

# 大跨扁平连拱隧道施工时空效应试验

吴梦军<sup>1,2</sup>, 张永兴<sup>1</sup>, 蒋树屏<sup>2</sup>, 刘新荣<sup>1</sup>, 李忻彤<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067;  
3. 肇庆市广贺高速公路有限公司, 肇庆 526200)

**摘要:**大跨扁平连拱隧道设计上具有开挖跨度大和断面扁平的特点,而在施工中,由于其施工工序较多,围岩将受到多次扰动,衬砌结构也将受开挖的多次影响。因此,其受力和变形极为复杂,施工过程中开挖时空效应与四车道连拱隧道或分离式隧道存在较大的差异。利用“公路隧道结构与围岩综合实验系统(CTSSSRH)”,对大跨扁平连拱隧道的施工动态全过程进行了三维物理模拟,分析了围岩位移、应力随开挖步的变化规律,提出了大跨扁平连拱隧道施工时空效应。

**关键词:**隧道;开挖;大跨扁平;连拱隧道;时空效应;模型试验

中图分类号:U451.5 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)05-0054-05

## Experimental Analysis of Construction Time-Space Effect for Large Span and Flat Multi-Arch Tunnel

WU Meng-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-xing<sup>1</sup>, JIANG Shu-ping<sup>2</sup>, LIU Xin-rong<sup>1</sup>, LI Xin-tong<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, P. R. China; 3. Zhaoqing Guanghe Expressway CO. Ltd, Zhaoqing 526200, P. R. China)

**Abstract:** For the large span and flat, together with the interaction effect of construction and disturbance of surrounding rock, the mechanical of large span and flat multi-arch tunnel is very complicated, and the time-space effect is different from that of two-lane multi-arch tunnel or separated tunnel. Adopting the “CTSSSRH”, the 3-D dynamic process of the tunnel construction was simulated. Analyzing the rule of surrounding rock displacement and stress with excavation, the time-space effect of large span and flat multi-arch tunnel was proposed.

**Key words:** tunneling; excavation; large span and flat; multi-arch tunnel; time-space effect; model experiment

近年来,随着公路交通量的日益增大,在部分地区,四车道公路隧道已不能满足交通量的要求,双向六车道公路隧道已开始大量修建。而在洞口地形较为狭窄、脊谷相间的“鸡爪”地带及桥隧相连地段,连拱隧道与分离式隧道相比,可减少占地和路基土石方、路基防护、环境保护等工程量,并便于洞外接线。因此,六车道连拱隧道将会大量修建。

六车道连拱隧道开挖跨度大,一般大于 33 m,

而为了尽量减少开挖断面面积,其断面型式一般设计为三心圆或四心圆等扁平断面。除设计上具有的开挖跨度大、断面扁平等特点外,在施工中,施工方案一般采用三导坑法或中导正洞台阶法等分部开挖法,其施工工序较多,因此,围岩将受到多次扰动,衬砌结构也将受开挖的多次影响。设计和施工上的因素,导致六车道连拱隧道围岩与结构在施工过程中的受力和变形极为复杂,其施工时间、空间效应与四

收稿日期:2009-02-10

基金项目:广东省交通厅科技计划资助项目(200700021)

作者简介:吴梦军(1973-),男,高级工程师,博士生,主要从事隧道与地下工程的设计与研究,(E-mail)wumengjun@cmhk.com。

张永兴(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)cqyxzhang@163.com。

车道连拱隧道或分离式隧道具有较大的差异。对于四车道连拱隧道,目前中国有部分学者分别通过数值模拟<sup>[1-7]</sup>、模型试验<sup>[8-10]</sup>或现场监控量测<sup>[11-14]</sup>对施工时空效应进行了相关的研究,并取得了一定的研究成果。对于六车道大跨扁平连拱隧道,在设计、施工方案方面,部分学者<sup>[15-17]</sup>进行了一定的分析与研究,而在施工时空效应方面,中国相关研究进行较少。

