

# 台阶法施工对隧道变形影响分析

王勤富, 祝方才, 余继江, 仵永杰, 王 宁, 王 威

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 介绍了乾山隧道的施工方法和隧道监控量测的内容、方法。通过对监测结果的分析, 得出隧道在相应支护条件下不同围岩等级位移变形趋势基本一致的结论: 位移变形在最初 10 d 左右增加较快随后趋缓, 并在 30 d 左右基本达到稳定; 采用台阶法开挖时, 变形由大到小依次为上台阶、中台阶和下台阶, 并且下台阶开挖对上台阶变形有明显影响。这可为合理确认二次衬砌的时间提供参考依据, 也可为类似地质条件下的工程施工提供参考。

**关键词:** 台阶法; 监控量测; 隧道施工方法; 位移变形

**中图分类号:** U456.3+1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2015)05-0010-05

## Impact Analysis of Bench Method in Construction on Tunnel Distortion

Wang QinFu, Zhu FangCai, Yu JiJiang, Wu Yongjie, Wang Ning, Wang Wei

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Introduced the construction method of Qianshan tunnel and the tunnel monitoring and measuring contents, and through the analysis of the monitoring results, concluded that the tunnel of different rock levels in the corresponding support conditions were basically identical in displacement deformation trends: the deformation in the initial 10 d increased rapidly and then slowed down, to around 30 d basically reached stable; the deformation of bench method from big to small is the upper stage, the middle stage and the lower stage, and the lower stage excavation has obvious impact on the upper stage deformation. Provides reference basis for reasonably confirming the time of secondary lining, and also provides reference for construction engineering under similar geological conditions.

**Keywords:** benching tunnelling method; monitoring and measuring; tunnel construction method; displacement deformation

## 1 工程概况

南龙铁路位于福建省中北部, 沿线处于戴云山脉西北部, 其中乾山隧道是南龙铁路重点控制工程之一, 隧道全长 10 742.74 m, 隧道起讫里程为 DK18+495.26~DK29+238.000。本文对 NLZQ-II 标段进行研究, 该标段乾山隧道长 3 698 m。根据本标段乾山隧道地质构造情况, 围岩等级主要分布有 III 级 (3 169 m), IV

级 (426 m), V 级 (103 m) 3 个级别; 隧道洞口主要存在全风化沙土、云母石英片破碎层及节理发育区等不良地质情况。

乾山隧道位于剥蚀中低山区, 地形陡峭, 自然坡度为 20~45°, 山体连绵, 穿越的山脉主要是北北东向, 沟壑纵横。沿线地质构造复杂并发育于不同时代, 处于大陆东南沿海新华夏系构造带中, 构造方向相对稳定, 主要是北东-北北东向, 但不同时

收稿日期: 2015-07-01

基金项目: 湖南省自然科学基金资助重点项目 (13JJ2033), 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2015B572)

作者简介: 王勤富 (1990-), 男, 山西大同人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为隧道的稳定性,

E-mail: 278708552@qq.com

代构造方向略有差异,雪峰期主要为北东-北北东方向,而燕山期主要为南北方向。隧道穿过的最高山峰海拔约679 m,隧道出口段标高204.556 m,地形起伏大,自然坡度约为25°~30°,植被发育多为小型乔木和灌木。主要地质特征表现为:

1) 地层岩性。隧址区分布的地层主要为前震旦系建瓯群云母石英片岩,此外地表分布有第四系冲洪积粉质黏土层、第四系破残积土层。

2) 地质构造。本标段隧道断层为F6断层,走向与线路方向夹角约26°,该断层为正断层,倾向大里程方向,产状倾向和倾角约为165°∠83°。断层带内岩石硅化破碎、分化强烈,且地表存在一小型水库;断层从其大里程侧通过,断层导水性好,施工时可能发生坍方、突水等施工地质灾害。断层破碎带宽10~40 m,隧道洞身通过里程为DK26+080~DK26+120。

3) 节理。本标段节理发育于前震旦系建瓯群云母石英片岩地层,小型褶曲较发育,片理、节理发育,岩体较破碎,地震波速为4 200~4 500 m/s,相对周围岩体波速较低。施工过程易产生掉块、漏水等现象,需要及时采取支护措施。

