

文章编号:1000-582X(2010)12-054-06

交错新建隧道施工力学特性模型试验

刘新荣¹, 郭子红¹, 王吉明¹, 裴丽¹, 林志², 王芳其²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要:以重庆两江隧道为研究背景,采用公路隧道结构与围岩综合实验系统对交错隧道进行三维物理模型实验,分析新建隧道施工力学特性,并采用数值模拟对模型实验区域进行对比分析。研究表明:新建隧道左侧周边位移普遍大于右侧周边位移;左侧周边位移大于独立隧道单侧周边位移;右侧周边位移小于独立隧道单侧周边位移;得出不同近接间距下周边收敛和拱顶下沉随隧道开挖的发展趋势;模型实验获得的拱顶下沉和周边收敛归一化后得出位移随近接间距的变化规律。数值模拟获得的周边收敛和拱顶沉降与还原后模型实验结果相接近,表明模型实验结果与数值计算结果一致。

关键词:交错隧道;模型实验;新建隧道;力学特性

中图分类号:TU451

文献标志码:A

Influence on new tunnel mechanics behavior induced by construction about adjacent spacing

LIU Xin-rong¹, GUO Zi-hong¹, WANG Ji-ming¹, PEI Li¹, LIN Zhi², WANG Fang-qi²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, P. R. China)

Abstract: This paper takes Chongqing Two-River Tunnel as the research background, based on the system for structure and surrounding rockmass of the highway tunnel, conducts a three-dimension model test about forked tunnel with different altitude to study new tunnel's mechanics behavior induced by construction, and uses numerical simulation to analyze model domain. The results show that the displacement on new tunnel's left hance is larger than the displacement on its right hance. Left hance displacement is larger than hance displacement of the single tunnel, and the right hance displacement is less than hance displacement of the single tunnel. The trend of hance displacement and crown settlement with different adjacent spacing is got. Normalizing hance displacement and crown settlement of model test, the relation between displacement and adjacent spacing is disclosed. The hance displacement and crown settlement gained by numerical simulation is close to the converted result of model test, which indicates that the model test data is consistent with the result of numerical simulation.

Key words: forked tunnel with different altitude; model test; new tunnel; mechanical behavior

收稿日期:2010-07-17

基金项目:国家 863 计划资助项目(2007AA11Z110);国家自然科学基金创新群体基金资助项目(50621403);重庆市建委基金资助项目(城科字 2006 第 34 号)

作者简介:刘新荣(1969-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事岩土力学与地下工程等领域的研究,
(Email)liuxrong@126.com。

由于城市化发展突飞猛进,地面建筑和交通等设施已经不能满足社会发展的需要,对地下空间的开发与利用已成为当今社会的焦点。由于地形的限制和地下空间的不断开发,近接工程案例层出不穷,如何确保各种形式下近接工程能安全顺利施工,对于中国地下空间开发利用具有重要的指导作用。杜菊红等对偏压、错台的浅埋小间距隧道在不同开挖顺序下的动态施工过程进行了研究^[1];C. S. Wu 和龚建伍等以深圳高速公路和福州国际机场高速公路鹤上三车道小净距隧道为工程背景对近接隧道施工爆破震动进行研究^[2-3];Sang-Hwan Kim 和 A. M. Hefny 采用模型实验和数值模型分析相邻隧道合理间距^[4-5];S. L. Chen 采用数值模型对台湾雪山隧道群的相互作用下中岩墙的力学特性和加固措施进行分析^[6];J. S. Yang 对乌鞘岭隧道群穿过挤压破碎带时新建隧道对既有隧道影响进行研究^[7];Seokwo 等采用模型实验和数值方法分析岩石隧道穿越节理和软弱面时位移和塑性区发展情况,以此为基础进行隧道加固和稳定性评价^[8];张强勇和王汉鹏等采用组合式地质力学模型试验系统对分岔隧道围岩位移场、应力场的变化规律、岩锚支护效应和超载安全度进行了研究^[9-10];Yamaguchi 等研究了不同开挖步下隧道上方的地表沉降和隧道自身荷载的释放系数^[11]。刘明贵等结合大帽山小净距隧道群的监控量测,研究小净距隧道群中夹岩的累计损伤效应^[12];杨建平等研究了小净距隧道在不同荷载释放比例下不同支护时机对围岩稳定性影响^[13]。但现有大部分研究主要针对隧道左右并列形式,且考虑新建隧道对既有隧道的影响,对其他近接形式和对新建隧道自身的研究相对较少。

