

新型铁路隧道门洞口段结构受力特征 现场试验研究

高新强, 仇文革

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 现有的铁路隧道洞门的设计只是经验性地照搬标准图的模式, 而对新型隧道门的研究是必要的。一种新型隧道门在满足它的美学效果、环境保护等功能外, 更重要的是应保证隧道洞口结构受力后的安全性。对采用新型隧道门的洞口段围岩压力和衬砌内力进行现场测试, 并将单线斜切式隧道门洞口段的现场试验结果与模型试验和有限元数值计算结果进行比较, 探讨了洞口段围岩压力分布和衬砌结构受力特征。研究表明: 斜切式隧道门洞口段围岩压力和衬砌内力从洞口向洞内逐渐增大, 其大小随覆盖层厚度增大而增大, 围岩压力在仰拱处最大; 衬砌结构处于复杂的三维受力状态, 既有横向轴力、弯矩, 又有纵向轴力、弯矩, 其受力特征类似于壳体结构, 因此, 按壳体结构设计比较合理。

关键词: 隧道工程; 铁路隧道; 新型隧道门; 现场试验; 结构受力特征

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)12-2155-05

RESEARCH ON IN-SITU TEST OF MECHANICAL BEHAVIORS OF LINING IN NEW-STYLE RAILWAY TUNNEL PORTAL

GAO Xin-qiang, Qiu Wen-ge

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Railway tunnel portal is always designed according to the standard drawing with experience. Research on new-style tunnel portal is necessary. Besides a new-style tunnel portal should have aesthetic effect and be beneficial to protect environment, it should be ensured security of the structure. Surrounding rock pressure and mechanical behaviors of lining in the new-style tunnel portal had been tested in-situ. The distributed characters of surrounding rock pressure and mechanical behaviors of lining are discussed, by comparing the test results with model experiment and finite element analysis results. The results show that the surrounding rock pressure and internal force of lining increase from the tunnel entrance to inside in the bamboo-truncating tunnel portal. The value increases with the depth of cover. The pressure of surrounding rock is maximal at the invert arch. And the lining is in complicated three-dimensional mechanical state. There are not only circumferential axial force and bending moment but also longitudinal axial force and bending moment. The mechanical behaviors of lining are similar to those of shell structure. So it is reasonable to design lining for the tunnel portal as a shell structure.

Key words: tunneling engineering; railway tunnel; new-style tunnel portal; in-situ test; mechanical behaviors of lining

收稿日期: 2004-07-12; **修回日期:** 2004-11-22

基金项目: 铁道部建设司标准设计科研项目资助(建技科字 2001-1 号); 西南交通大学博士生创新基金项目(2004)

作者简介: 高新强(1970-), 男, 博士, 西南交通大学桥梁与隧道工程专业, 现任讲师, 主要从事隧道力学理论与试验方面的教学与研究工作。E-mail: gxqgaoxinqiang@163.com.

1 引言

我国铁路隧道洞门根据地形特点分为基本型、变化型和特殊型 3 大类 16 种形式^[1],但始终脱离不了端墙、翼墙、柱式的型式,目前铁路隧道洞门设计只是适应地形变化作些修改而已。公路隧道洞门随着高等级公路的建设有了较大突破和创新,如削竹式(斜切式)、墨镜式^[2]、喇叭口式^[3]等,景观设计与评价方法被应用于隧道洞口的设计中^[4-6]。笔者结合新建赣(州)龙(岩)铁路上几个有特点的隧道工程,运用景观设计与评价方法设计了斜切式(包括单线正切式和倒切式,双线正切)和双线弧形挡墙等几种新型隧道门,并在赣龙铁路隧道工程中进行了应用。其中,斜切式隧道门可根据地形坡度确定洞口斜切坡度,尽量减少洞口仰、边坡刷坡,甚至不刷坡^[7],在隧道洞口做适当排水处理就可取消天沟,对保护隧道洞口周边环境起到重要作用,同时使得隧道洞口结构与自然环境更加和谐统一。