4) 地下水特征。隧道区地下水的形成、分布受隧址区地形地貌、岩性、构造、植被、降水量等多种因素控制和影响。特别是在构造作用下,断层破碎带、节理密集带为地下水贮存和运移创造了良好的地质条件。地下水赋存类型主要为基岩裂隙水,围岩富水程度为强富水区。

## 2 监测内容、方法与断面布置

### 2.1 隧道监测内容

根据乾山隧道设计资料确定的围岩情况,隧道采用台阶法和三台阶临时仰拱法进行施工,监控量测<sup>[1-3]</sup>的重点为TB10121—2007《铁路隧道监控量测技术规程》所规定的4项内容,详见表1。

表1 监控量测必测项目

Table 1 The monitoring and measuring items

序号	监测项目	常用量测仪器	测试精度	备注
1	洞内、外观	现场观察、数码相机、罗盘仪		
2	拱顶下沉	水准仪、钢挂尺或全站仪	1 mm	
3	地表沉降	水准仪、钢钢尺或全站仪	0.1 mm	浅埋必测 ( $H_0 \leq 2B$ )
4	洞内净空变化	收敛计、全站仪	0.1 mm	

根据研究的需要,本文主要对隧道拱顶下沉和净空收敛2项内容进行分析;而围岩压力、钢架压

力、锚杆轴力、二衬内力等选测项目<sup>[4]</sup>,根据围岩性质、埋深等来确定,作为必测项目的验证和补充。

### 2.2 隧道监控量测方法

#### 2.2.1 隧道净空收敛的监控量测

隧道净空收敛采用全站仪进行测量,其基本原理是,利用全站仪自由设站远距离测量测点位不同时段相对的三维坐标。将测量数据输入计算机,通过软件进行处理后,输出监测结果,可以准确、快速地为施工提供数据参考。采用全站仪量测围岩净空位移示意图如图1所示。

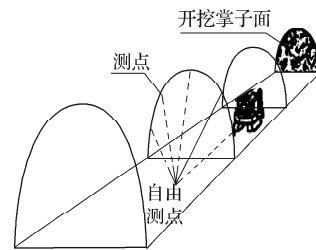


图1 全站仪监控量测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of total station monitoring and measurement

#### 2.2.2 隧道拱顶下沉的监控量测

拱顶下沉主要用于分析围岩的稳定性,拱顶下沉采用全站仪进行量测。量测时应注意:

1) 采用膜片式回复反射器作为测点靶标,靶标粘附在预埋件上;

2) 采用全站仪测量拱顶下沉时,喷射完混凝土后,应迅速在测点处设固定桩,工区洞外设一个水准基点,供洞内拱顶下沉量测用。

### 2.3 隧道施工方法的确定

隧道施工方法是根据各种工法的特点和本标段的地质情况确定的。地质状况的确定较为复杂,首先以常规地质法为基础初步判断地质状况;其次通过TSP203超前地质预报系统作远距离宏观控制,地质雷达作近距离判断,从而进一步明确地质情况;最后以加深炮孔钻探作为连续岩溶、地下水等不良地质超前探测和地质钻探的辅助验证。这样就形成综合的地质超前预报系统,为隧道施工方法的确定提供准确的依据。

根据本标段乾山隧道的地质情况、围岩岩性和地质构造情况,初步确定本施工段DK28+943断面围岩为Ⅲ级围岩。对其地质描述为:掌子面主要是灰黑色云母石英片岩且为变结晶片状结构,其矿物成分主要为石英和云母,掌子面节理较发育且镶嵌碎裂结构,属较硬岩。地下水为基岩裂隙水,掌子面有渗水。加深炮孔DK28+949~DK28+941段:该区段围岩与掌子面围岩基本类似,为弱风化云母石英片岩,

