

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.11.006

不等跨连拱铁路隧道围岩压力分布及受力特征模型试验研究

张俊儒¹, 孙克国¹, 卢 锋¹, 郑宗溪², 孙其清²

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 以兰渝铁路新作坊隧道洞口明挖段不等跨连拱结构为背景, 采用室内模型试验的方法, 对不等跨连拱铁路隧道围岩压力分布及受力特征进行研究。试验结果表明: 隧道水平侧压力均小于竖向围岩压力, 拱顶处侧压力小于墙脚处侧压力, 小洞侧侧压力系数平均为 0.55, 大洞侧侧压力系数平均为 0.65; 中隔墙顶部围岩压力均大于拱顶处围岩压力, 且大洞拱顶围岩压力约为小洞的 1.2 倍; 隧道结构总体为小偏心压弯构件, 大洞所承受的轴力总体比小洞承受的轴力大 20%~30%; 隧道先后在大小洞靠近中隔墙的拱腰及仰拱处破坏, 最终发生整体失稳; 靠近中隔墙的大小洞拱腰及仰拱是设计施工时应重点关注的部位; 最终获得不等跨连拱铁路隧道的围岩压力分布模式, 研究结果可以直接指导新作坊隧道结构的设计与施工, 有利于完善不等跨连拱隧道设计施工理念。

关 键 词: 不等跨连拱隧道; 围岩压力; 受力特征; 模型试验

中图分类号: U 452.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)11-3077-09

Model test study of surrounding rock pressure distribution and mechanical characteristics of unequal-span double-arch railway tunnel

ZHANG Jun-ru¹, SUN Ke-guo¹, LU Feng¹, ZHENG Zong-xi², SUN Qi-qing²

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: A model test is carried out to study the distribution of surrounding rock pressure and its mechanical characteristics based on open excavation section of Xinzuo Fang unequal-span double-arch tunnel of Lanzhou-Chongqing railway. Test results show that lateral pressure acting on the tunnel is smaller than the vertical stress of surrounding rock, and lateral pressure at the crown is smaller than that at the bottom of side wall, moreover, lateral pressure coefficient of small hole side is about 0.55 on average, while the big hole side is about 0.65. The stress of surrounding rock on the top of middle wall is bigger than that on the crown; the surrounding rock stress of big hole side is about 1.2 times that of the small hole. The tunnel is in a small eccentric bending state, and thrust stress in big hole is about 20% to 30% greater than that in small hole side; the destroy of tunnel structure firstly occurs at hance and invert near the middle wall in succession, finally the whole structure collapse; thus, the hance and invert near the middle wall are the place that should be focused on in the design and construction. Based on the above, the mode of surrounding rock pressure distribution is obtained finally. The results can directly provide guidance for the design and construction of Xinzuo Fang tunnel; what's more, it's also helpful to improving the design and construction concepts related to the unequal-span double-arch tunnel.

Keywords: unequal-span double-arch tunnel; surrounding rock pressure; mechanical characteristics; model test

1 引 言

近年来, 随着高速铁路的快速发展, 隧道迎来了大量建设的新时期。较一般的隧道不同, 连拱隧

道因具有空间利用率高, 占地面积少, 对线路线型具有高度适应性等优点而出现在洞口地形狭窄段、短隧道以及一些线路的并行段和折返线。由于连拱隧道跨度大、施工工序复杂、隧址区地质条件往往

收稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助(No.51378435); 教育部创新团队发展计划(No.IRT0955); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.SWJTU11ZT33)。Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.51378435), the Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No.IRT0955) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No.SWJTU11ZT33).

第一作者简介: 张俊儒, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: jrzh@home.swjtu.edu.cn

通讯作者: 孙克国, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程灾害防治机制等方面的工作。E-mail: sunkeg@126.com

较差、开挖与支护往往交错进行,从而使得围岩压力和支护荷载复杂多变,所以建设难度很高。目前,在设计和施工中,对于连拱隧道支护参数、结构形式、施工方法以及理论方面的研究已经取得了一定的成果^[1-9],但还存在一些问题和不足。因此,有必要对连拱隧道的围岩压力分布及衬砌结构的受力特征开展深入研究。