为加强“一岛两岸”交通联系,兼顾节约土地、减少拆迁和保护城市景观和城市形态,促进城市健康发展出发,重庆提出构建两江隧道的设想,如图 1 所示。以重庆两江隧道为研究背景,采用公路隧道结构与围岩综合实验系统(CTSSRH)对交错隧道进行三维物理模型实验,对新建隧道施工力学特性进行分析,并结合数值模拟进行对比验证,为同类隧道的设计与施工提供参考。

1 交错隧道物理模型实验

1.1 实验装置及模型试件

模型实验采用重庆交通科研设计院自行研制公路隧道及围岩综合实验系统,试验平台如图 2 所示。采用液压千斤顶在模型顶部加载模拟上覆岩土层自重,模型两侧加载模拟围压,用内置千斤顶及高精度位移计模拟被开挖体应力响应及位移变化,所有

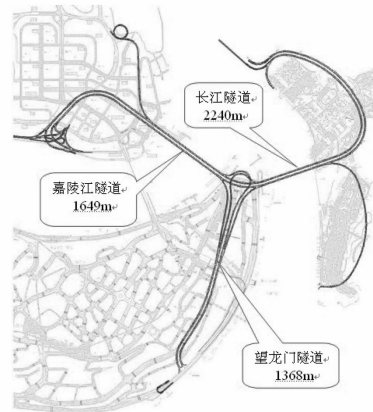


图 1 隧道总体布置

千斤顶的荷载均由液压稳压器调控,数据实现采集、存储和处理自动化^[14]。



图 2 公路隧道及围岩综合实验系统

根据规划中重庆两江隧道出现的交错形式进行模拟,选取模型试件的几何相似比为 1:40。新建隧道位于右侧,由实验系统自带标准断面,模型隧道轴线平行于模型底面和侧面;既有隧道位于左侧,前侧至后侧隧道轴线在水平方向向左移动 100 mm,垂直方向向上移动 64 mm,两隧道形成在水平和垂直方向都有一定夹角的交错隧道模型,如图 3 所示。

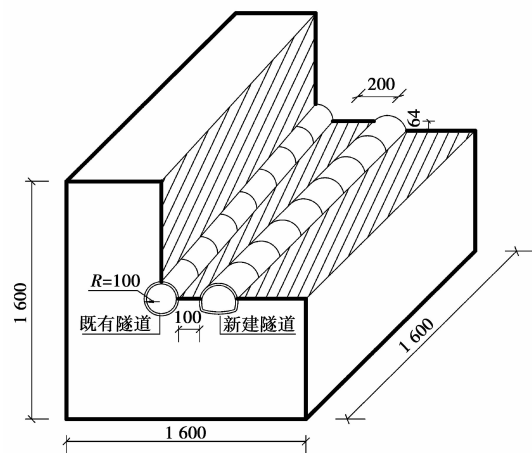


图 3 模型试件

1.2 相似材料确定

重庆两江隧道地质勘察资料表明大部分区域综合评定为Ⅳ围岩,其物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩物理力学参数

围岩等级	密度	内摩擦角	单轴抗压强度	泊松比	弹性模量
	10^3 kg/m^3	度	MPa		GPa
Ⅳ	2.2	47	25.73	0.28	4.19

相似材料由细砂、石膏粉和石灰配置而成,拌和水灰比为 1:9。配比号中各数字含义为:第一位数字表示砂胶比;第二位数字表示胶结物中石膏粉含量的比例;第三位数字表示胶结物中石灰含量的比例。通过实验获得不同配比号的物理力学参数如表 2 所示。根据相似理论模型材料应满足 $C_e/(C_L \cdot C_\gamma)$ 和 $C_E/(C_L \cdot C_\gamma)$ 2 个主要相似参数等于 1^[15],对比分析后选定配比号为 582 的相似材料, $C_E/(C_L \cdot C_\gamma) = 0.999 3$,且内摩擦角相似比为 1,单轴抗压强度与弹性模量 2 者的相似比接近,能较好地满足相似要求。

表 2 相似材料配比物理力学参数

配比编号	密度	内摩擦角	单轴抗压强度	泊松比	弹性模量
	$/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	$/(^{\circ})$	$/\text{MPa}$		$/\text{MPa}$
473	1.7	38	0.438	0.37	35
682	1.7	35	0.416	0.35	41
482	1.7	51	0.539	0.26	100
582	1.7	47	0.485	0.28	81

