

文章编号:1000-582X(2008)05-0568-05

# 浅埋大跨连拱隧道的变形监控及数值模拟

岳 顺,代高飞,皮文丽

(重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400030)

**摘 要:**在浅埋大断面大跨度双连拱隧道开挖过程中,对隧道进出口边坡点、地表点、拱顶下沉量等进行了监控量测,分析了隧道进出口边坡点、地表点、拱顶下沉量和隧道上覆岩层随开挖的运动变化规律及隧道结构的受力情况。数值模拟结果表明,浅埋大跨度双连拱隧道开挖施工对相邻隧道的受力状态和稳定性会产生很大的影响,施工过程中应加强对中导洞、隧道进出口等的监测,掌握连拱隧道开挖左右洞相互影响的规律,及时反馈指导施工,并采取相应的支护措施,确保施工安全。

**关键词:**连拱隧道;监控量测;变形;数值模拟

中图分类号:U456

文献标志码:A

## Deformation monitoring and numerical simulation of shallowly-buried long-span double-arch tunnel

YUE Shun, DAI Gao-fei, PI Wen-li

(College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** Monitoring and measuring of new Austrian tunnelling method (NATM) was conducted with a Leica TCA2003 Total Station and an XP99 Cymometer in a shallowly-buried long-span tunnel. The deformation and movement of country rock in tunnel were obtained to guide tunnel construction. Based on the country rock deformation, the optimum time for primary and permanent support was applied. Optimum timing successfully can avert accidents in construction and enhance construction quality. Numerical simulation indicates that tunnel excavation may have great influence on surrounding rock stability. It is important to reinforce monitoring to relevant locations during the construction process, to have timely feedback to guide construction, to adopt corresponding shoring measures, and to ensure construction safety.

**Key words:** double-arch tunnel; deformation; monitoring and measuring; numerical simulation

某隧道是典型的全浅埋大断面大跨度双连拱隧道,隧道采用整体式双连拱单洞单向掘进。隧道位于 3 个构造断裂带交汇处,地层软弱破碎。隧道全长 87 m,双跨达 31 m,最大埋深仅 13 m。隧道近 1/3 处于 F3 断层破碎带,围岩破碎,以 II 类为主。采用隧道方案是为了节约土地资源。在隧道施工中要特别避免对地质环境、地下水环境以及地表生态

环境的影响。同时,为保证隧道施工的安全,实施软弱破碎地层全浅埋大跨度大断面双连拱隧道新奥法施工监测工作<sup>[1-2]</sup>。

### 1 监控量测设计

#### 1.1 监测项目及测点布置

根据行业标准《公路隧道施工技术规范》

收稿日期:2007-12-21

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(50374084)

作者简介:岳顺(1966-),男,高级工程师,重庆大学博士研究生,主要从事岩土力学方向的研究,(Tel)13708368179;  
(E-mail)gaofei7411@sohu.com。

(JTJ042-94)及隧道设计中有关监测项目的规定,隧道监测内容主要包括拱顶下沉、隧道地表下沉、围岩内部位移和边坡稳定监测等。隧道中导洞和主洞施工都是从出口向进口单向掘进。根据隧道的施工条件和地质条件,左右洞掌子面最小相距 20 m。由于隧道的进口和断层破碎带相交,所以隧道监测断面的间距取规范规定的下限,即每 10 m 布设一个断面<sup>[3-4]</sup>。

### 1.2 监测仪器与监测频率

隧道边坡、地表点和拱顶下沉测量采用 Leica TCA2003 电子全站仪。TCA2003 全站仪具有快速、精度高、全自动化特点,以光学方式确定测点的三维坐标,能获取测点更全面的三维位移数据。围岩内部位移在地表埋设多点位移计,用河海大学自行研制的 XP99 型振弦式频率测定仪进行测量<sup>[5-6]</sup>。根据规范,结合施工和地质条件,确定各监测项目的监测频度与监测次数如表 1。当观测值相对稳定时,可适当降低观测频率;当达到报警指标或观测值变化速率加快或出现危险事故征兆时,加密观测<sup>[4]</sup>。根据《公路隧道施工技术规范》(JTJ042-94)规定,结合隧道地质条件和设计资料,隧道周边最大允许相对位移(指实测位移值与两测点间距离之比,或拱顶位移实测值与隧道宽度之比)为 0.20%~0.80%。地表点(C1~C5)、多点位移计(1~4)和边坡点(1~9;进出口顺序相反)的布设如图 1 所示。