目前,我国建设的连拱隧道已具一定数量,在设计和施工方面积累了一定的工程经验。为研究连拱隧道的施工力学行为及围岩、衬砌结构的受力特征,国内外学者采用数值模拟、现场监测以及室内模型试验等手段进行了研究。肖林萍等^[10]通过模型试验,提出中导坑拓展法,建立了连拱隧道二次衬砌内力模型及围岩的稳定与变形的规律;刘涛等^[11]结合模型试验与数值计算对连拱隧道施工工况进行模拟,得出施工过程中隧道围岩位移、应力和塑性区分布规律;林刚等^[12]通过模型试验,对连拱隧道不同围岩级别下不同施工方法进行了对比研究;申玉生等^[13]通过对连拱隧道结构受力的关键部位进行现场监控测试与分析,获得了隧道支护结构在施工偏压条件下各施工阶段的围岩受力、锚杆轴力、中墙内力以及隧道支护结构中的内力变化情况;邓建等^[14]采用有限元软件对不等跨连拱隧道施工全过程进行数值模拟,得出了隧道围岩应力、围岩位移、初衬与二衬的接触压力等随施工过程的变化规律;朱合华等^[15]采用平面有限元方法,对罗长高速公路马宅顶不对称连拱隧道的施工过程进行了数值模拟分析,重点研究了“三导洞”开挖条件下围岩的变形和应力以及衬砌的受力和变形;王军等^[16]针对马宅顶隧道进行了现场测试,基于监测结果,分析了不对称连拱隧道围岩和支护体系的变形及受力特征;郑宗溪等^[17-18]对浅埋偏压条件下不等跨连拱隧道的中隔墙设计、施工工法以及防排水等关键技术进行了计算分析和详细阐述;聂善文等^[19]采用数值模拟方法综合分析了不同地表倾斜情况下不同开挖方案对非对称连拱隧道稳定性的影响。

从目前查阅文献及研究成果可以看出,对于连

拱隧道的研究主要以对称连拱隧道为主,而对于不等跨连拱隧道,其结构形式及围岩衬砌受力相对对称连拱隧道更为复杂,但国内外的研究较少,目前鲜有的工程实例,也主要出现在公路隧道及城市地下铁道折返线中,其结构形态与不等跨铁路隧道的结构形态相差很大,以至于现有的设计模式无法直接借鉴,而对于不等跨连拱隧道围岩压力分布与受力特征的相关研究,更是趋于空白。因此,本文结合具体工程实际,采用模型试验的方法对不等跨连拱隧道明挖施工段的围岩压力分布、衬砌结构受力特征及其破坏形态进行研究,以期研究成果为今后不等跨连拱隧道的设计与施工提供一定的借鉴和理论依据。

2 依托工程概况

新作坊隧道位于重庆市合川区铜溪镇境内,起讫里程 DK888+177~DK888+643,为兰渝线(双线)和遂渝二线(单线)在重庆渭沱、合川站区的并行段。隧道 DK888+500~643 段兰渝左线到遂渝二线线间距为 5.3~8.8 m,由工程经验,当线间距达到 7.3 m 时,有条件采用连拱隧道断面形式,若该段选用三线大跨隧道,则开挖面积将达到 302.9~336.7 m²,且开挖跨度将达 22.3 m,高度为 11.7 m,施工风险极大;若采用连拱隧道,开挖面积为 240.93~262 m²。通过不同方案比选,最终确定在 DK888+600~643 段采用不等跨连拱隧道通过。

隧址区基岩多裸露,隧道穿越侏罗中统上沙溪庙组 J_{2s} 紫红色泥岩夹砂岩。丘坡处基岩多裸露,局部覆盖坡残积土;隧道进口附近分布有坡残积 Q₄(dl+el)粉质黏土,出口分布人工填土 Q₄(ml)和坡残积 Q₄(dl+el)粉质黏土;总体来说,隧道洞身位于强风化及弱风化的泥岩夹砂岩地层中,隧道穿越地层岩体破碎,风化严重且上覆人工填土,整体稳定性较差。暗挖段隧道埋深 4.7~20.6 m,明挖段隧道埋深 1.2~4.7 m,地下水位位于隧道仰拱以下。隧道线路平面图如图 1 所示,明挖段横断面图如图 2 所示。