主要分析隧道初期支护的受力变形过程,隧道支护结构厚 150 mm,弹性模量 20 GPa,获得满足相似条件的模型支护结构厚度为 3.75 mm,弹性模量为 0.386 GPa。对衬砌结构安全起控制作用的是抗弯能力和弯曲应变,模型相似应以抗弯刚度为主^[16]。模型既有隧道支护结构的选取采用保持隧道横截面等面积不变条件下,理想模型支护结构抗弯刚度 EI 与实际采用模型支护结构 EI 相等。整个试验的流程如图 4 所示。

1.3 模型加载与数据采集

隧道模型边界上压力分布为:水平边界 40 kPa;垂直边界 59 kPa;内加载系统表面 49.5 kPa。总荷

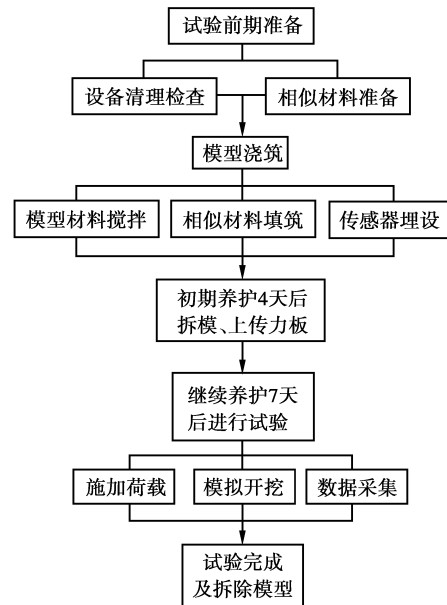


图 4 模型试验流程

载分 6 步均匀增加,第一次加载与第二次加载间隔 20 min,之后每加载一次间隔 5 min,当达到最终荷载标准稳压 1 h 后模拟开挖。内加载系统共有 8 个独立断面,分别为 L1~L8,每个断面有 3 个独立模拟开挖模具,即拱顶和两侧拱腰,隧道开挖通过油压自动控制箱改变开挖模具内部油压大小实现,每个开挖模具中心具有一个位移自动采集测点,如图 5 所示。开挖方法采用上下台阶法,开挖整个顺序如表 3 所示。

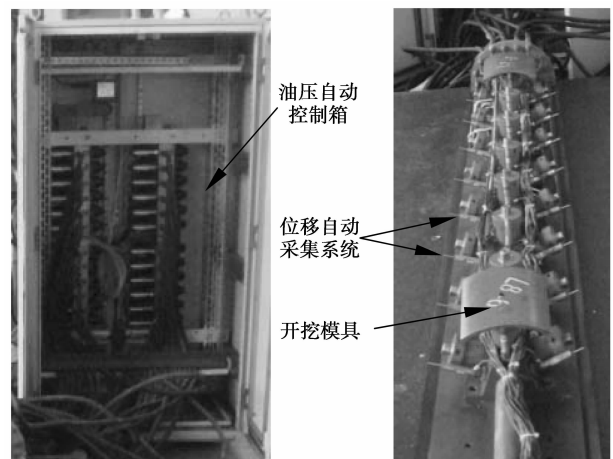


图 5 内加载系统详图

其中 $Lx-y$ 的意义为: x 表示断面编号; y 表示每个断面的 3 个独立模拟开挖模具编号,1 为左侧(靠近既有隧道)拱腰,2 为拱顶,3 为右侧(远离既有隧道)拱腰。时间相似比设定为 1:48,每 2 次开挖间隔 30 min。

表 3 模型开挖顺序及测点布置

断面编号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
	L1-1	L2-1	L3-1	L4-1	L5-1	L6-1	L7-1	L1-1
	(3)	(5)	(7)	(9)	(11)	(13)	(15)	(16)
测点号	L1-2	L2-2	L3-2	L4-2	L5-2	L6-2	L7-2	L1-2
(开挖次序)	(1)	(2)	(4)	(6)	(8)	(10)	(12)	(14)
	L1-3	L2-3	L3-3	L4-3	L5-3	L6-3	L7-3	L1-3
	(3)	(5)	(7)	(9)	(11)	(13)	(15)	(16)

