

## 浅埋轻轨隧道支护体应力监测及失稳控制\*

贾剑青<sup>1</sup>, 王宏图<sup>1,2</sup>, 李晓红<sup>1,2</sup>, 胡国忠<sup>1</sup>, 陈庆<sup>1</sup>, 梅勇<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 西南能矿资源开发利用与安全  
技术研究院, 重庆 400044)

**摘要:**结合重庆市轻轨较新线大坪车站大跨度地下空间DK7+692断面施工支护体应力监测的工程实例,阐述了该大跨度地下空间支护结构的参数选择、地下空间的开挖方法、支护体结构的应力量测方法及测试手段;分析了支护体初期支护工字钢拱应力、锚杆轴力、喷射混凝土内应力、临时工字钢支撑应力、二次衬砌钢筋应力等测试结果和变化规律;确定了工字钢拱应力急剧增大而可能引起支护体系失稳的原因。在此基础上,针对施工中出现的问題,及时调整了施工方案及支护措施,控制了支护体系的失稳,避免施工中险情发生,实现了隧道的信息化施工和施工安全。

**关键词:**新奥法; 监测; 大跨度; 支护; 稳定性

**中图分类号:**U293.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)01-0067-04

### Stress Measurement and Deformation Control of Support System in Shallow Light Railway Tunnel

JIA Jian-qing<sup>1</sup>, WANG Hong-tu<sup>1,2</sup>, LI Xiao-hong<sup>1,2</sup>, HU Guo-zhong<sup>1</sup>, CHEN Qin<sup>1</sup>, MEI Yong<sup>1</sup>

(1. Key Lab for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Hazard Control Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Research Institute of Southwest China Energy and Mineral Resources Development & Safety Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Combined with the real example of monitoring pressure on the supporting system in the long span underground space of DK7+692 section at Jiao-Xin line of Chongqing light railway, it is set forth the methods about choosing the support system and its parameter, digging methods of underground space, measuring and testing methods for the stress of the support system; the testing results and variation pattern were analyzed for the stress of the initial supporting I-steel, axial stress of bolt, stress of shot-concrete, supporting pressure of temporary I-steel and stress of steel of the second lining, then, the reason for deformation of the support system induced by sharp increase of I-steel was determined. Based on this, considering the real problem, the construction plan and the support system is changed, the deformation of support system was under control and the danger was avoided, the informative construction and construction safety were realized.

**Keywords:** NATM; monitoring; long span; support; stability

新奥法(NATM)在隧道施工中的应用越来越广泛。新奥法支护体以喷混凝土、锚杆和钢拱架、钢筋网为初期支护手段,以复合式衬砌作为支护体系,通过施工量测及其信息的及时反馈来实现隧道工程施工的合理化、信息化、科学化<sup>[1-3]</sup>。施工监测是设计、施工是否合理的直接判断手段,是监视围岩及支护体系是否稳定的重要一环,是及时调整施工方案及支护方法的重要依据。

大坪车站是重庆轻轨较新线的重要组成部分,该车站暗挖段开挖跨度大,地面高层建筑物密集,围岩比较软弱,自稳能力差,围岩支护难度相当大。为确保地面建筑结构的安全,在该工程地下开挖施工中,对支护体初期支护工字钢拱应力、锚杆轴力、喷射混凝土内应力、临时工字钢支撑应力、二次衬砌钢筋应力进行监测。在此基础上,针对施工中出现的问題,及时调整了施工方案及支护措施,控制了支护体系的失稳,避免施

\* 收稿日期:2005-07-28

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50334060),国家自然科学基金项目(50474025),重庆市应用基础研究项目资助和重庆大学研究生创新实践基金项目

作者简介:贾剑青(1978-)男,甘肃省静宁县人,博士生,主要从事岩土力学与岩土工程稳定性研究。

工中险情的发生。

### 1 工程概况

重庆轻轨较新线大坪车站隧道起止里程 DK7 + 609.7 ~ DK7 + 804, 全长 194.3 m。DK7 + 609.7 ~ DK7 + 658.2 采用明挖方式施工, DK7 + 658.2 ~ DK7 + 804 为暗挖施工。暗挖段长度为 145.8 m, 最大开挖宽度为 26.3 m, 开挖高度为 20.6 m, 最大开挖面积为 430 m<sup>2</sup>, 纵坡为 0.3%。大坪车站隧道围岩多属 III、IV