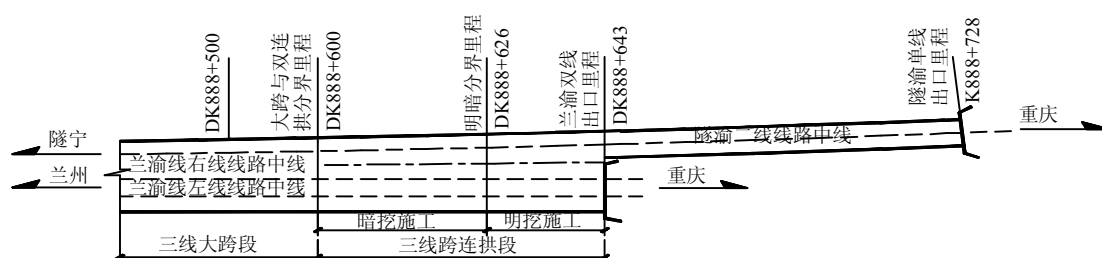
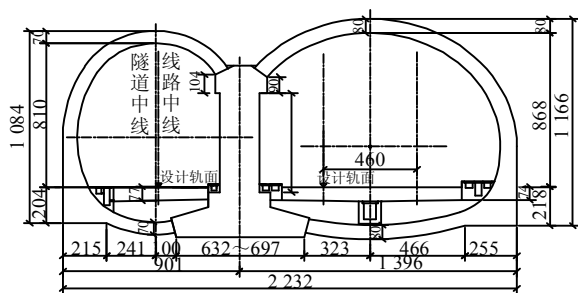
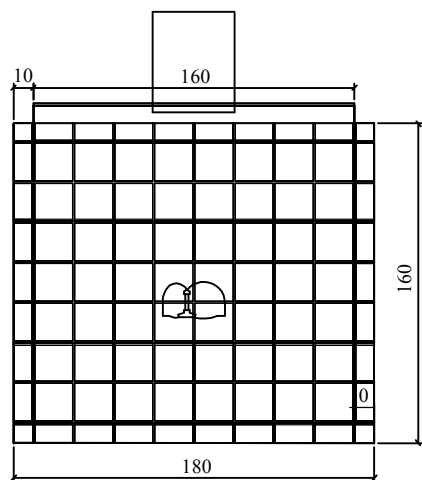


图1 新作坊隧道线路平面图
Fig.1 Plan view of Xinzuofang tunnel

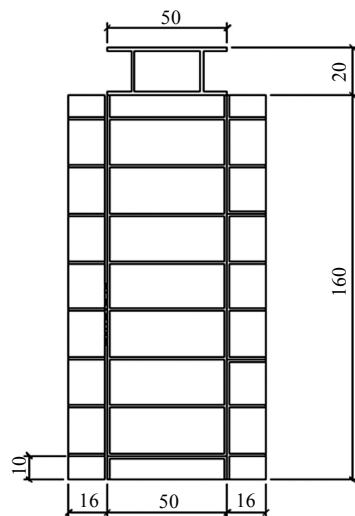


立板采用钢化玻璃和钢板结合的方式, 外部采用钢板形成加强肋, 以提高前后板的刚度; 前后板和侧

板之间采用螺栓连接, 背板分为两段, 方便拆装以及填土。



(a) 模型正面图



(b) 模型侧面图



(c) 贴好应变片的隧道模型



(d) 模型试验箱

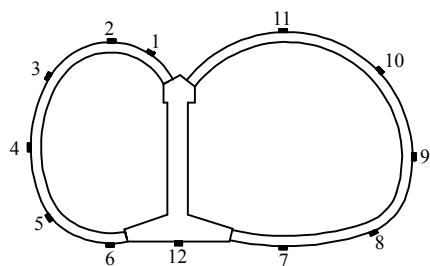
图 4 模型试验装置(单位: cm)

Fig.4 Model test devices(unit: cm)

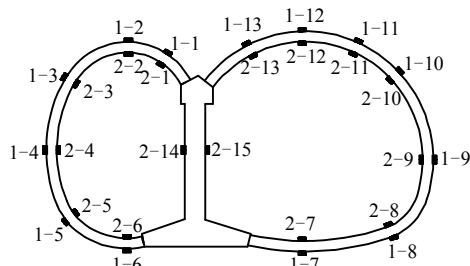
3.4 量测系统

围岩压力测试采用钢弦式压力盒, 精度为 0.1 kPa, 量程为 0.8 MPa; 隧道结构内力测试采用箔式电阻应变计, 型号为 BX120-1AA, 灵敏系数

为 2.06~2.12。根据测试得到的应变计算出应力, 由材料力学知识即可反算出隧道结构的轴力和弯矩, 从而对其受力特征进行分析。测点布置及隧道模型如图 5 所示。



