longitudinal long-term settlement of shield tunnels overlying transitional ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 14 - 20.(in Chinese))
- [22] 刘光磊, 宋二祥, 刘华北, 等. 饱和砂土地层中隧道结构动力离心模型试验[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2 070 - 2 076.(LIU Guanglei, SONG Erxiang, LIU Huabei, et al. Dynamic centrifuge tests on seismic response of tunnel in saturated sandy foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2 070 - 2 076.(in Chinese))
- [23] 李术才, 李利平, 李树忱, 等. 地下工程突涌水物理模拟试验系统的研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 299 - 304.(LI Shucai, LI Liping, LI Shuchen, et al. Development and application of similar physical model test system for water inrush of underground engineering[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(3): 299 - 304.(in Chinese))
- [24] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433 - 438.(GU Jincai, GU Leiyu, CHEN Anmin, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433 - 438.(in Chinese))
- [25] 张强勇, 李术才, 郭晓红. 组合式地质力学模型试验系统及其在分岔隧道工程中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 29(9): 1 337 - 1 343.(ZHANG Qiangyong, LI Shucai, GUO Xiaohong. A combined geomechanical model test system and its application in a bifurcation tunnel project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 29(9): 1 337 - 1 343.(in Chinese))
- [26] 李仲奎, 王爱民, 王克忠, 等. 地下工程三维地质力学模型制作逆向控制技术研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 729 - 1 734.(LI Zhongkui, WANG Aimin, WANG Kezhong, et al. Study and application of inverse controlling technology for 3D geomechanical model construction of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 729 - 1 734.(in Chinese))