## 1 试验方案

### 1.1 试验系统

根据研究的目的和要求,试验采用“公路隧道结构与围岩综合实验系统(CTSSSRH)”(如图 1)进行。该系统由招商局重庆交通科研设计院有限公司研制,由内加载系统、外加载系统、液压控制系统及数据采集处理系统等五大系统组成。其试验原理基于“先加载、后挖洞”,围岩自重应力采用液压千斤顶在模型试件外部加载进行模拟,应力与位移变化通过内埋压力盒及位移计测试,从而确保了模型试验应力状态与原型完全一致,能真实地反映原型的应力、应变特征。



图 1 公路隧道结构与围岩综合实验系统

模型试件几何尺寸为  $1.6 \times 1.6 \times 1.8 \text{ m}^3$ , 共分为 9 个断面,每个测试断面设位移测点 5 个(断面及测点布置如图 2),共设位移测点 45 个。位移数据通过数据采集系统直接采集,所采集位移均为径向位移。

断面编号	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
模板及测点展开示意图	•	•	•	•	•	•	•	•	•
模板大测点编号	L1-1	L2-1	L3-1	L4-1	L5-1	L6-1	L7-1	L8-1	L9-1
	L1-2	L2-2	L3-2	L4-2	L5-2	L6-2	L7-2	L8-2	L9-2
	L1-3	L2-3	L3-3	L4-3	L5-3	L6-3	L7-3	L8-3	L9-3
	L1-4	L2-4	L3-4	L4-4	L5-4	L6-4	L7-4	L8-4	L9-4
	L1-5	L2-5	L3-5	L4-5	L5-5	L6-5	L7-5	L8-5	L9-5

图 2 断面及测点布置图

每组模型试验中,选取 L4 断面埋设应变式微型

土压力计测试围岩压力,在左右主洞的拱顶、拱腰以及中墙顶部共 5 处埋设 A、B、C、D、E 测线,各测线位置与位移计位置一一对应(如图 3)。每处测线上共布置 5 个测点,分别埋设在隧道开挖轮廓线外 0 m、1.0 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m 处,应力利用静态应变仪测试进程后通过如下公式计算,计算后所得压力均为径向压力。

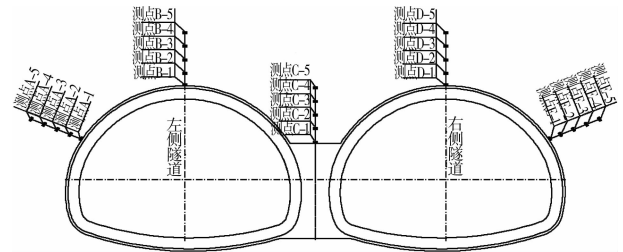


图 3 压力计布置示意图

$$P = K(F_i - F_0)$$

式中:  $P$  为土压力;  $K$  为标定系数;  $F$  为进程。

### 1.2 配比试验

根据依托工程地质勘察资料,并参考《公路隧道设计规范》(JTJ D0-2004)<sup>[18]</sup>中各级围岩物理力学指标标准值,取围岩的主要物理力学参数如表 1。通过多次配比试验并结合已做试验经验,骨料选用中砂,胶结材料选用石膏和石灰。模型原材料确定后,初步拟定 3 组配合比(配合比中第 1 位数字表示砂胶比,第 2 位数字表示胶结物中石膏含量的比例,第 3 位数字表示胶结物中石灰含量的比例),通过室内试验,测试到 3 组配比的主要物理力学参数(如表 1)。

表 1 模型与原型物体力学参数

材料	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度 $\sigma / \text{Mpa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$	弹性模量 $E_e / \text{GPa}$
原型	22.5	33.5	0.27	35	3.65
464	17	0.458	0.37	38	0.15
模型	482	17	0.501	42	0.86
582	17	0.485	0.28	39	0.52

几何相似比  $C_l$  是模型试验最基本的一个相似比,根据依托工程设计断面尺寸及内加载系统几何尺寸计算可得  $C_l = 54.5$ ,再利用相似理论原理<sup>[19]</sup>可以分别推导出容重相似比  $C_\gamma$ 、抗压强度相似比  $C_\sigma$ 、弹性模量相似比  $C_E$  等。另外,对于模拟隧道开挖过程的地质力学模型试验,由静力平衡方程及物理