裂隙发育,发现岩体稍破碎,掌子面潮湿且底部有积水,地下水较发育等不良地质现象。通过TSP203超前地质预报可以看出,DK28+982~DK28+934区段反射界面较少,推测该区段为弱风化云母石英片岩,节理裂隙较发育,岩体致密程度有所下降,裂隙水稍发育,岩体较完整。综上所述,根据铁路隧道围岩分级标准<sup>[5]</sup>,掌子面围岩可定为Ⅲ级。

台阶法作为新奥法中适用最广的施工方法,其原理是将整个断面分成上下两半断面分别开挖。这有利于开挖面的稳定,尤其是上部开挖支护后,下部作业较为安全。这样做既考虑了如何更好地发挥机械效率从而保证施工的经济性又保证了施工的安全性。DK28+943断面附近围岩等级为Ⅲ级基本符合台阶法的开挖要求,固本截面附近采用台阶法开挖是合适的。

根据超前预报确定DK29+063断面围岩为强风化云母石英片岩,呈碎块状;节理裂隙发育,岩体较为破碎;掌子面较干燥,地下水不发育;围岩稳定性较差。通过TSP203探测,该断面所在区段纵波波速为3300 m/s左右,反射界面较多,从而推测该区段围岩为弱-中风化云母石英片岩,断面节理裂隙发育,岩体较破碎,裂隙水欠发育,围岩自稳能力较差。该断面地质描述为:掌子面为青灰色薄-中层状强风化云母石英片岩,含泥量较大,岩层产状倾向和倾角为 $225^{\circ} \angle 31^{\circ}$ ;岩质稍软易水解;节理裂隙较发育,岩体较破碎,地下水稍发育,围岩自稳能力较差。综上所述,根据铁路隧道围岩分级标准,掌子面围岩可定为Ⅳ级。

根据超前地质预报得出:DK29+103断面围岩为弱-中风化云母石英片岩,节理裂隙发育,岩体较破碎,裂隙水欠发育,底部有积水现象;地下水较发育围岩自稳能力差。DK29+103断面地质描述为:岩性为前震旦系建瓯群云母石英片岩,颜色为青灰色,呈弱-中风化状。掌子面岩体层理清晰,呈中厚层状,层理面和节理面光滑平直,局部岩体较完整,围岩稳定性较差。掌子面干燥,无明显地下水渗漏现象。掌子面节理较发育,节理面较光滑、延伸不长,对围岩稳定影响较小。岩层产状倾向和倾角为 $124^{\circ} \angle 26^{\circ}$ 。根据地质雷达探测结果并结合地质勘探资料及掌子面地质特征综合分析得出,该断面围岩等级为Ⅴ级比较合理。

三台阶临时仰拱法<sup>[6]</sup>主要应用于软弱围岩隧道中,是从上而下分三个台阶进行开挖,各台阶成环向受力的施工方法。适用范围为开挖断面 $100 \sim 180 \text{ m}^2$ ,具备一定自稳能力的Ⅳ、Ⅴ级围岩地段隧道施

工。三台阶临时仰拱法的原理就是将大断面自上而下划分成3个小单元进行开挖,缩小开挖断面,采用临时仰拱使每个小单元及时封闭成环,形成环向受力,从而有效地发挥初期支护整体受力效果,有效阻止支护结构变形。

三台阶临时仰拱法施工时,各步台阶一次开挖长度宜为2~3 m,下台阶开挖后仰拱应紧跟。综合DK29+063断面、DK29+103断面超前地质预报情况可知,这2个断面适宜采用三台阶临时仰拱法施工。拱墙初期支护施工完成后,应及时左右错位跳挖仰拱,并根据地质条件确定施工段长,及时安装隧底仰拱钢架,随后进行仰拱永久混凝土和回填混凝土施工,使初期支护尽早闭合成环,构成稳固的初期支护体系,同时为运输创造良好的环境。总之,三台阶临时仰拱法关键在临时仰拱的施工。

#### 2.4 隧道监控量测断面布置

隧道断面监测点的个数根据规范TB10121—2007《铁路隧道监控量测技术规程》和隧道的施工方法确定。根据乾山隧道勘察设计资料和现场实际情况综合判断得出:断面DK28+943采用台阶法开挖,设置1个拱顶下沉测量点,4个水平净空收敛点,具体布置见图2。断面DK29+063和断面DK29+103采用三台阶临时仰拱法施工,设置1个拱顶下沉测量点,6个水平净空收敛点,具体布置见图3。