(a) 压力盒布置图



(b) 应变片布置图

图 5 测点布置

Fig.5 Arrangements of measuring points

3.5 试验步骤

本试验以不等跨连拱隧道明挖段为试验对象, 只模拟初期支护, 具体步骤如下: ① 试验装置入位后, 将隧道结构模型底部、左右侧的岩土回填到位; ② 将隧道结构模型入位并将压力盒埋入, 将压力盒电缆线引出介入数据采集箱; ③ 将隧道结构模型上部的覆土回填到位; ④ 上述工作准备好后, 开始加载, 加载开始后, 每加 10 kN 采集数据一次, 直到隧道模型破坏。部分试验过程如图 6 所示。



(a) 模拟明挖



(b) 模型入位并回填上覆土

图 6 模型试验过程
Fig.6 Process of model test

4 模型试验结果分析

4.1 围岩压力分布模式

取前 15 次加载采集到的数据为研究样本, 加载级别分别为 20、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、240、260、280、300 kN。限于篇幅, 取部分试验结果, 如图 7 所示。图中以单线隧道拱顶的围岩压力为基准值, 取为 1.00, 其他部位的数值为该部位与单线隧道拱顶围岩压力的相对值。

由图可以看出: (1) 隧道在中墙顶部的围岩压力均大于隧道拱顶处的围岩压力; 且大洞拱顶处的围岩压力是小洞拱顶处围岩压力的 1.2 倍左右; (2) 水平侧压力小于竖向围岩压力, 拱顶处的侧压力小

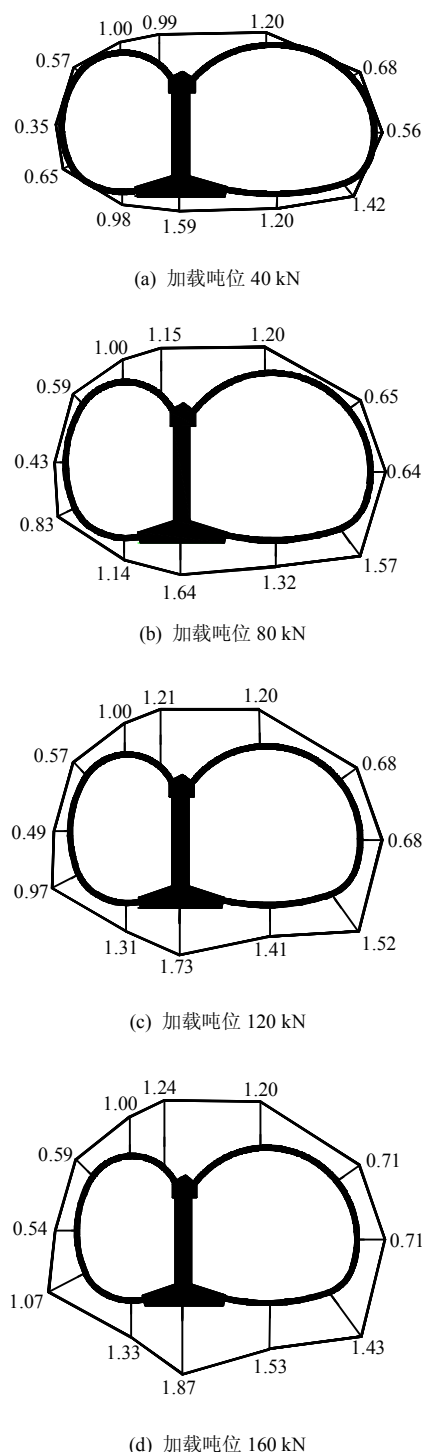


图 7 不等跨连拱隧道围岩压力分布图
Fig.7 Surrounding rock pressure distributions of unequal-span double-arch tunnel

于墙脚处的侧压力, 在小洞侧侧压力系数平均约为 0.55, 大洞侧平均约为 0.65; 同时可以明显地看出, 大洞侧的侧压力大于小洞侧的侧压力。

根据不同加载条件下得到的围岩压力分布结果, 经过对多组样本的统计分析, 得出了无量纲的分布特征, 综合目前的规范、隧道设计手册等中浅埋条件下围岩压力的分布特征, 对实测围岩压力进

行了适当的简化,最终,参照《公路隧道设计细则》中浅埋无偏压连拱隧道的围岩压力分布特征,得到不等跨连拱隧道无偏压情况下围岩压力分布模式,如图 8 所示。图中以单线隧道拱顶位置的围岩压力