方程可推导出其相似准则为  $\frac{C_\sigma}{C_l \cdot C_r} = 1$  及  $\frac{C_E}{C_\sigma} = 1$ 。

根据相似准则,可分析出各配比的相似程度。对于该试验,配比 464 的  $\frac{C_\sigma}{C_L \cdot C_r}$  与  $\frac{C_E}{C_\sigma}$  最接近于 1,其相似程度最好。因此,在该相似模型试验中,配比选用 464。

### 1.3 试验方案

大跨扁平连拱隧道开挖方案主要根据围岩地质条件来选定,根据设计文件和相关文献,该模型试验采用三导坑(洞)法进行研究,其施工工序示意如图 4。

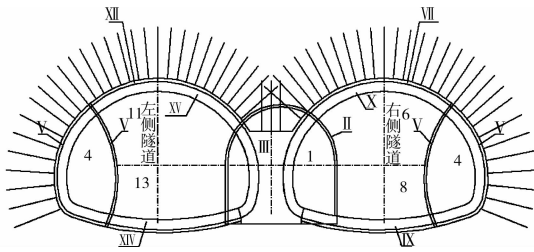


图 4 施工工序示意图

隧道埋深按 30 m 计算,围岩初始地应力仅考虑自重应力,不考虑构造应力等。初始地应力确定后,根据系统有关几何尺寸及相似比,通过计算可得模型试验的内、外加载压力及内外加载系统的油压。加载时,按 3 级均匀加载,加载完并稳压 30 min 后,按开挖步骤对内加载系统逐级卸载以模拟开挖,并同步通过数据采集系统采集位移和应力数据。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 位移分析

对采集数据进行计算后绘制位移历时曲线(典型断面 L3 断面的位移曲线如图 5),通过对位移历时曲线的分析可得:

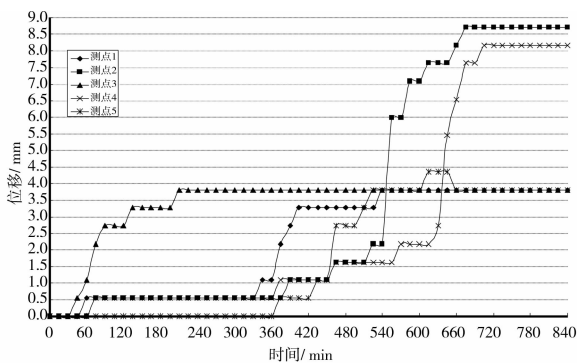


图 5 典型位移历时曲线

1) 试验成功地模拟了隧道开挖前掌子面围岩体内部发生的先期位移和开挖瞬间围岩体释放的弹塑性位移以及开挖后围岩体的蠕变变形,从而真实地

反映了开挖的三维空间问题和开挖的空间、时间效应,揭示了隧道围岩三阶段变形的全过程。

2) 位移历时曲线形状除测点 3(即中墙顶测点)外,总体呈 S 形,位移随开挖步呈台阶式增加。测点 3 因中隔墙的施做,其位移曲线与 S 形有所不同,即中墙施做后其位移基本不再增加,呈厂字形。

3) 测点 2、4(拱顶)位移远大于测点 1、5(拱腰)位移,且测点 1、5 在部分开挖步时,会向洞外发生变形。说明对于大跨扁平断面连拱隧道,围岩开挖后应力场重新分布,拱部围岩体在自重应力场作用下向洞内变形,而由于其跨度大、断面扁平的特点,支护与围岩联合结构体中产生的压力区将集中传递到边墙部或拱脚处压向围岩,导致边墙围岩体受挤压。从围岩位移与受力特征说明围岩总体失稳模式与四车道隧道存在较大的差别,拱顶下沉应作为隧道稳定判据的关键因素,而非水平收敛。