2 新建隧道施工力学特性实验结果分析

在分析新建隧道周边位移时,每开挖步选取一个位移值,主要对 1、3、4、5、6 断面的周边收敛和拱顶沉降进行对比分析。

2.1 典型断面位移分析

1 断面周边位移和拱顶下沉的变化趋势如图 6 所示,采用上下台阶法进行开挖,总开挖步为 16 步。第一步和第二步为开挖 1 断面的上台阶,对 1 断面的周边收敛的影响相对较小,而对拱顶沉降影响较大;而开挖第三步,即开挖 1 断面的下台阶时,1 断面的周边位移和拱顶沉降变化都较大,说明开挖下台阶时,对周收敛移和拱顶下沉的影响都很大。当开挖断面通过 1 断面之后,随着开挖步的增加,周边位移有增加的趋势,但增加的幅度很小;而拱顶沉降增加的幅度较大,其增加量可达到总沉降量的 20%左右;周边位移与拱顶沉降的增长最终逐渐趋于稳定。整个开挖过程中,拱顶下沉数值一直大于周边位移,但两侧拱腰周边位移之和与拱顶下沉的量值很接近;左侧拱腰的周边位移大于右侧拱腰的周边位移,但两者变化趋势相同。

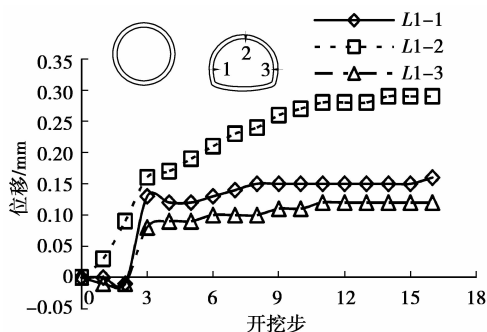


图 6 1 断面周边位移

2.2 近接间距对新建隧道变形特性影响

1) 新建隧道左侧拱腰周边收敛随位置(不同断面)变化如图 7 所示,1 断面周边位移总值最大,此处既有隧道与新建隧道水平间距为 0.5D,没有垂直

错位;5、6 断面周边位移值最小,此处水平间距为 0.8D 左右,垂直错位 0.2D 左右。从 1 断面至 6 断面左侧拱腰侧总周边位移具有不断减小的趋势。

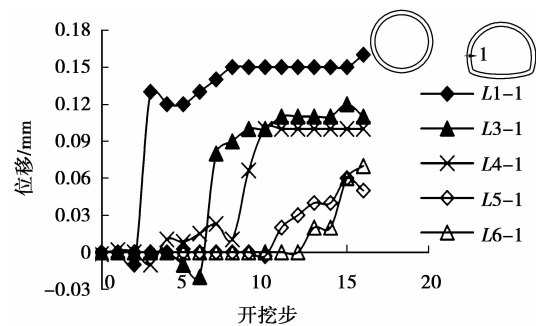


图 7 各断面左侧拱腰周边位移对比

2) 新建隧道拱顶沉降随位置变化如图 8 所示,从 1 断面至 6 断面总的位移值虽然具有离散性,但是所测得拱顶下沉总的变化趋势是比较明显的,两隧道相隔的距离越小,其拱顶下沉越大。