表 1 各监测项目的监测频度与监测次数

洞内埋设项目	地表埋设项目	监测频度
1~15 d	$L < 2B$	1~2 次/d
16~30 d	$2B < L < 5B$	1 次/2 d
1~90 d	$L > 5B$	1~2 次/7 d
>90 d		1~3 次/30 d
量测次数		32 次

说明:  $L$  为掌子面距量测断面的距离,  $B$  为隧道宽度。

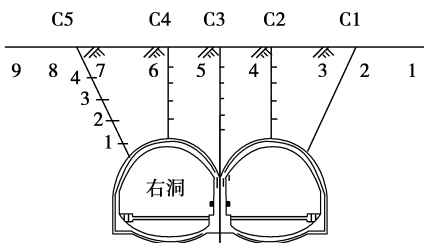


图 1 测点布置示意图

## 2 现场量测

由于变形监测关心的是各测点的相对位移,所以用徕卡全站仪对隧道变形进行测量时,无须将整个监测网附到隧道施工坐标系内,根据隧道监测工作的实际情况,建立了符合工程习惯的直角坐标系。利用当地的测绘控制点作为坐标系定向坐标,以保证其稳定性。用 XP99 型振弦式频率仪对多点位移计实现了远程适时自动测量<sup>[4]</sup>。

## 3 数据处理分析

1) 进口边坡点累积下沉曲线和下沉量如图 2 所示。从图 2 可以看出,进口边坡点累积下沉曲线呈漏斗形,位于左洞拱顶的 4 号测点和位于右洞顶的 6 号测点分别下沉了 20.854 mm 和 29.680 mm,但位于中墙上部的 5 号测点也下沉了 26.149 mm,下沉量仅次于 4 号测点,这是由于进口段中墙刚施工好,混凝土龄期刚到 7 d,隧道右洞就贯通了,中墙的受力情况还不理想,到 11 月 29 日,边坡变形还很明显<sup>[7]</sup>。

2) 出口边坡点累积下沉曲线和下沉量如图 2 所示。出口边坡点位于右洞拱顶的 3 号测点和位于左洞拱顶的 6 号测点沉降较明显,分别下沉了 34.393 mm 和 36.385 mm。位于中墙上部的 5 号测点下沉了 9.382 mm,是开采影响范围内下沉量较小的测点,说明中墙的受力情况良好。各测点在下沉过程中均出现过反弹,这与施工影响有关。下沉量最大的 3、4 和 6 号测点在隧道施工过程中下沉量有波动,边坡变形主要集中在 9 月 30 日至 11 月 9 日,历时 40 d。从 11 月 9 日起边坡变形明显趋缓,这是由于左右洞掌子面距离出口边坡渐远,对边坡影响降低的缘故<sup>[8]</sup>。

3) 右洞 K0+238.8 断面的拱顶下沉活跃期为 8 月 31 日至 9 月 14 日,该两周内的下沉量占总下沉量的 90%。从 9 月 14 日起该断面各测点下沉较平稳, G1、G2、G3 点的下沉量分别为 16.51 mm、18.26 mm 和 15.25 mm,拱顶下沉量较大,如图 3 所示<sup>[9]</sup>。说明该断面地质条件较差,受施工影响较大。

左洞 K0+241.8 断面的拱顶下沉活跃期为 9 月 9 日到 9 月 23 日,历时两周。活跃期内拱顶下沉量为总下沉量的 90% 以上。该断面的下沉量较小,最大下沉量不到 5 mm,说明该断面地质条件较好,受施工影响较小,如图 4 所示。