一种新型隧道门在满足它的美学效果、保护环境等功能外,更重要的是应保证隧道洞口结构受力后的安全性。多年来,隧道洞门结构受力特征只是定性地被认为结构处于复杂的三维状态,隧道洞门的设计只是经验性地采取保守的照搬标准图的模式。不论端墙式隧道门还是翼墙式隧道门均用“挡土墙”理论^[8]进行检算,墙式隧道洞门洞口边、仰坡较高,施工过程对洞口山体扰动较大,边墙或翼墙承受较大压力,其强度、稳定性和抗倾覆性要求较高;而斜切式隧道门不存在明显的墙式结构,弧形挡墙式隧道门挡墙一般较低,洞口刷坡小,施工对山体的扰动很小,并且洞口段是一整体结构,主要承受围岩压力,强度问题成为关注的重点,这也是新型隧道门与墙式隧道门的主要区别所在。因此,研究新型隧道门洞口段围岩压力分布和衬砌结构受力特征对于此类隧道门的设计和施工是必要的。

2 新型隧道门

结合新型隧道门的研究,赣龙铁路上隧道门采用了 4 种新型隧道门:岭子脑隧道进口为单线正切式隧道门,见图 1(a);仙娘庙一号隧道进口为单线倒切式隧道门,见图 1(b);森坑二号隧道出口为双线正切式隧道门,见图 1(c);河坑隧道进口为双线弧形挡墙式隧道门,见图 1(d)。



图 1 新型隧道门

Fig.1 New-style tunnel portals

3 现场试验

3.1 测试工点及使用仪器

现场对 4 座新型隧道门洞口段进行了测试,测试元器件型号和数量见表 1。

表 1 各隧道门测试元器件

Table 1 Instruments of test for four tunnel portals

隧道门	压力盒		钢筋计		应变计	
	数量/个	型号	数量/个	型号	数量/个	型号
岭子脑进口	18	JXY-4	44(φ12)	JXG	44	JXH-3
仙娘庙一号进口	-	-	26(φ12)	JXG	26	JXH-3
森坑二号出口	4	JXY-4	14(φ16)	JXG	14	JXH-3
河坑进口	11	JXY-4	-	-	38	JXH-3

围岩压力采用 JXY4 压力盒测试,钢筋轴力采用 JXG 钢筋计测试,衬砌混凝土应变采用 JXH-3 混凝土应变计测试。

3.2 测试元器件布置、埋设与数据采集

由于篇幅限制,仅以岭子脑隧道进口测试为例,该隧道洞口围岩为 V 级。

岭子脑隧道进口纵向上布置 4 个测试断面,在测试断面 1 和 2 之间拱顶处增设 3 个围岩压力测点,与测试断面 4 距离 2 m 仰拱处增设 1 个围岩压力测点。各断面位置和测试元器件布置见图 2;测试断面上元器件的布置见图 3。

埋设前测定元器件初始频率。混凝土埋入式应变计安装时,绑扎在衬砌内外侧钢筋上,尽量安置于钢筋外侧,并应保证其轴线与受力方向一致;钢

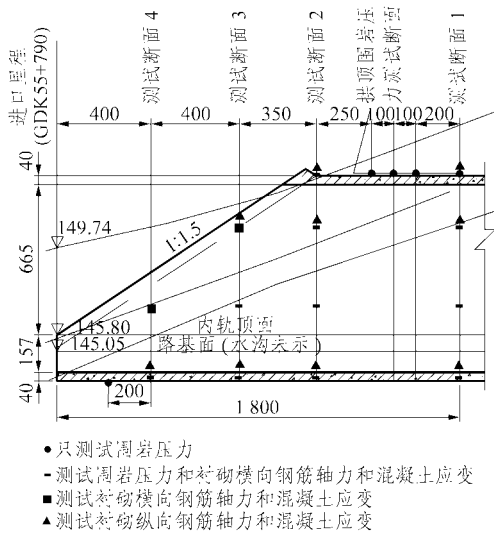


图 2 测试断面在隧道纵向上的布置(单位: cm)

Fig.2 Layout of test sections along tunnel longitudinal direction(unit: cm)