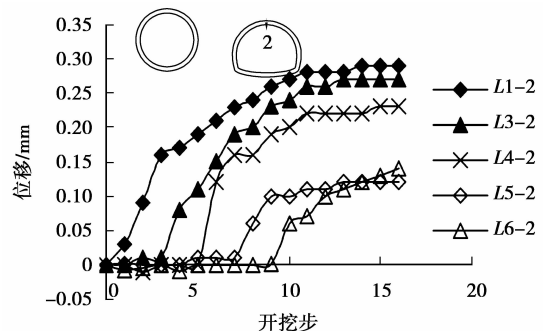


图 8 各断面拱顶沉降对比

3) 新建隧道右侧拱腰侧周边位移随位置变化如图 9 所示,从 1 断面至 6 断面体现出两隧道相隔距离越小,位移越大,整体变化趋势比较明显。

4) 从图 7~9 可看出,隧道拱顶下沉普遍大于单边周边收敛;周边总收敛值接近于拱顶沉降值;左侧拱腰侧周边收敛普遍大于右侧拱腰侧周边收敛。

5) 将所有断面的位移以 1 断面的位移为标准进行归一化,每个断面的位移值选取原则为开挖经过

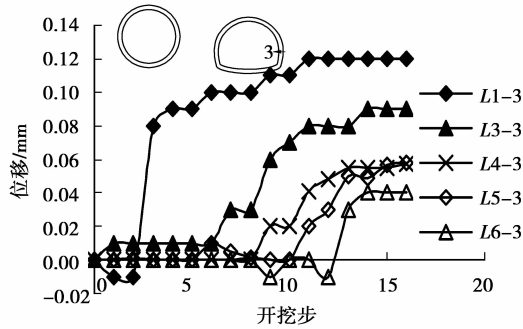


图 9 各断面右侧拱腰周边位移对比

自身断面后的位移变形时间相等,新建隧道两侧拱腰和拱顶归一后位移值变化情况如图 9 所示。 $Lx-1$ 表示各断面的 1 测点; $Lx-2$ 表示各断面的 2 测点; $Lx-3$ 表示各断面的 3 测点。从 1~6 断面,所测拱顶沉降和两侧拱腰周边位移具有不断减小趋势;所测拱顶沉降具有一定的离散性,但其总体变化趋势为不断减小;6 断面新建隧道两侧拱腰和拱顶移略为 1 断面位移的 60%左右。

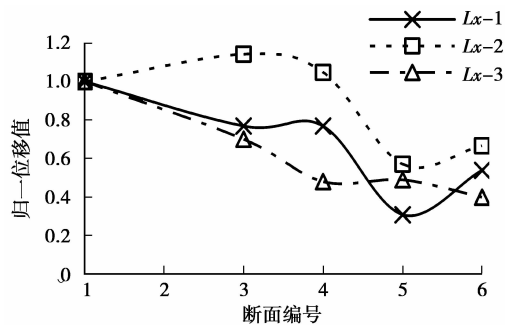


图 10 归一化位移与断面的关系

3 交错隧道三维数值模拟结果及对比

采用数值软件 Ansys 对模型实验 8 个断面模拟的实际隧道区域进行计算分析,取 $L2\sim L6$ 断面的计算结果进行分析得出:

1)隧道 1 断面周边位移随开挖变化趋势如图 10 所示,拱顶沉降 $L2-2$ 的最终值 10.70 mm, $L1-1$ 和 $L1-3$ 的最终收敛分别为 4.41 mm 和 3.97 mm;1 断面模型实验结果转换为原形隧道 $L1-2$ 位移为 11.60 mm, $L1-1$ 和 $L1-3$ 位移分别为 6.40 mm、4.00 mm。对比分析得出:1)数值模拟与模型实验得出的结果比较接近;2)数值模拟同样得出 $L1-1 > L1-3$,即左侧周边收敛大于右侧周边收敛,基结果与模型实验获得结论相近。

2)采用开挖和支护完成后交错隧道周边位移比独立隧道周边位移多出的百分比进行分析,得出不

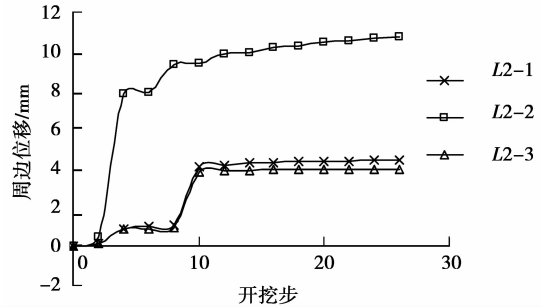


图 11 隧道周边位移随开挖变化趋势

同断面交错隧道周边位移受影响程度,如图 11 所示:1) $L2$ 断面拱顶沉降增加的比例最大,比独立隧道拱顶沉降大 10%;2) $L2$ 断面右侧周边收敛增加值最小,约增加 1%,左侧周边收敛增加 3%;3)随着近接间距的增加新建隧道周边的增加值不断减小, $L5$ 断面之前减小速率较小, $L5$ 断面之后减小的速率突然增大, $L6$ 断面的两侧周边位移增加量成为负值,表明 $L5$ 断面之后既有隧道的存在产生的应力释放具有明显作用,致使隧道的周边位移出现负增长。

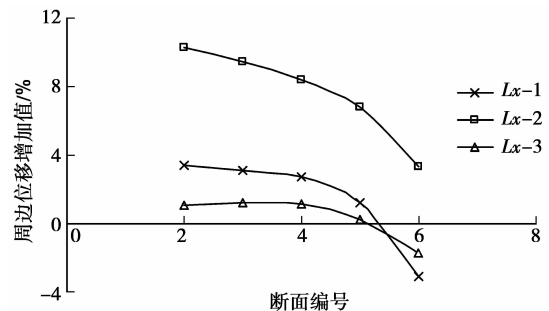


图 12 影响值与断面关系

4 结论

通过交错隧道的三维物理模型实验及数值模拟,对新建隧道施工力学特性进行了分析,可得如下结论:

1)新建隧道在开挖过程中,拱顶下沉数值一直大于单侧周边收敛,但两侧拱腰周边位移之和与拱顶下沉的量值很接近;