4) 在开挖当前断面时位移发生量最大,其位移量一般为测点最终位移的 45% 以上。这比例比宽度相同的分离式隧道要小,主要是因为两主洞施工时会相互扰动围岩,引起另一洞围岩位移的继续发生。同时,在开挖当前步时的曲线斜率最大,即开挖当前步时的位移速率最大。

5) 开挖前掌子面围岩发生的先期位移占测点总位移的比例总体约为 25%,但由于受先行洞开挖对后行洞的影响,开挖前掌子面围岩发生的先期位移占测点总位移的比例,后行洞稍大于先行洞。

6) 隧道开挖对位移影响的空间效应,因左右洞施工对围岩的相互扰动,其影响范围较四车道分离式隧道大,特别是后进主洞开挖对围岩位移的影响范围达开挖面前后的 3 倍洞跨以上。

### 2.2 应力分析

利用静态应变仪测试进程后,通过计算得到各测点的应力,并绘制各测线剩余应力  $\sigma$  与原始应力  $\sigma_0$  比的历时曲线(典型测线 B 的历时曲线如图 6)和最终应力曲线(如图 7),通过对各曲线的分析可得:

1) 隧道开挖后,围岩径向应力将释放,但洞周各部位应力释放程度不同,拱顶应力释放速度较快,而拱腰释放速度相对较慢。

2) 下台阶开挖时,随着拱顶应力松弛范围的扩大和变形的增大,拱顶处应力释放明显,而拱腰处应力变化不大。因此,开挖下台阶前,应注意加固拱顶,防止发生拱顶坍塌。

3)从最终应力曲线图分析,应力松动圈范围约为3.0 m,表明系统锚杆设计长度应不小于3.0 m。

4)在开挖掌子面前方约0.5~1.0D(D为隧道净宽)处,围岩应力与原始应力相比,增加约5%~15%,这表明在掌子面前方,存在围岩压力增压区。但掘进至0.5D后,围岩应力将逐渐减少。

5)开挖前掌子面围岩的应力释放率约为20%~25%,这与开挖前掌子面围岩发生的先期位移占测点总位移的比例大致相当。

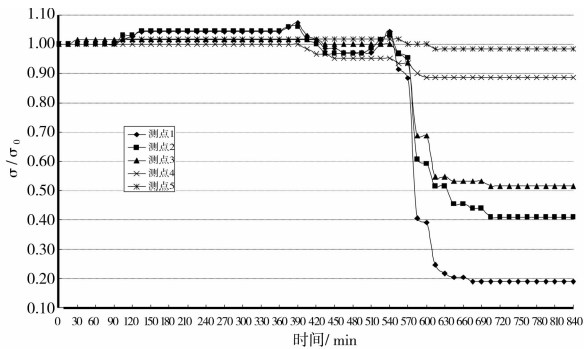


图6 典型测线应力比历时曲线

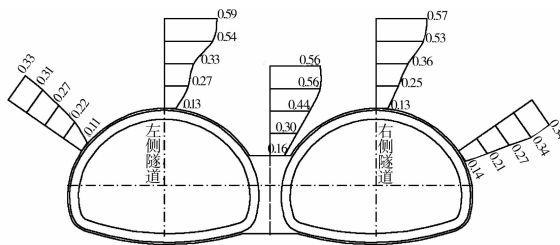


图7 最终应力曲线/MPa

#### 4 结论与建议

通过三维室内相似模型试验,模拟了大跨扁平连拱隧道施工全过程,对施工全过程中的位移、应力发生、发展规律进行了分析,得到了大跨扁平连拱隧道施工时空效应特征。

1)开挖前掌子面围岩发生的先期位移占测点总位移的比例总体约为25%,而其先期应力释放率约为20%~25%。

2)在开挖当前断面时位移发生量最大,其位移量一般为测点最终位移的45%以上。拱顶下沉值远大于水平收敛值,拱顶下沉应作为隧道稳定判据的关键因素。

3)隧道开挖对位移影响的空间效应,影响范围较四车道分离式隧道大,特别是后进主洞开挖对围岩位移的影响范围达开挖面前后的3倍洞跨以上。

4)应力松动圈范围约为3.0 m,设计时,系统锚杆设计长度应不小于3.0 m。

5)在开挖掌子面前方约0.5~1.0D(D为隧道净宽)处,存在围岩压力增压区。但掘进至0.5D后,围岩应力将逐渐减少。

#### 参考文献:

[1] 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(S2): 4946-4951.  
 SHEN YU-SHENG, 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(S2): 4946-4951.