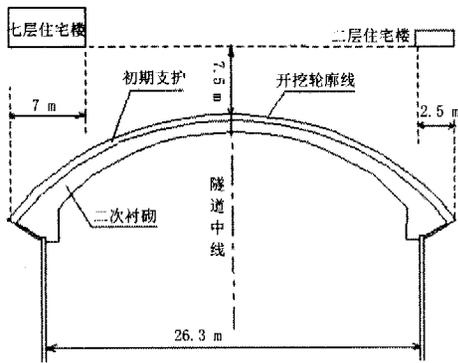


图1 DK7 + 692 断面地面建筑物与隧道位置

类,以泥岩和砂岩为主,强度较低,自稳能力差,且岩性变化比较大。其中 DK7 + 692 断面围岩为 II 类,该断面左侧有一幢 7 层居民住宅楼,住宅楼基础距隧道拱顶 7.5 m,嵌入隧道左侧开挖线以内 7 m 左右;右侧有一幢 2 层居民住宅楼,嵌入隧道右侧开挖线以内 2.5 m 左右。DK7 + 692 断面地面建筑物与隧道关系如图 1 所示,隧道顶板岩土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 岩层物理力学参数

岩性	容重/ kN · m <sup>-3</sup>	抗压 强度 /MPa	岩体内 摩擦角 /°	内聚力 /kPa	弹性 模量 /MPa	岩体纵 波速度 /m · s <sup>-1</sup>	完整性 系数
泥岩	25.2	14.4	33.6	578	2 804	2 910	0.78
砂岩	24.4	37.3	41.6	1 420	3 450	3 302	0.83

### 2 支护结构及其参数

本次支护采用了大拱脚薄边墙的结构形式。支护结构为复合式支护结构。初期支护以锚杆、工字钢拱及喷射混凝土组成联合支护体系,二次衬砌采用模注钢筋混凝土结构。隧道在初期支护与二次衬砌结构之间设置 EVA 高强度型合成树脂防水卷材,其厚度为 1.5 mm 厚。DK7 + 692 断面支护体参数如表 2。

表 2 支护体参数

桩号	衬砌类型	初 期 支 护				二次衬砌
		锚杆	钢筋网	喷射混凝土	钢拱架	
DN7 + 658.2 ~ 745	车站主体 III 类 围岩衬砌断面	φ25 中空注浆锚杆 @1.0 × 1.0 m L=3.5 m	φ6.5 × φ8 m @20 cm × 20 cm	400 ~ 550 mm 厚 C20 混凝土	20b 工字钢 间距 0.5 m	C30 钢筋混凝土 (S8) 厚度 ~ 1 420 mm

### 3 开挖方法

该段施工开挖步序如图 2。具体开挖步骤如下:

- 1) 先开挖拱部左、右侧导坑 1, 拱部左、右导坑平行作业, 左、右导坑开挖面距离不小于 15 m。
- 2) 开挖拱部上台阶核心土 2, 使拱部左、右导坑连通并使拱部支护闭合形成环 (II)。
- 3) 组装拱部二次衬砌台车, 开挖拱下台阶核心岩土 3, 进行拱部二次衬砌 (III)。
- 4) 开挖下部核心岩土 4, 左右错步开挖下部边墙部位岩土 5 并及时进行锚喷初期支护 (IV)。

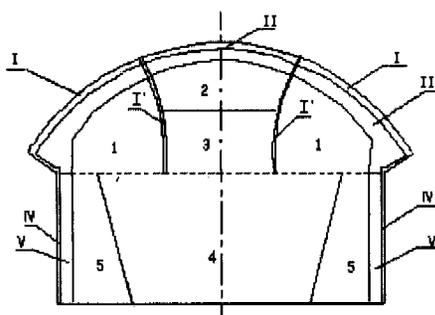


图2 DK7 + 692 断面开挖步序

- 5) 组装边墙二次衬砌整体式台车, 对左、右边墙进行二次衬砌 (V)。

表 3 测点布置

监测断面	监测内容	测点位置	传感器型号
DN7 + 692	锚杆轴力	中线拱顶	GY - 185
		右侧拱腰	GY - 185
	工字钢拱应力	左侧拱腰	XYJ - 2
		右侧拱腰	XYJ - 2
	喷射混凝土	左侧拱腰	MHY - 150
		中线拱顶	MHY - 150
右侧拱腰		MHY - 150	
临时钢支撑应力	拱顶左侧壁导洞	XYJ - 2	
二次衬砌钢筋应力	左侧拱腰	GY - 185	
	中线拱顶	GY - 185	
	右侧拱腰	GY - 185	

### 4 量测布置及测试手段

#### 4.1 量测断面布置

根据车站隧道地面建筑物的分布以及洞内开挖断面的情况, 总共布置了 6 个监测断面, 监测断面的测点布置及传感器型号如表 3 所示。

#### 4.2 测试手段

- 1) 初期支护工字钢拱应力和临时钢支撑应力监

测采用XYJ-2型钢弦传感器。在工字钢拱或临时钢支撑架设到位后在待测位置焊好传感器支座,待其冷却后安装传感器。

2) 锚杆轴力量测采用直径与锚杆一致的GY-185型钢筋应力计。在安设锚杆前将锚杆截断,将传感器串联焊接在锚杆待测位置处,然后用砂浆锚固含有传感器的锚杆,传感器位置在距离锚杆孔口0.5~1.0 m的位置处。

