

文章编号: 1002-0268 (2005) 09-0129-04

基于联拱隧道动态设计与施工的 信息化监测技术

杨昌斌¹, 帅文², 饶学治¹, 李学东³, 范雷¹

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 贵州省水利厅, 贵州 贵阳 550002;
3. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051)

摘要: 根据联拱隧道动态设计与施工信息化监测的实质和新奥法施工原理, 在隧道 10 余个重要施工段的关键部位进行了周边位移收敛和地表沉降、水平位移监测。在联拱隧道中隔墙等应力集中部位采用土压力盒与振弦式传感器记录仪对应力进行了量测。利用现场信息化监测取得的数据资料结合三维快速朗格拉日差分法 FLAC3D 对施工中围岩应力和位移进行了模拟, 对优化设计和施工发挥了重要作用, 取得了良好的效果。

关键词: 联拱隧道; 信息化监测; 动态设计与施工; 快速朗格拉日差分法 FLAC

中图分类号: U452 **文献标识码:** A

Informative Monitoring Technology Based on Dynamic Construction & Design in Twin-arch Tunnel Engineering

YANG Chang-bin¹, SHUAI Wen², RAO Xue-zhi¹, LI Xue-dong³, FAN Lei¹

(1. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China;
2. Guizhou Water Conservancy Bureau, Guizhou Guiyang, 550002, China;
3. Hubei Communications Planning and Design Institute, Hubei Wuhan 430051, China)

Abstract: It was a twin-arch tunnel in soft rock with small overburden whose construction, following NATM, caused huge problems to all parties involved. The tunnel support was well monitored during its construction, though the rock was strongly faulted. Tunnel monitoring consisted of daily 3-D tunnel tube displacement measurements in a few measuring sections, and of ten measuring sections within the tunnel with more complex measuring equipment, to monitor stress changes and rock deformations around the septi-wall. Calculations of the propagation of the tunnel distressed zone and stress field around the tunnel, up to the surface, were performed by means of numerical model with the finite difference method. The evolution of tunnel displacements showed that the most important, for the final settlement at the surface above the tunnel, was the time of installation and rigidity of the primary support. According to the quiddity of dynamic design, the FLAC3D is applied on the typical cross section of tunnel case to set up the three dimensional tunnel mechanics model. The data obtained by informative monitoring and the result of simulation not only offers the theoretical foundation for the adjusting and simplifying of the construction procedure, and also has made good social economic benefits.

Key words: Twin-arch tunnel; Informative monitoring; Dynamic construction & design; FLAC3D

1 信息化检测原理

在隧道动态施工设计过程中, 对围岩与支护系统

变形过程进行监测是新奥法现代支护设计理论的灵魂, 也是新奥法 3 大支柱的核心地位。过去, 人们一般从物质和能量的角度来处理隧道工程问题, 相应的

收稿日期: 2005-05-07

作者简介: 杨昌斌 (1977 -), 男, 湖北云梦人, 在读博士研究生, 研究方向为地下工程及岩土工程. (yangbing-0@163.com)

设计方法是工程类比与力学分析法；在今天，随着新奥法的发展，人们认识到隧道围岩与支护系统并不是一个封闭系统，而是一个与外界环境有着物质、能量、信息交流的开放系统^[1,2]。如果从信息的角度认识与处理隧道工程问题并抓住“围岩变形信息”这个关键因素，就能创造出以围岩监控量测为核心的综合性设计方法^[2]。信息化监测，以现场量测为手段，以量测信息为设计依据，根据工程施工引起的应力场、位移场分布情况，在开挖过程中来监控围岩——支护动态，并把量测的结果（信息）反馈到设计中，从而进一步修改和完善原设计的支护参数，使工程设计和施工设计紧密结合，以达到保证工程和周围环境安全和及时调整优化设计及施工的目的^[3,4]。

2 位移收敛监测分析

隧道工程现场监测分两个阶段：第1阶段是根据在隧道开挖过程中及时量测所得的信息进行理论与数值分析，再结合工程地质和岩体结构作出综合判断，确定修改后的参数及施工处治方法和对策。第2阶段，即监测方案与实施。