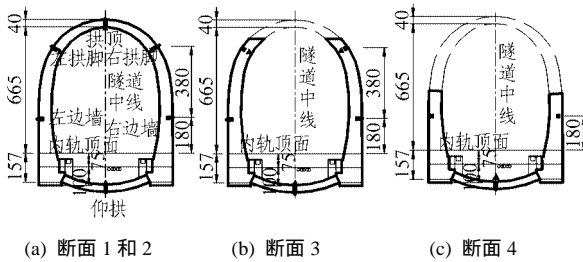


图 3 测试断面上测试元器件布置(单位: cm)

Fig.3 Layout of instruments in test sections(unit: cm)

筋计安装在内外两层钢筋上,采用“姊妹杆”焊接;接触式压力盒埋设在衬砌与围岩接触面上。将元器件的传输电缆线绑扎在钢筋上,集中于每个断面两侧的集线箱处,便于保护电缆线和采集数据。采用钢弦式频率仪采集数据。

4 测试结果分析

现场测出的数据是埋设元器件传感器的频率、围岩压力、混凝土应变和钢筋轴力根据元器件的标定公式计算得出,再按材料力学相关公式计算出衬砌轴力和弯矩。为分析洞口段围岩压力分布和结构受力特征,把现场测试结果与模型试验、有限元结果进行了比较。

三维模型试验中几何相似比取为 30,容重相似比为 1;围岩按 V 级围岩参数选取,围岩相似材料由重晶石粉、细砂和机油按 1 0.87 0.006 7 的配合比配制而成;衬砌由石膏、水和柠檬酸按配合比 1 0.8 0.000 33 配制而成,柠檬酸作为缓凝剂。围

岩和衬砌试验力学参数见表 2,试验情况见图 4,详情请参阅文[9, 10]。有限元分析采用 ANSYS 进行,衬砌结构用壳单元进行模拟,有限元模型见图 5,围岩和衬砌计算参数采用表 2 中原型参数。

表 2 围岩和衬砌力学参数

Table 2 Mechanical parameters of surrounding rock and lining

材料	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量 E / MPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	粘聚力 c / kPa	泊松比 μ	
级围岩	原型	18.7	200.0	25.8	0.40	
	模型	18.7	6.7	27.4	6.0	0.40
	实测	18.7	-	29.7	6.9	-
衬砌	原型	23.0	28 000.0	-	-	-
	模型	23.0	933.3	-	-	-
	实测	23.3	920.5	-	-	-



图 4 模型试验照片

Fig.4 Photo of model experiment

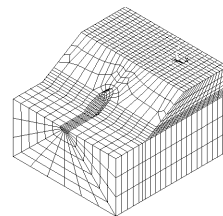


图 5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

4.1 围岩压力

测试断面上围岩压力的分布见图 6。图 6 中分布曲线按现场测试数据绘出,括号外数值为现场测试结果,小括号内数值为模型试验结果,中括号内数值为有限元计算结果。

由图 6 可知:岭子脑隧道进口围岩压力在横断面上基本呈对称分布,围岩压力全部为压力且值较小,右侧围岩压力比左侧稍大,约为左侧的 1.4 倍,这是因为左侧的山体较高,回填土较多所致;仰拱处围岩压力最大,拱顶最小,边墙较大,拱脚处比拱顶大、比边墙小。现场测试结果与模型试验和有限元计算结果比较可知:现场测试数值小于模型试验和有限元计算结果,主要原因是现场施工该洞口