4) K0+178 断面各测站的多点位移曲线如图 5 和图 6 所示。该断面的 A1、A2 和 A3 测站位移量

相近,最大位移的 1 号测点均小于 5.00 mm,其它测点的位移量更小,岩体运动对地表影响很小,说明隧道上覆岩层在 A1、A2 和 A3 测站的松动层较薄,上覆岩层自身已形成承力结构。A4 测站各测点运动规律相似,下沉量也相近,该测站位于右洞拱顶,施工对该测站的影响已经波及到地表,说明隧道该点上覆岩层均处于松动层内,支护结构要承担上覆岩层的所有重力。A5 测站位于右洞边墙以外,受施工影响小,各测点的下沉量最大不到 1.00 mm。A1、A2、A3 和 A4 测站上方岩层运动活跃期在 10 月 10 日到 10 月 21 日,在这期间,右洞左洞掌子面先后经过 K0+178 里程,造成对该断面的影响。从 10 月 21 日开始,该断面各测点的运动明显减弱,逐步趋于稳定。

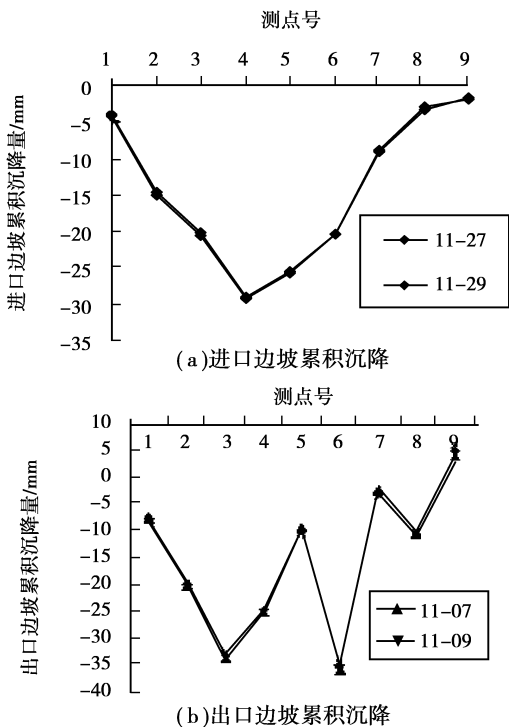


图 2 边坡累积下沉曲线

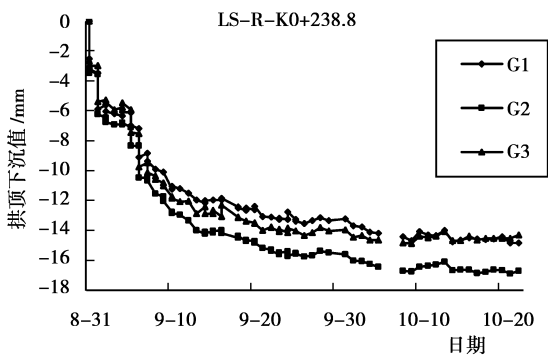


图 3 右洞 K0+238.8 断面拱顶下沉曲线

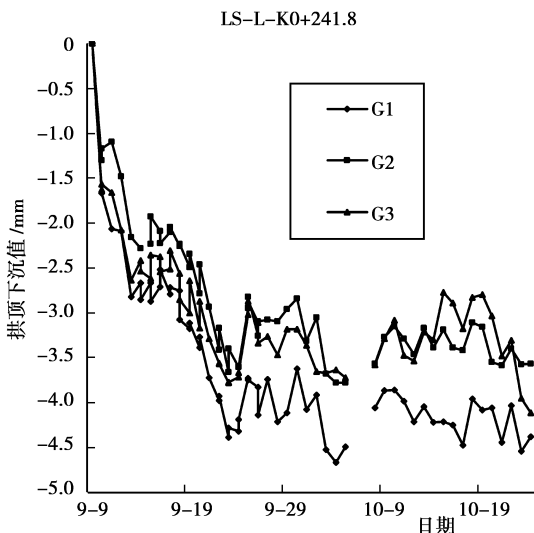


图 4 左洞 K0+241.8 断面拱顶下沉曲线

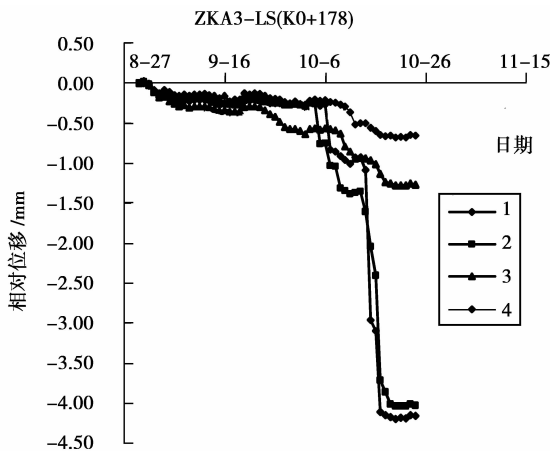


图 5 多点位移计 A3 测站下沉曲线

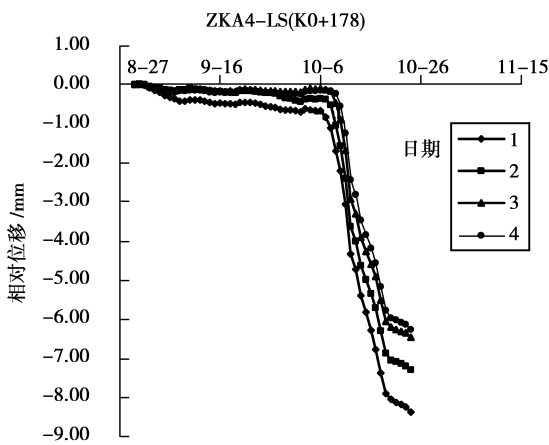


图 6 多点位移计 A4 测站下沉曲线

图 8 所示。该断面的 B2、B3、B4 和 B5 测站位移量相近,岩层运动规律也相似,施工对该测站的影响已经波及到地表。B1 测站位于左洞边墙以外,受施工影响小。B2、B3、B4 和 B5 测站上方岩层运动活跃期在 10 月 11 日到 10 月 15 日。