2.1 隧道周边位移收敛监测

隧道周边位移是隧道围岩应力变化的最直观反映，量测周边位移可以为判断隧道空间的稳定性提供可靠的信息，并且可根据变形的速度判断围岩的稳定程度，为二次衬砌提供合理的支护时间，同时还可以指导现场的设计与施工。联拱隧道在第1阶段监控主要是针对中导洞开挖，其监测成果将为第2阶段监测方案与实施提供重要依据。此阶段的监测内容主要为洞口地表下沉、中导拱顶下沉与收敛、侧导开挖时中导侧墙的位移等。收敛监测主要包括中隔墙侧壁位移、侧导坑侧壁及拱顶位移、主洞上台阶收敛等。某联拱隧道主洞上台阶开挖位移收敛监测点现场布置见图1。

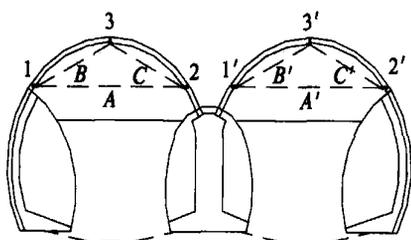


图1 主洞上台阶开挖位移收敛监测布置示意图

图2为该隧道主洞开挖时右侧主洞上台阶开挖K399+385测线所监测得到的隧道拱顶沉降监测曲线及回归曲线。在主洞开挖30d后隧道最大拱顶沉降值

为16.212mm，见图2，此时隧道的变形还未达到最终值，通过回归变化趋势分析可知，当隧道主洞施工90d之后，隧道拱顶下沉为25.913mm（见图3），沉降速率为0.037mm/d（见图4），满足规范中提出的收敛允许值。从变形的趋势曲线看，监测结果基本反映了隧道内周边收敛和拱顶沉降的变形特征。

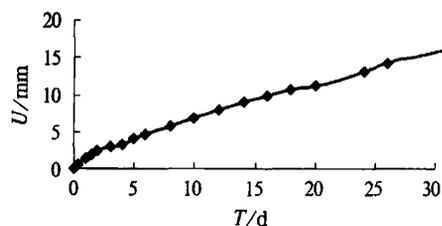


图2 拱顶沉降值曲线

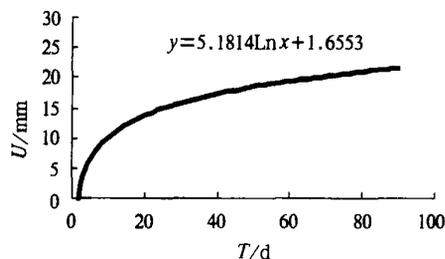


图3 拱顶沉降值回归曲线

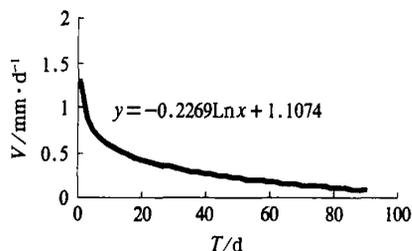


图4 拱顶沉降速率回归曲线

另外，从回归曲线也可以看出，隧道收敛经过3个阶段：第1阶段为急剧变形期，持续时间在20d左右，此阶段变形量约占趋向稳定时总变形量的70%左右；第2阶段为缓慢增长变形期，持续时间在20~40d，变形已释放程度达90%以上；第3阶段为基本稳定期。

从理论上讲，曲线反映出初期支护在开挖后5~10d左右进行比较理想，但由于隧道断面大、围岩完整性较差，所以初期支护在隧道开挖后应及时施作；根据监测曲线和相关规范，二次衬砌在开挖后40~60d左右施工较好，这时变形趋于稳定，变形速率小于0.1mm/d。

隧道其他周边位移收敛监测方法与原理同上述监测类似。

2.2 隧道地表沉降、水平位移监测分析

该联拱隧道出口段为 类围岩, 埋深在 10 ~ 20m, 故在出口段均设置了 18 个地表沉降监测点, 根据测点变化可以反映出滑坡的地表变形情况, 见图 5。设置 W_1 和 A_1 两个固定点目的是为了量测各测点的水平位移, 借此反映地表水平移动情况。