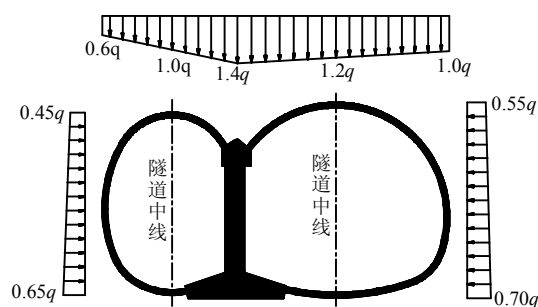


图 8 不等跨隧道围岩压力分布模式
Fig.8 Surrounding rock pressure distribution mode of unequal-span double-arch tunnel

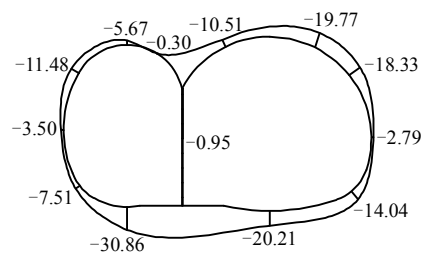
为基准值,取为 1.00,其他部位的数值为该部位与单线隧道拱顶围岩压力的相对值。

需要注意的是,本试验得到的侧压力系数为静止土压力与被动土压力共同作用下的侧压力系数,其值应大于静止土压力系数,所以基于图 8 中围岩压力分布模式的隧道设计还是偏于安全的。

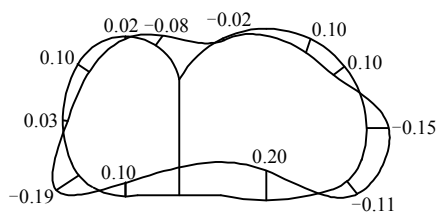
4.2 不对称连拱隧道受力特征研究

取前 15 次加载吨位采集到的数据为研究样本,加载吨位同 4.1 节所示。限于篇幅,取部分试验结果,如图 9 所示。

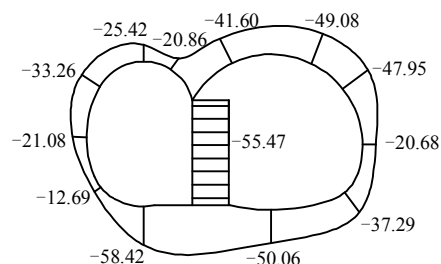
由图可以看出:(1)不论在隧道的拱顶、拱腰、边墙还是仰拱,偏心距都很小,隧道结构总体为小偏心压弯构件;(2)大洞所承受的轴力总体比小洞承受的轴力大 20%~30%,因此,建议在结构设计