3) 初期支护与围岩、初期支护与二次衬砌接触压力量测采用JSY-110型钢弦双膜压力盒,在初支喷射混凝土前或二次衬砌封模前在待测位置安设。

4) 喷射混凝土内应力量测采用MHY-150型混凝土内应力计。安装前先将传感器预制在强度与喷射混凝土一样的混凝土块中,喷射混凝土前将含有传感器的混凝土块固定在测点位置。

5) 二次衬砌钢筋应力监测采用GY-185型钢筋应力计。二次衬砌钢筋铺设完毕未浇注混凝土前截断待测位置的钢筋,将传感器串联在该钢筋上,作相关防护并将线路引出即可。

## 5 支护体应力监测

工程施工过程中,对DK7+692断面锚杆轴力、工字钢拱应力、喷射混凝土内应力、二次衬砌钢筋应力及临时钢支撑应力进行监测,监测结果如图3~5所示。

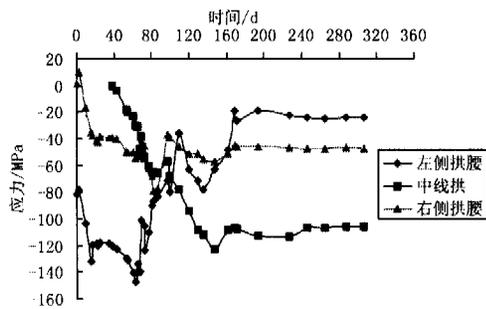


图3 DK7+692断面工字钢应力时程曲线

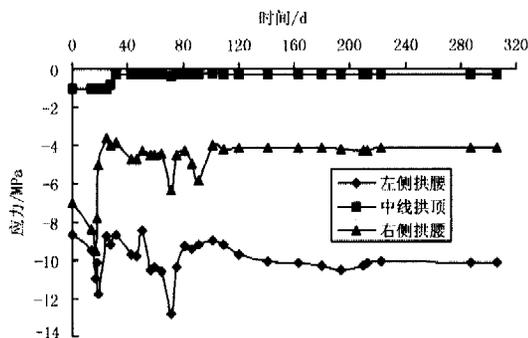


图4 DK7+692断面喷射混凝土内应力时程曲线

从图3~图5可看出,DK7+692断面工字钢应力持续上升,左侧拱腰工字钢应力在支护后第14 d已达到-125 MPa,第15 d达到-132.5 MPa;此时,该断

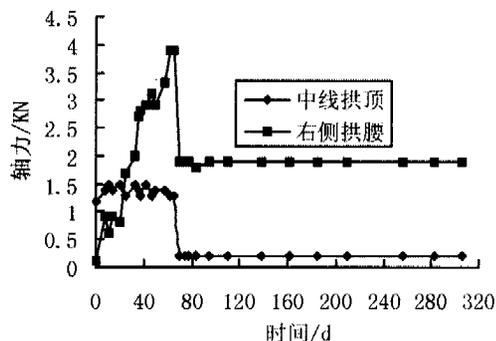


图5 DK7+692断面锚杆轴力时程曲线

面左拱腰喷射混凝土内应力已达到-12 MPa,右侧拱腰锚杆轴力已达到1.5 kN,且处于急剧上升状态。按照支护体应力变化趋势,支护体系应力随时可能达到其强度而失去有效支撑能力并导致险情发生。为此,必须对支护体系的进行失稳控制处理<sup>[4-6]</sup>。

## 6 支护体失稳控制及分析

鉴于该支护体的实际情况,对DK7+692断面支护体采取以下两个重要举措:

1) 暂停该段隧道拱部核心土开挖,对已开挖拱部核心土段导洞进行临时工字钢(20#工字钢)斜撑加固;并对左导洞临时钢支撑每隔6 m安设一个临时工字钢支撑应力传感器监测临时工字钢支撑的受力情况。临时钢支撑应力曲线如图6所示。

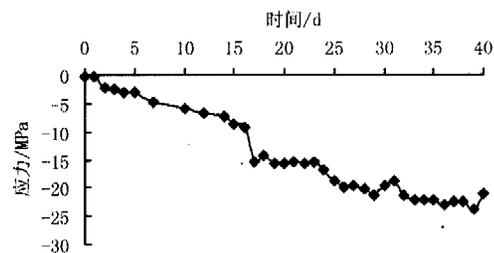


图6 DK7+692临时钢支撑应力时程曲线

2) 对DK7+692断面前6 m后12 m段进行锚杆网复喷加固。

从图3~图5可以看出,经过支护体失稳处理后,工字钢应力持续下降,并保持在-120 MPa左右;喷射混凝土内应力也从-12 kN下降到-8 kN左右并保持稳定。结果表明,抢险措施是有效的。