K0+198 断面各测站的多点位移曲线如图 7 和

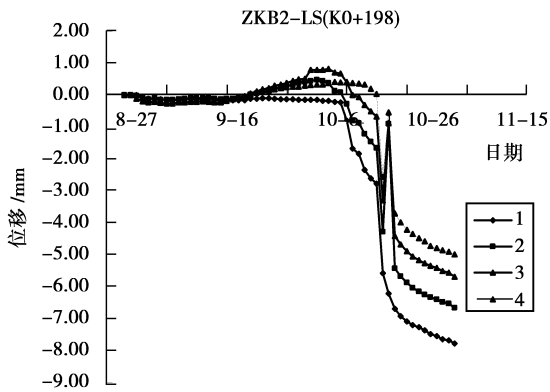


图 7 多点位移计 B2 测站下沉曲线

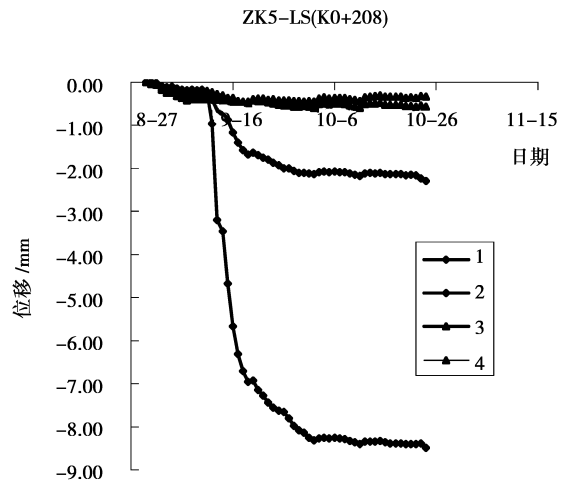


图 10 多点位移计 C5 测站下沉曲线

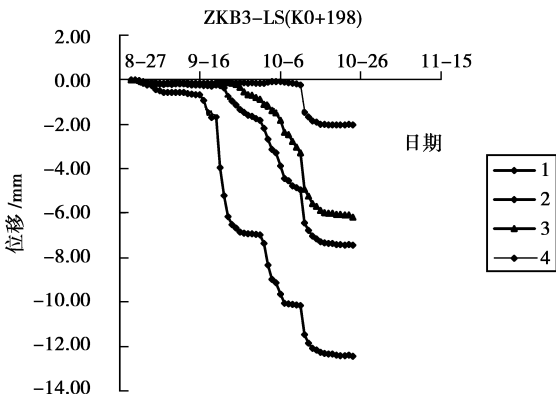


图 8 多点位移计 B3 测站下沉曲线

K0+208 断面 C1 和 C5 测站的多点位移曲线如图 9 和图 10 所示。说明该断面岩体运动活跃期在 9 月份,历时近 30 d,从 10 月 6 日左右岩体运动趋缓。C1 和 C5 测站最大位移量分别为 4.24 mm 和 8.45 mm。

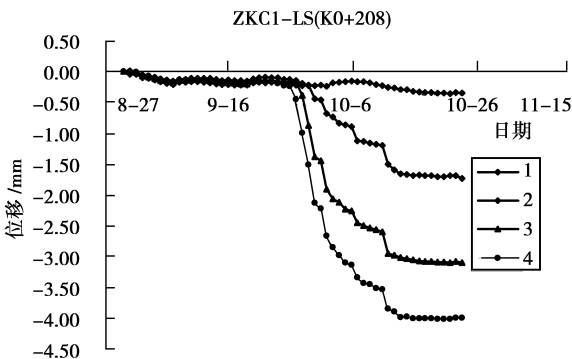


图 9 多点位移计 C1 测站下沉曲线

数值计算,模拟隧道施工过程中围岩与支护结构的力学行为。计算拟建立包含整条隧道和周围岩体的三维有限元模型,其中拟定模型中隧道开挖的方向为 Z 轴的负向,竖直方向为 Y 轴正方向,根据右手规则,沿开挖方向看,水平向右是 X 轴正方向。