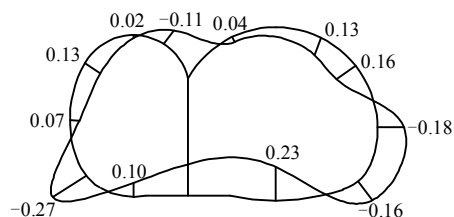
(a) 加载吨位 40 kN 轴力图



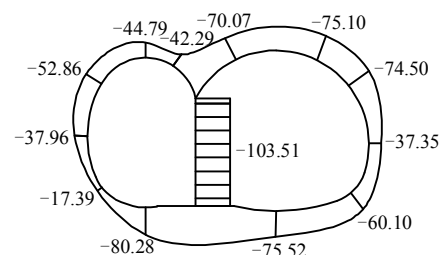
(b) 加载吨位 40 kN 弯矩图



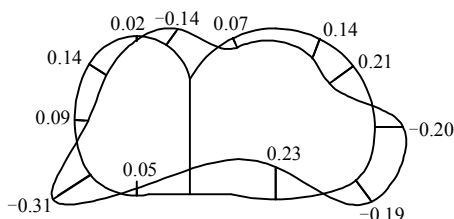
(c) 加载吨位 80 kN 轴力图



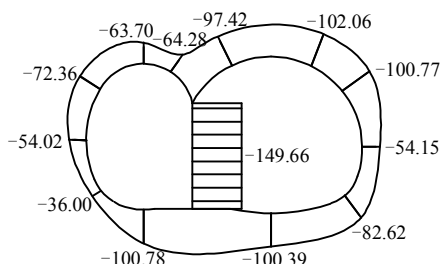
(d) 加载吨位 80 kN 弯矩图



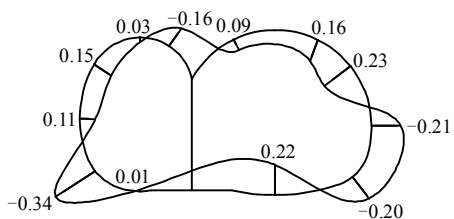
(e) 加载吨位 120 kN 轴力图



(f) 加载吨位 120 kN 弯矩图



(g) 加载吨位 160 kN 轴力图



(h) 加载吨位 160 kN 弯矩图

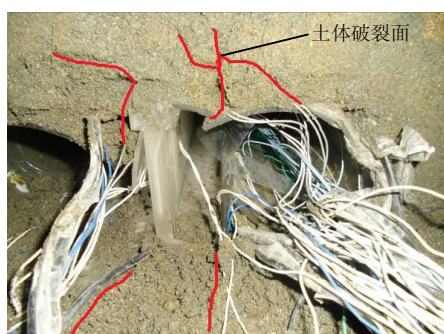
图 9 不等跨连拱隧道结构轴力和弯矩图

Fig.9 Axial force and bending moment diagrams of unequal-span double-arch tunnel

中大、小洞采用非等参支护, 大洞考虑适当加强;
(3) 不管是大洞还是小洞, 最大轴力均出现在拱圈部位以及仰拱部位, 在结构设计时对这些关键部位应重点关注。

4.3 不对称连拱隧道破坏形态

在试验开始后, 加载按 10 kN 的量级逐级递加, 荷载每加 10 kN 采集一次数据, 直到隧道模型发生破坏。在加载破坏过程中, 隧道模型首先从大洞靠近中隔墙的拱腰部位破坏, 其次小洞靠近中隔墙的拱腰破坏, 然后大小洞仰拱靠近中隔墙的部位相继破坏, 最后直至整个隧道体系失稳破坏。从整个隧道模型破坏失稳的情况来看, 靠近中隔墙的大小洞拱腰及仰拱是设计中重点关注的部位。图 10 为破坏后的隧道模型, 图中标记的是结构破坏部位。



(a) 隧道围岩破坏情况示意图



(b) 隧道结构破坏部位示意图

图 10 破坏后的隧道模型
Fig.10 Destruction of tunnel model

5 结 论

(1) 对于明挖段不等跨连拱隧道, 隧道中隔墙顶部的围岩压力均大于隧道拱顶处的围岩压力, 且大洞拱顶处的围岩压力是小洞拱顶处围岩压力的 1.2 倍左右; 水平侧压力均小于竖向围岩压力, 拱顶处的侧压力小于墙脚处的侧压力, 且大洞侧的侧压力大于小洞侧的侧压力; 小洞侧侧压力系数平均为

0.55, 大洞侧侧压力系数平均为 0.65。并最终获得了不等跨连拱隧道的围岩压力分布模式, 为今后不等跨连拱隧道的设计与施工提供一定的借鉴和依据。

(2) 在围岩压力作用下, 衬砌结构偏心距都很小, 隧道结构总体为小偏心压弯构件; 大洞所承受的轴力总体比小洞承受的轴力大 20%~30%, 因此, 建议在结构设计中大、小洞采用非等参支护, 大洞考虑适当加强; 不管是大洞还是小洞, 最大轴力均出现在拱圈、仰拱部位, 在结构设计时对这些关键部位应重点关注。

(3) 在加载过程中, 隧道首先从大洞靠近中隔墙的拱腰部位破坏, 其次小洞靠近中隔墙的拱腰破坏, 然后大小洞仰拱靠近中隔墙的部位相继破坏, 最后直至整个隧道体系失稳破坏。从整个隧道模型破坏失稳的情况来看, 靠近中隔墙的大小洞拱腰及仰拱是设计应重点关注的部位。