[2] 胡庆安,夏永旭,王文正. 双连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2005, 25(1): 48-50.  
 HU QING-AN, XIA YONG-XU, WANG WEN-ZHEN. 3D Numerical simulation on double-arch tunnel's construction proce[J]. Journal of Chang an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 48-50.

[3] SOLIMAN E, DUDDECK H, AHRENS H. Two and three dimensional analysis of closely spaced double-tube tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1993, 8(1):13-18.

[4] HWANG J H, KIKUMOTO M, KISHIDA K. Dynamic stability of multi-arch culvert tunnel using 3-D FEM[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21: 384-389.

[5] SULEM J, PANET M, GUENOT A. An analytical solution for time-dependent displacements in circular tunnel. Int. J. Rock Mech. MinSci. & Geomech. Abstr. 1987, 24(3): 155-164

[6] GALLI G, GRIMALDI A, LEONARDI A. Three-dimensional modeling of tunnel excavation and lining [J]. Computers and Geoteehnies. 2004, 31(3): 171-183.

[7] UNL T, GERCEK H. Effect of poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 547-553.

[8] 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 CHUA. Study on the reasonable

- construction method for a double-arch road tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2003, 40(6): 1-6.
- [9] 吴梦军, 连晋兴, 黄伦海, 等. 连拱隧道围岩稳定性模型试验[J]. *地下空间*, 2004, 24(4): 461-464.  
WU MENG-JUN, LIAN JIN-XING, HUANG LUN-HAI, et al. Testing study on the surrounding rock of multi-arched tunnel[J]. *Underground Space*, 2004, 24(4): 461-464.
- [10] 刘涛, 沈明荣, 高伟君, 等. 连拱隧道围岩压力的释放率分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(1): 50-54.  
LIU TAO, SHEN MING-RONG, GAO WEI-JUN, et al. Rock mass pressure release rate analysis for double-arch tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, 3(1): 50-54.
- [11] 曲海锋, 刘丰军, 叶飞. 浅埋偏压连拱隧道监控量测特征分析[J]. *现代隧道技术*, 2007, 44(1): 52-55.  
QU HAI-FENG, LIU FENG-JUN, YE FE. Features of monitoring for a double-arch shallow tunnel sustained unsymmetrical pressure[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2007, 44(1): 52-55.
- [12] 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.
- [13] 袁勇, 王胜辉, 杜国平. 双连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 480-484.  
YUAN YONG, WANG SHENG-HUI, DU GUO-PING. In-situ testing study on lining system of double-arched tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(3): 480-484.
- [14] WU C S, LI J X, CHEN X, et al. Blasting in twin tunnels with small spacing and its vibration control. *Tunnelling and Underground Space Technology* [J]. 2004, 19: 518-523.
- [15] 丁文其, 王晓彤, 李志刚, 等. 龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(22): 4042-4047.  
DING WEN-QI, WANG XIAO-XING, LI ZHI-GANG, et al. Optimal analysis of construction schemes for shallow large span longshan twin tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(22): 4042-4047.
- [16] 綦志富, 孙波. 大跨度双跨拱隧道的 New 奥法施工[J]. *铁道工程学报*, 2002, (1): 62-65.  
QI ZHI-FU, SUN BO. Construction of multi-arch tunnels with twin large spans by NATM[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2002, (1): 62-65.
- [17] KATUSHI MIURA, HIROSHI YAGI, HIROMICHI SHIROMA. Study on design and construction method for the New Tomei-Meishin expressway tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18: 271-281.
- [18] 重庆交通科研设计院. JTGD 70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

(编辑 王秀玲)