模型的物理力学参数按照表 2 进行选取。其中假设隧道围岩和混凝土是弹塑性材料进行分析,并遵循线性 Mohr-Coulomb 屈服准则。同时,假设锚杆是线弹性材料。数值分析模型如图 11 所示。图 12 是隧洞拱顶沉降位移图。分析计算结果可以知道,隧道拱顶位移量较洞底隆起量的数值较小,左右两洞的变形与洞底隆起一样,受地形和隧洞开挖先后次序影响很大。从施工开始时,右洞的拱顶沉降量大于左洞,到施工结束时两洞沉降量基本相等。通过参照实际施工时间和施工的先后次序,对比计算结果,可以看出施工次序对于隧洞变形过程和变形量是有影响的。

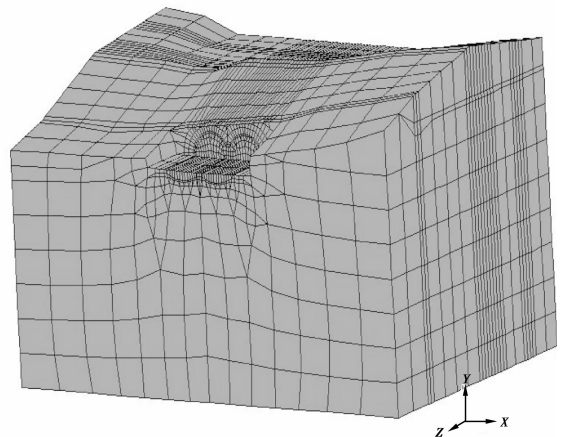


图 11 数值分析模型

## 5 数值分析

基于施工过程中遇到的问题,结合现场监测分析,采用有限元软件 MARC 对隧道的施工过程进行

相邻隧道的开挖过程中,掌子面应该保持合适的

距离,以降低隧道开挖时的不利影响。数值分析表明,该隧道左右洞掌子面位置距离 20 m 左右时,两洞开挖的互相影响较小。同时,由于连拱隧道拱顶和拱腰以及中墙等部位应力数值较高,并且施工地质情况变化比较复杂,施工过程中应该加强对相关部位的监测,并及时采取相应的支护措施,确保施工安全。