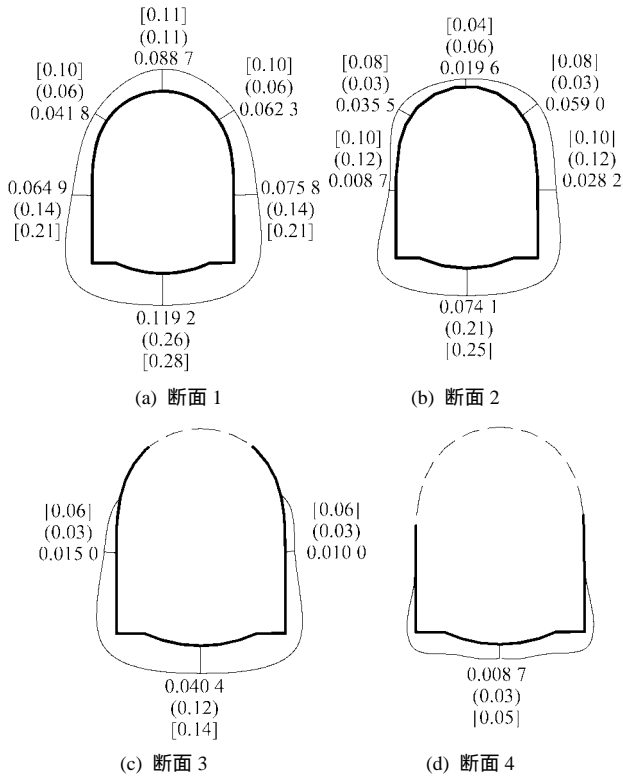


图 6 围岩压力分布(单位: MPa)

Fig.6 Distribution of surrounding rock pressure (unit : MPa)

时, 先进行开槽, 做完洞口结构后进行回填, 并且回填的洞口段覆盖层厚度较薄; 模型试验结果与有限元计算结果很接近; 3 种方法得到的围岩压力分布规律相似。

围岩压力在拱顶和仰拱处沿隧道纵向分布见图 7。由图 7 可知: 拱顶和仰拱围岩压力从洞口向洞内逐渐增大, 说明隧道洞口段处于浅埋, 围岩压力随隧道覆盖层厚度的增大而增大。由有限元计算结果可知, 从洞口向洞内围岩压力逐渐增大, 当进

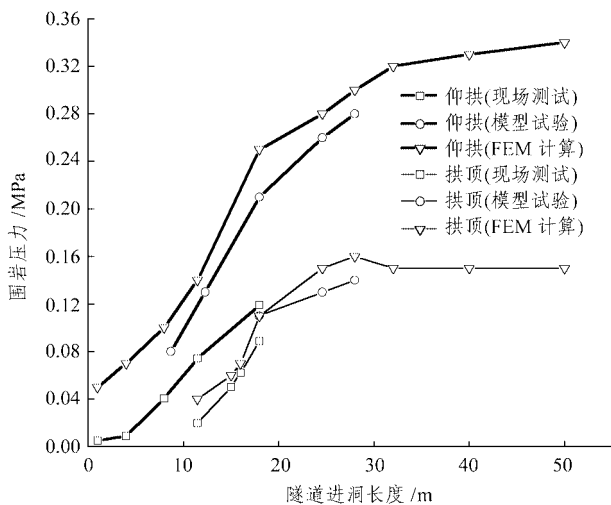


图 7 仰拱和拱顶围岩压力纵向分布

Fig.7 Distribution of surrounding rock pressure at the invert arch and the arch crown along longitudinal direction