随着工程的进展,到支护后第60 d左右,由于隧道拱部左侧临时钢支撑的拆除,工字钢应力又有所回升,在第61 d时急剧上升到-143.5 MPa左右;喷射混凝土内应力和锚杆轴力都呈上升趋势。为此,决定在临时工字钢拱拆除的同时对拱部进行二次衬砌,二次衬砌钢筋应力时程曲线如图7所示。

从图7可以看出,该断面中线拱顶二次衬砌钢筋应力在出现一定幅度上升后趋于稳定,左、右两侧拱腰

测点应力出现小幅度波动后趋于稳定。最终观测值为:左侧拱腰  $-32.2$  MPa、中线拱顶  $-104.3$  MPa、右侧拱腰  $-35.3$  MPa。二次衬砌充分发挥了支护功能。

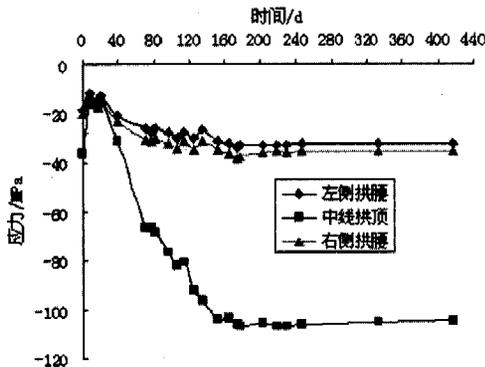


图7 DK7+692断面二次衬砌钢筋应力时程曲线

施作二次衬砌后,尽管工字钢应力、喷射混凝土内应力以及锚杆轴力均有不同程度的波动,但是应力都比较小,在安全范围内。喷射混凝土内应力以及锚杆轴力也都有明显的下降。左侧拱腰喷射混凝土内应力最大,为  $-9$  MPa 左右,右侧拱腰为  $-4$  MPa 左右,而中线拱顶喷射混凝土内应力接近于零;中线拱顶锚杆轴力从  $1.3$  kN 降至  $0.2$  kN,右侧拱腰从  $3.9$  kN 降至  $1.9$  kN,之后基本处于稳定状态。拱部二次衬砌前后锚杆轴力的变化是支护体系受力重新调整的结果,二次衬砌后,二次衬砌成为支护体系中的主要成份,围岩自承力在支护体系中所占的比例明显下降<sup>[7-9]</sup>。

## 7 结论

1) 由于隧道开挖跨度太大,隧道围岩比较软弱(II类),且该断面拱顶有两幢居民住宅楼,地面的集中荷载使隧道工字钢拱局部应力集中。

2) 在施作临时钢支撑后,工字钢应力、锚杆轴力

以及喷射混凝土内应力都有显著下降,说明此次失稳处理过程中,临时钢支撑起了巨大的作用。

3) 在回收临时钢支撑的过程中及时施作二次衬砌,在此过程中,工字钢应力有所波动,但是都在安全范围内。二次衬砌在改善围岩初期支护受力状态以及增加初期支护与围岩的稳定性方面起作十分重要的作用。由此看来,大跨隧道及时施作二次衬砌是十分必要的。

## 参考文献:

- [1] 冯卫星,徐明星. 铁路隧道新奥法施工新实践[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(4):524-526.
- [2] 李晓红,王宏图,杨春加. 城市地下空间开发利用问题探讨[J]. 地下空间与工程学报,2005,3(1):319-322.
- [3] 康宁. 东港隧道的施工监控[J]. 岩石力学与工程学报,1998,17(2):140-147.
- [4] 黄宏伟,徐凌. 大风哑口岩石公路隧道围岩及初期支护变形与内力研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):44-52.
- [5] 马建宏,刘洪洲. 华莹山隧道复合式衬砌的支护抗力评估[J]. 矿山压力与顶板管理,2003,(4):17-21.
- [6] 陈秋南,张永兴,陈建功. 偏压双连拱公路隧道围岩稳定性动态预测分析[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(1):62-66.
- [7] 刘庭金,朱合华,丁文其. 某高速公路隧道二次衬砌安全性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):75-78.
- [8] 贾剑青,王宏图,李晓红. 大埋深隧道软硬交替复合顶板岩体变形破坏分析[J]. 岩土力学,2005,26(6):937-940.
- [9] 李晓红,王宏图,贾剑青. 隧道及地下工程围岩稳定性及可靠性分析极限位移判别[J]. 岩土力学,2005,26(6):850-854.