表 2 模型物理参数

参数	围岩	锚杆	初衬	二衬
弹性模量/Mpa	250	2.1e5	2.8e4	2.8e4
泊松比	0.35	0.3	0.18	0.18
比重/kN	20	78.0	25.0	25.0
粘聚力/Mpa	0.1		10	10
摩擦角/°	35		55	55

由于隧道中部山体地形因素影响,现场监测和数值分析都表明,隧道顶部围岩承受拉伸应力不利于隧道成拱,施工时应及时增设支撑或增加锚杆密度,加强隧道中部支护力度,确保施工安全。开挖过程中,锚杆主要承受拉伸载荷,洞顶的锚杆尤其如此,并且锚杆的受力随施工过程而变化,距离掌子面位置越远,变化越小。对于 II 类围岩来说,上下台阶开挖对于掌子面前方 0.5 倍洞径和后方 1.5 倍洞径范围内的围岩产生的影响较大,所以应对掌子面后方 1.5 倍洞径范围内的围岩支护及时进行喷锚支护。同时,应加强掌子面前方 0.5 倍洞径范围内的超前支护,利用临时支护增强围岩的稳定。

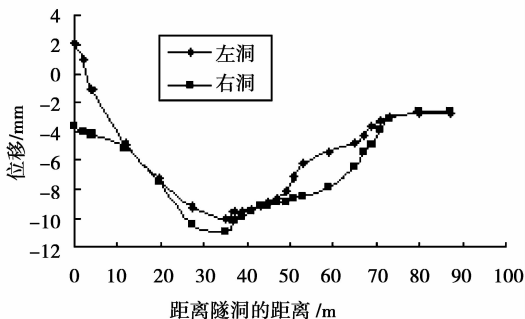


图 12 拱顶沉降位移图

## 5 结 语

通过隧道监测和对隧道施工过程的三维数值模拟,弄清了隧道边坡点、地表点、拱顶下沉和隧道上覆岩层的运动变化规律,探讨了大跨连拱隧道施工对隧道变形的影响,得到了中导洞、左右洞在施工不同阶段的应力分布及变化情况、锚杆的应力分布、隧

道位移场等的规律,为评价和修改初期支护参数、力学分析及二次衬砌施作时间提供了依据,为提高浅埋大跨双连拱隧道的建设提供了类比依据。

## 参考文献:

- [1] 夏才初,李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海:同济大学出版社,1999.
- [2] 夏才初,潘国荣. 土木工程监测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [3] 王建宇. 隧道工程监测和信息化设计原理[M]. 北京:中国铁道出版社,1990.
- [4] 岩土工程手册编委. 岩土工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
- [5] 刘志刚. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [6] 何发亮. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3):12-15.  
HE FA-LIANG. The development of geology forecasts technology during tunnel construction [J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(3):12-15.
- [7] 徐冲,刘保国,刘开云. 基于改进 SVM 的隧道位移监测非线性预报模型[J]. 地下空间与工程学报,2007,(S1):39-44.  
XU CHONG, LIU BAO-GUO LIU KAI-YUN. Nonlinear time series model for displacement of double-arch tunnel based on improved SVM [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, (S1):39-44.
- [8] 胡昱,侯桂荣,郑浩. 林家溪滑坡处治与监测[J]. 公路工程,2007,32(5):134-136.  
HU YU, HOU GUI-RONG, ZHENG HAO. Linjiaxi slope failure treatment & monitoring [J]. Highway Engineering, 2007,32(5):134-136.
- [9] 任松,姜德义,蒋再文,刘新荣. 隧道围岩应力时序的神经网络预测模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006,29(4):77-80.  
REN SONG, JIANG DE-YI, JIANG ZAI-WEN, LIU XIN-RONG. Neural network model for predicting the transformation tendency of the stress on the surrounding rocks of tunnel [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006 29(4):77-80.
- [10] 刘长祥,吕常新. 三车道大断面高速公路隧道稳定性数值模拟[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(4):688-692.  
LIU CHANG-XIANG, LV CHANG-XIN. Numerical simulation for the stability of large cross section expressway tunnel with three lanes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007,3(4):688-692.

(编辑 侯 湘)