入洞内一定距离(约 30 m)后, 围岩压力逐步趋于稳定, 说明埋深达到一定数值后围岩压力与埋深的关系就不明显了。

4.2 衬砌内力

衬砌横向内力在断面上的分布见图 8, 衬砌拱顶、拱脚和仰拱处纵向内力沿隧道纵向上的分布见图 9。

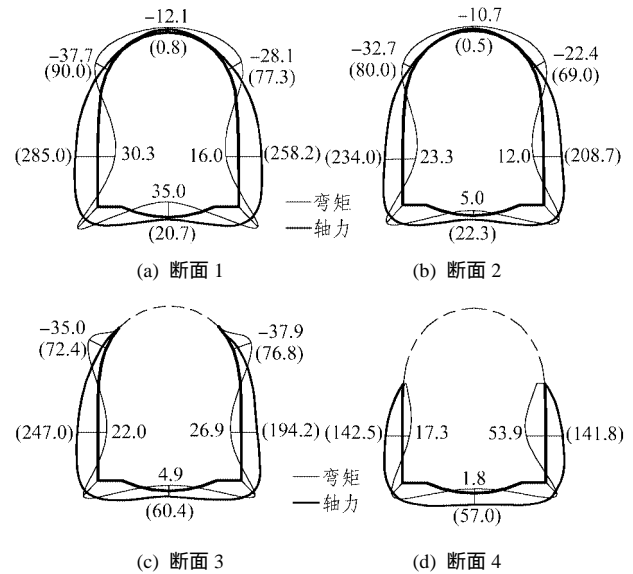


图 8 横向内力分布(轴力单位: kN; 弯矩单位: kN · m)
Fig.8 Distribution of circumferential axial force and bending moment (Unit : kN for axial force, kN · m for bending moment)

由图 8 可知: 横向轴力在横断面上基本呈对称分布, 全部受压, 拱顶最小, 边墙最大。拱顶、拱脚、边墙和仰拱处的横向轴力从洞口向洞内逐渐增大。横向弯矩在横断面上基本呈对称分布, 仰拱和边墙处为正弯矩, 边墙处正弯矩较大, 拱顶和拱脚处为负弯矩, 拱脚处负弯矩较大。拱顶、拱脚、边墙和仰拱处的横向弯矩从洞口向洞内逐渐增大。说明洞口段横向内力随覆盖层厚度的增大而增大。

由图 9 可知: 拱顶、拱脚、边墙和仰拱处的纵向轴力从洞口向洞内逐渐增大, 全部受压, 拱顶处纵向轴力最小, 拱脚处最大, 仰拱处较小; 左、右拱脚处纵向弯矩为负弯矩, 从洞口向洞内逐渐增大, 拱顶和仰拱处既有正弯矩又有负弯矩, 左、右拱脚处纵向弯矩最大。但从有限元计算结果看, 纵向弯矩和轴力在进入洞内一定距离(约 20 m)后逐渐趋于稳定。

纵向和横向轴力、弯矩数值在同一个数量级, 纵向轴力数值大于横向轴力, 纵向弯矩在拱脚处大于横向弯矩, 因此衬砌结构在洞口段的纵向内力不可忽略; 即洞口段衬砌结构既有横向轴力、弯矩,

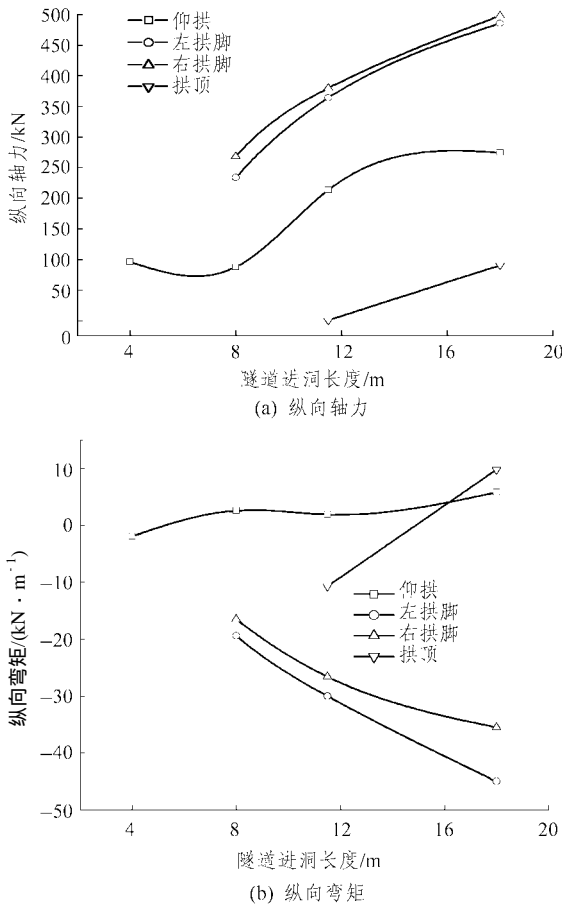


图 9 纵向内力沿隧道纵向分布

Fig.9 Distribution of longitudinal axial force and bending moment along tunnel longitudinal direction