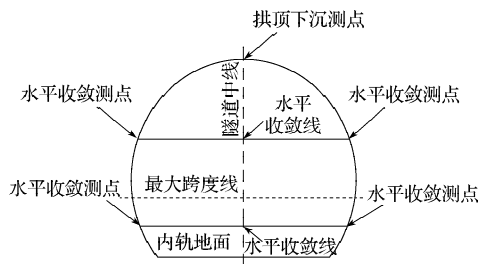


图2 台阶法施工段拱顶下沉及净空测量的测线布置示意图

Fig. 2 The line layout plan of vault subsidence and clearance measurement in bench method construction

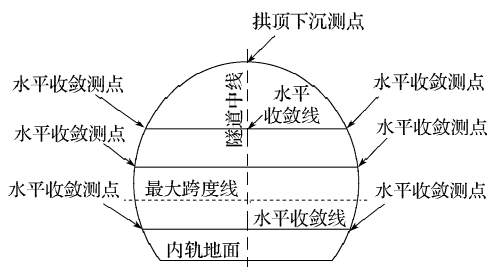


图3 三台阶临时仰拱法施工段拱顶下沉及净空测量的测线布置示意图

Fig. 3 The line layout plan of vault subsidence and clearance measurement in three-steps temporary inverted arch construction

## 2.5 隧道监控量测频率及判别准则

1) 采用以位移速度控制的监测频率进行监测,具体见表2。当位移速度出现异常情况或遇不良地质地段时,应增大监测频率。

表2 按位移速度确定的监控量测频率  
Table 2 Monitoring and measuring frequency determined by displacement rate

变形速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	量测频率
$\geq 5.0$	2次/d
1.0~5.0	1次/d
0.5~1.0	1次/(2~3 d)
0.2~0.5	1次/(3 d)
$<0.2$	1次/(7 d)

2) 当净空变化速率持续大于1.0 mm/d时,围岩处于急剧变形状态,应加强初期支护;净空变化速度小于0.2 mm/d时,围岩基本达到稳定状态。

## 3 隧道监控量测结果及分析

乾山隧道监测断面较多,本研究综合乾山隧道地质情况、围岩岩性和地质构造的状况,选取隧道出口端不同围岩等级的3个典型断面,并以其监测结果为例来说明开挖段的位移变形情况,3个断面分别为DK29+103(V级围岩)、DK29+063(IV级围岩)和DK28+943(III级围岩)。

### 3.1 拱顶下沉

各研究断面拱顶沉降随时间变化情况如图4所示。

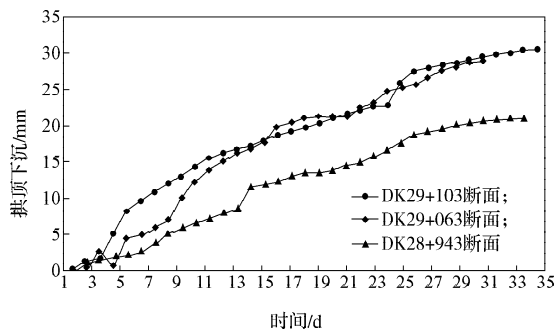


图4 监测断面拱顶下沉随时间变化曲线  
Fig. 4 Curves of vault subsidence of the monitoring section varying with time

由图4可以看出,各断面位移变形都经历基本类似的变化规律:在最初几天变化较为剧烈,并且幅度也较大;随后变形趋于缓慢稳定,经历30 d左右的隧道拱顶变形基本趋于稳定<sup>[7]</sup>。由图4还可以得出,在特定支护条件下隧道围岩等级越大拱顶位移变形也越大的结论。

### 3.2 隧道同一断面水平位移收敛情况

DK29+103断面和DK29+063断面上台阶、中台阶、下台阶的水平位移收敛情况分别如图5~6所示。DK28+943断面上台阶、下台阶水平位移收敛情况如图7所示。