(4) 本文的研究成果适用于不等跨连拱隧道的明挖段, 对于暗挖段不等跨连拱隧道的围岩压力分布及受力特征, 还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 邱长林, 刘彬, 何林生, 等. 整体式中隔墙连拱隧道模型试验及现场监测[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2625—2631.
QIU Chang-lin, LIU Bin, HE Lin-sheng, et al. Model test and in-situ monitoring of double-arch tunnel with integrated middle wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2625—2631.
- [2] 申玉生, 赵玉光, 张焕新, 等. 双连拱隧道施工过程弹塑性有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4946—4951.
SHEN Yu-sheng, ZHAO Yu-guang, ZHANG Huan-xin, et al. Numerical analysis of elastoplastic finite element in construction of twin-arch tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(Supp.2): 4946—4951.
- [3] 何川, 李永林, 林刚. 连拱隧道施工全过程三维有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(2): 37—41.
HE Chuan, LI Yong-lin, LIN Gang. 3D FEM numerical analysis for the whole construction process of twin-bore tunnel[J]. *China Railway Science*, 2005, 26(2): 37—41.
- [4] 李树忱, 袁超, 李术才, 等. 极浅埋连拱隧道施工过程围岩力学行为的模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 713—718.

- LI Shu-chen, YUAN Chao, LI Shu-cai, et al. Model test study on mechanical behavior of extremely shallow double-arch tunnel during excavation[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(5): 713—718.
- [5] 刘涛, 沈明荣, 袁勇. 偏压连拱隧道围岩稳定性模型试验与数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 460—465.
- LIU Tao, SHEN Ming-rong, YUAN Yong. Model test and 3D numerical simulation study on wall rock mass stability of double-arch tunnel subject to partial press[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2008, 36(4): 460—465.
- [6] 陈志良. 城市地下铁道连拱隧道群施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(3): 42—46.
- CHEN Zhi-liang. Construction techniques for a group of multi-arch tunnels of urban metro[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2006, 43(3): 42—46.
- [7] 马立忠, 姚永勤. 北京地铁 10 号线不对称双联拱隧道浅埋暗挖施工技术[J]. 铁道标准设计, 2008, 12: 171—173.
- MA Li-zhong, YAO Yong-qin. Construction technique of shallow-depth asymmetry double-arch tunnel of Beijing subway line 10[J]. **Railway Standard Design**, 2008, 12: 171—173.
- [8] 周生国, 黄伦海, 蒋树屏, 等. 黄土连拱隧道施工方法模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 188—191.
- ZHOU Sheng-guo, HUANG Lun-hai, JIANG Shu-ping, et al. Study on the reasonable construction method for a loess double-arch highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(2): 188—191.
- [9] 王凯, 张成平, 王梦恕. 不对称双连拱海底隧道施工引起的地层变形分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2771—2777.
- WANG Kai, ZHANG Cheng-ping, WANG Meng-shu. Asymmetric double-arch subsea tunneling-induced ground deformation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2771—2777.
- [10] 肖林萍, 赵玉光, 申玉生. 双连拱隧道结构内力样式及围岩稳定性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4346—4351.
- XIAO Lin-ping, ZHAO Yu-guang, SHEN Yu-sheng. Model experimental study on style of structural internal force and stability of surrounding rock in double-arch tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(23): 4346—4351.
- [11] 刘涛, 沈明荣, 陶履彬, 等. 连拱隧道动态施工模型试验与三维数值仿真模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1802—1808.
- LIU Tao, SHEN Ming-rong, TAO Lü-bin, et al. Model test and 3D numerical simulation study on excavation of double-arch tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1802—1808.
- [12] 林刚, 何川. 连拱公路隧道施工方法模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(6): 1—6.
- LIN Gang, HE Chuan. Study on the reasonable construction method for a double-arch road tunnel[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2003, 40(6): 1—6.
- [13] 申玉生, 高波. 双连拱隧道施工偏压力学特性的监测与分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2061—2065.
- SHEN Yu-sheng, GAO Bo. Site monitoring and analytical research on mechanical characteristics under construction partial press in double-arch tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 2061—2065.
- [14] 邓建, 朱合华, 丁文其. 不等跨连拱隧道施工全过程的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 477—480.
- DENG Jian, ZHU He-hua, DING Wen-qi. Finite element simulation of whole excavation operation of a unequal-span double-arch tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 2061—2065.
- [15] 朱合华, 叶斌. 大跨度非对称连拱隧道施工力学研究[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002.
- ZHU He-hua, YE Bin. Construction mechanics analysis of unsymmetrical arcade tunnel with large span[C]// Proceedings of the 7th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: China Science and Technology Press, 2002.
- [16] 王军, 夏才初, 朱合华, 等. 不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 267—271.
- WANG Jun, XIA Cai-chu, ZHU He-hua, et al. Site monitoring and analysis of non-symmetrical multi-arch highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 267—271.