又有纵向轴力、弯矩，受力特征类似于壳体结构，处于复杂的三维受力状态；设计时要考虑纵向效应的影响，按壳体结构设计比较合理。有限元计算中衬砌结构采用的就是壳单元，计算结果与模型试验吻合。

5 结 论

(1) 斜切式隧道门洞口段衬砌结构处于复杂的三维受力状态，既有横向轴力、弯矩，又有纵向轴力、弯矩，衬砌结构受力特征类似于壳体结构，按壳体结构设计比较合理。

(2) 隧道洞口段处于浅埋状态，围岩压力和衬砌内力从洞口向洞内逐渐增大，其大小与随覆盖层厚度增大而增大；围岩压力在仰拱处最大。

(3) 横向轴力在边墙处最大，而最大纵向轴力在拱脚处；横向最大正弯矩值在边墙处，横向最大负弯矩值在拱脚处；纵向最大正弯矩值在仰拱和拱顶处，纵向最大负弯矩值在拱脚处。

致谢 本文在研究和写作过程中得到关宝树教授的悉心指导与帮助，张俊儒博士、王飞、白国权、李树锋硕士参加了该项目的研究，在此深表感谢！

参考文献(References) :

- [1] 铁道部第二工程局. 铁道工程施工技术手册·隧道[M]. 北京：中国铁道出版社，1999.(The Second Engineering Bureau Railway Ministry. Technique Manual Railway Engineering Construction Tunnel[M]. Beijing：China Railway Publishing House，1999.(in Chinese))
- [2] 俞汝法. 论隧道洞口设计的构思和表现形式[J]. 隧道及地下工程，1985，6(4)：39-45.(Yu Rufa. Discussing of conceive and represent style of tunnel portal[J]. Tunneling and Underground Engineering，1985，6(4)：39-45.(in Chinese))
- [3] 高新强, 仇文革, 张会斌. 一种特殊形式公路隧道门设计[J]. 公路，2002，(7)：132-135.(Gao Xinqiang, Qiu Wenge, Zhang Huibin. Design for a special style highway tunnel opening[J]. Highway，2002，(7)：132-135.(in Chinese))
- [4] 关向群. 隧道洞口景观设计实用方法的研究[博士学位论文][D]. 成都：西南交通大学，2004.(Guan Xiangqun. The research of a practical method of aesthetics design in the tunnel entrance[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2004.(in Chinese))
- [5] 关向群. 隧道洞口景观设计研究[J]. 土木工程学报，2003，36(10)：42-45.(Guan Xiangqun. Study of landscape design at tunnel gate[J]. China Civil Engineering Journal，2003，36(10)：42-45.(in Chinese))
- [6] 关向群. 公路隧道景观数据库的编制及应用[J]. 公路，2003，(10)：2-5.(Guan Xiangqun. Establishment and application of landscape database of highway tunnel portals[J]. Highway，2003，(10)：2-5.(in Chinese))
- [7] 铁道部专业设计院，第一勘测设计院，第二勘测设计院，等. 洞门[M]. 北京：中国铁道出版社，1990.(Professional Design Institute of Railway，the First Survey and Design Institute，the Second Survey and Design Institute，et al. Tunnel Portal[M]. Beijing：China Railway Publishing Company，1990.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路隧道设计规范(TB 10003-2001)[S]. 北京：中国铁道出版社，2001.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. Design of Railway Tunnel(TB 10003-2001)[S]. Beijing：China Railway Publishing Company，2001.(in Chinese))
- [9] 程刚, 仇文革, 高新强. 单线铁路隧道斜切式隧道门模型试验研究[J]. 西南交通大学学报，2004，39(2)：152-156.(Cheng Gang, Qiu Wenge, Gao Xinqiang. Experimental research on bamboo-truncating tunnel portal for single-track railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2004，39(2)：152-156.(in Chinese))
- [10] 程刚. 新型铁路隧道门受力特征研究[硕士学位论文][D]. 成都：西南交通大学，2003.(Cheng Gang. Study on the mechanics characteristic of railway tunnel newly-fashioned portal[M. S. Thesis][D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2003.(in Chinese))