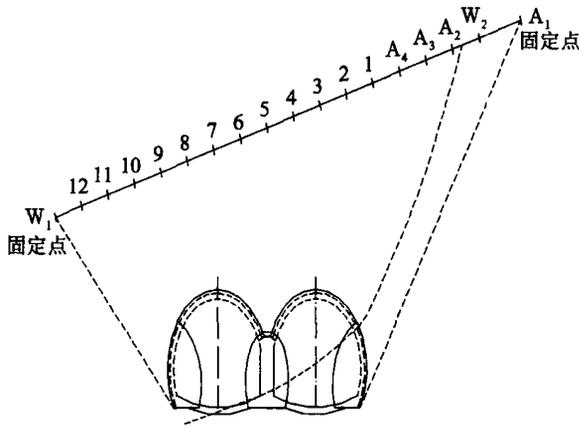


图5 隧道出口地表沉降观测点布置图

隧道地表沉降结果及分析以该隧道出口地表下沉结果为例来说明隧道“动态施工”中隧道地表沉降监测。从监测结果图 6 可以看出, 在隧道正上方地表测点的沉降值最大, 即 $A_2 \sim 9$ 测点位位移最大, 各测点地表的下沉在不断的加剧, 且有规律的变化, 沉降剧烈主要有 3 个时期, 包括出口段中导洞开挖、侧导洞开挖和主洞开挖 3 个时间段。从观测结果看, 地表最大总下沉量为 62mm, 发生在测点 9 处, 由于设定 2 个不动点, 其余 16 个点下沉数值的分布为: 4、5、6、7、8、9 这 6 个测点的沉降在 60mm 左右, 1、 A_4 、 A_3 这 3 个测点的沉降值在 50mm 左右, 2、3、10、 A_2 在 40mm 左右, 11 和 12 侧点沉降在 10mm 左右。

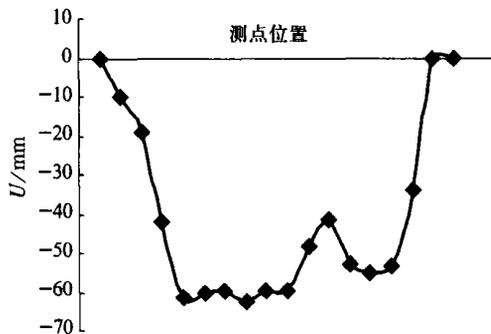


图6 隧道出口地表各测点位置-沉降值曲线

以上结果说明, 在隧道顶部附近的地表沉降量最大, 离隧道越远的地表沉降越少, 这完全符合隧道沉降规律。

3 隧道接触应力量测

在隧道监测中, 研究隧道围岩与支护结构、喷层与二衬混凝土间的接触应力在隧道开挖爆破振动作用下的动态响应及支护之间应力-位移的传递情况是必要的^[5,6]。它能反映出各支护所能承受的压力及支护结构间的接触条件(如密贴度等)。该联拱隧道接触应力量测采用的仪器为钢弦式土压力盒与 DKY-51-2 型振弦式传感器记录仪, 它是一种原位监测仪器, 适用于各种振弦传感器的频率采集。

钢弦式土压力盒测量应力原理: 当压力盒薄膜受到外界压力时, 钢弦自身的频率会发生改变, 其关系式为

$$P = (f_{测}^2 - f_{初}^2) / K \quad (1)$$

式中, $f_{初}$ 为压力盒在未受压力时的钢弦初频; $f_{测}$ 为压力盒在受压力时的钢弦频率; K 为压力盒标定系数; P 为压力盒受到压力。

根据压力盒中钢弦受压后的频率值, 就可以得到该处的应力值。受压后的频率值可以通过 DKY-51-2 型振弦式传感器记录仪得到。通过计算机数值模拟表明, 隧道中隔墙顶部出现较大应力集中, 并且数值也是整个隧道建成后最大的, 故需在施工中和施工后进行重点监测, 由于该隧道出口段存在滑坡, 所以将压力盒埋设于滑坡穿过隧道处中隔墙顶部。该隧道在出口和隧道中部埋设分别埋设了 3 个压力盒, 3 号位于出口处中墙左侧顶部, 2 号位于出口处中隔墙右侧顶部, 1 号位于隧道中部中隔墙右侧顶部。观测时间历经 160d。3 个压力量测的结果见图 7。

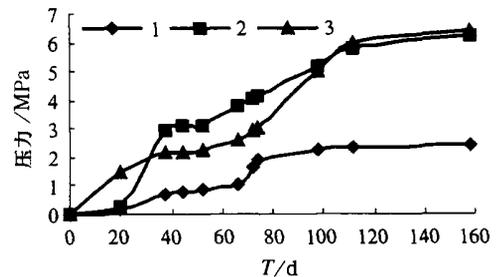


图7 压力变化曲线(压力盒反映)

从图 7 中可以看到: 不同位置围岩的压力变化曲线是不一致的; 在同一时期, 压力值的变化也不同。可据图总结如下:

- (1) 3 个地方围岩压力变化曲线不同, 主要原因是主洞开挖时间不同造成的。由于压力盒埋设是在同一时间, 而隧道主洞开挖时间不同, 导致中隔墙顶部围岩的应力变化差异。

(2) 从3号压力盒反映看来,围岩压力在压力盒埋设70d左右出现突变,然后趋于稳定,围岩的压应力值最终达到2.5MPa左右。从2号和1号压力盒反映结果可以看出,该隧道中隔墙顶部围岩的压力趋向于6~7MPa,埋设于出口处的2号在埋设后第20d到第40d中压力剧增,此时在出口处的地表出现裂缝,表明隧道的爆破开挖对岩体破坏较大;1号变化曲线较为平缓,在埋设70d后出现剧烈变化,在120d左右应力值趋向于7MPa。

4 隧道有限元模拟分析

根据隧道典型施工段的地质原型,建立了三维FLAC有限元计算模型。模型取3倍洞径范围作为有限元分析的区域。采用固定边界条件,底部采用固定约束,上部取至隧道顶部10m,施加等效荷载,两端边界处沿X方向固定约束,见模型图8。

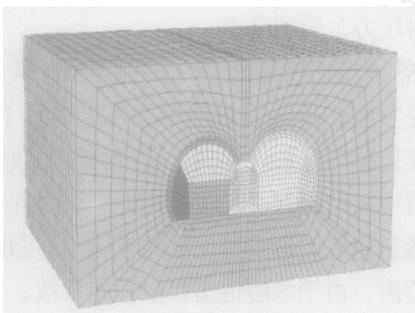


图8 隧道FLAC3D计算模型

图9~图10给出了主洞完成后的主应力 σ_1 色谱图和主要位移点图。

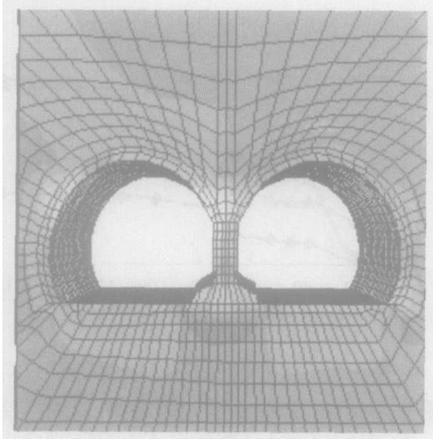


图9 主洞完成后的主应力 σ_1 色谱图

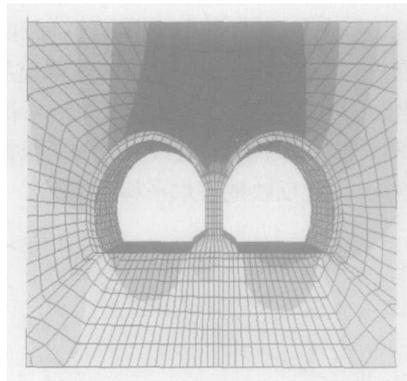


图10 主洞完成后的主要位移点图

模拟计算得出的应力图示中隔墙顶部的最大压力为2.5MPa,隧道拱顶最大沉降值为28.5mm这与压力盒的量测以及隧道拱顶位移监测结果极其相近,表明有限元模拟在该段隧道压应力和拱顶沉降估计是准确的,可以为隧道的设计与施工提供理论基础,分析结果具有很好的实践性。

5 结论

(1) 在施工现场应用信息化检测技术对联拱隧道的拱顶沉降、周边收敛、地表沉降进行了监测,其监测结果与模拟结果较为一致。

(2) 该隧道的设计与施工整体上是合理的,根据现场的信息在局部工序和施工工艺上进行了调整,在施工中针对发现的问题,及时整治处理,达到了信息化设计与施工目的。

参考文献:

- [1] Sakurai S, Takenchi K Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels [J]. Rock Mech. and Rock Eng., 1983, 16 (3) .
- [2] 张显书, 刘新喜, 杨昌斌, 等. 襄武段联拱隧道动态施工力学技术实现 [J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19 (4): 33 - 34.
- [3] 杨昌斌, 张胜云, 徐江波, 等. FLAC3D在隧道初期支护与原岩条件耦合问题的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32 (5): 49 - 50.
- [4] 曹国金, 姜弘道, 张建斌. 信息化设计技术及在隧道工程施工中的应用 [J]. 施工技术, 2002 (1): 39 - 40.
- [5] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 陈基炜. 信息化监测在陆家嘴地铁车站3、4轴施工中的应用 [J]. 上海地质, 2000, 3.