2)对比分析各个断面的周边位移得出左侧拱腰的周边收敛普遍大于右侧拱腰的周边收敛,但两者变化趋势一致;随着交错间距的增大,隧道拱顶下沉和周边收敛随之减小;

3)将所有断面的位移以 1 断面的位移为标准进行归一化对比得出,6 断面新建隧道周边收敛和拱顶下沉约为 1 断面位移的 60%左右。

4)数值模拟获得交错隧道的周边收敛和拱顶下

沉与还原后模型实验结果相接近,且印证了模型实验得出左侧拱腰的周边收敛普遍大于右侧拱腰的周边收敛结果;

5) $L_2 \sim L_5$ 断面新建隧道拱顶下沉和拱腰周边收敛都大于独立隧道的变形,但 L_5 断面之后隧道周边位移的增加值迅速减小, L_6 断面两侧的周边位移增加值都为负值,并且中岩墙处拱腰周边收敛减小最快。表明 L_5 断面之前新建隧道的周边位移受围岩应力集中产生的位移占主导地位, L_5 断面之后新建隧道周边位移受既有隧道存在产生的应力释放的影响占主导地位。

参考文献:

- [1] 杜菊红, 黄宏伟. 偏压、错台小间距隧道施工位移场动态模拟分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4):1102-1108.
DU JU-HONG, HUANG HONG-WEI. Dynamic simulation analysis of displacement field of bias closely spaced tunnel with altitude difference[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4):1102-1108.
- [2] WU C S, LI J X, CHEN X, et al. Blasting in twin tunnels with small spacing and its vibration control[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, (19): 518.
- [3] 龚建伍, 夏才初, 郑志东, 等. 鹤上三车道小净距隧道爆破振动测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1882-1887.
GONG JIAN-WU, XIA CAI-CHU, ZHENG ZHI-DONG, et al. Measurement and analysis of blasting vibration in heshang three-lane tunnels with small clear space[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1882-1887.
- [4] KIM S H. Interaction behaviours between parallel tunnels in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, (5/6): 448.
- [5] HEFNY A M, CHUA H C, ZHAO J. Parametric studies on the interaction between existing and new bored tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19: 471.
- [6] CHEN S L, LEE S C, GUI M W. Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 148-154.
- [7] YANG J S, YAN L, DENG S J, et al. Interactions of four tunnels driven in squeezing fault zone of Wushaoling Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 359.
- [8] JEON S, KIN J, SEO Y, 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): 486.
- [9] 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]. 岩土工程学报, 2007, 29(9):1337-1343.
ZHANG QIANG-YONG, LI SHU-CAI, GUO XIAO-HONG. A combined geomechanical model test system and its application in a bifurcation tunnel project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9):1337-1343.
- [10] 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): 2521-2526.
WANG HAN-PENG, LI SHU-CAI, ZHANG QIANG-YONG. Model test and numerical simulation of overload safety of forked tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2521-2526.
- [11] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels driven in close proximity, in relation to design and construction of parallel shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground space Technology, 1998, 13(3): 289-304.
- [12] 刘明贵, 张国华, 刘绍波, 等. 大帽山小净距隧道群中夹岩累计损伤效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 26(9):1363-1369.
LIU MING-GUI, ZHANG GUO-HUA, LIU SHAO-BO, et al. Research on accumulative damage effect of interlaid rock in damaoshan tunnel group with small clear distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 26(9):1363-1369.
- [13] 杨建平, 陈卫忠, 郭小红. 小净距公路隧道支护时机对围岩稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 483-490.
YANG JIAN-PING, CHEN WEI-ZHONG, GUO XIAO-HONG. Effect of supporting time on stability of small spacing roadway tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2):483-490.
- [14] 蒋树屏, 黄伦海, 宋从军. 利用相似模拟方法研究公路隧道施工力学形态[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 662-666.
JIANG SHU-PING, HUANG LUN-HAI, SONG CONG-JUN. Physical simulation analysis on construction mechanics behavior of road tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 662-666.
- [15] 李晓红, 卢义玉, 康勇, 等. 岩石力学实验模拟技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 来弘鹏, 林永贵, 谢永利, 等. 支护时机对软弱围岩公路隧道力学特征影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 33(3):390-395.
LAI HONG-PENG, LIN YONG-GUI, XIE YONG-LI, et al. Influence of supporting opportunity on stress characteristics of soft-weak surrounding rocks in highway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 33(3):390-395.