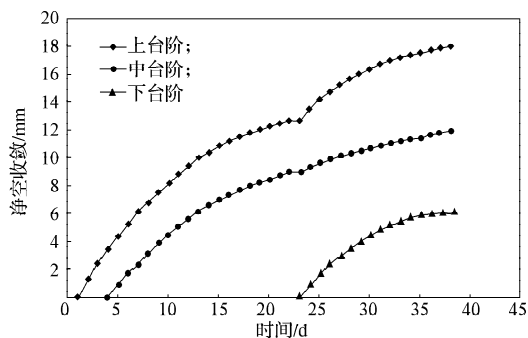


图5 DK29+103断面水平收敛随时间变化情况

Fig. 5 DK29+103 section level convergence changing over time

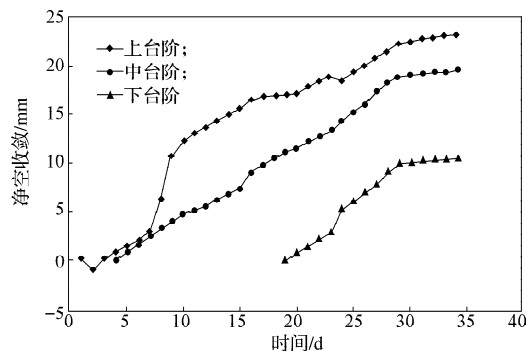


图6 DK29+063断面水平收敛随时间变化情况

Fig. 6 DK29+063 section level convergence changing over time

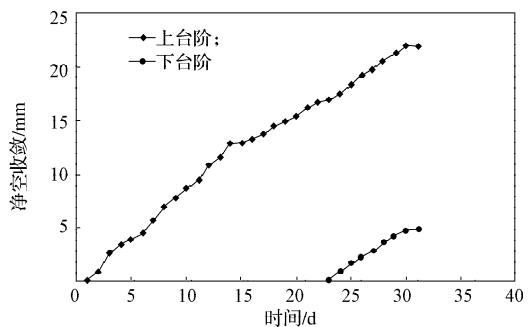


图7 DK28+943断面水平收敛随时间变化情况

Fig. 7 DK28+943 section level convergence changing over time

从图5和图6可以看出,在同一断面净空位移收敛由大到小分别为上台阶、中台阶、下台阶。图7说明断面上台阶净空位移收敛大于下台阶净空位移收敛。各断面在开挖上台阶最初几天变形较为剧烈,随后趋缓。在开挖下台阶时上台阶位移变形产生一个小突变,这说明利用台阶法(三台阶临时仰拱法)开挖下台阶时会对上台阶位移产生一定影响,在施工时应注意下部作业对上部结构稳定性的影响,并及时做好预防措施。

## 4 结论

通过对乾山隧道出口段 3 个典型的断面监控量测数据进行整理分析, 可得如下结论:

1) 乾山隧道断面 DK29+063、DK29+103 采用三台阶临时仰拱法, 断面 DK28+943 采用台阶法的施工方法是适宜的, 并且所采用的支护方式能够有效控制围岩变形, 保证乾山隧道的顺利开挖。

2) 现场监测数据表明, 勘察结果对乾山隧道围岩等级的判别是可靠的, 并以此为基础采取的相应支护结构能满足要求, 是安全的。这可为该地区类似的工程建设提供参考。

3) 乾山隧道位移监控量测结果显示, 拱顶下沉和水平净空收敛的总体变化趋势是一致的。即在相应的支护条件下随着隧道的开挖, 位移变形也在逐步增大, 并且在最初 10 d 左右增加较快, 随后变形趋于缓和, 在 30 d 左右变形基本达到稳定, 在围岩较差时所需时间可能有所增加。三台阶临时仰拱法开挖时变形由大到小依次为上台阶、中台阶和下台阶; 下台阶开挖对上台阶位移变形有较明显的影响。

4) 三台阶临时仰拱法主要应用于软弱围岩隧道的修建, 尤其在修建大断面软弱围岩隧道时表现突出, 既能保证施工的进度, 又能保证围岩变形在可控的范围内。三台阶临时仰拱法的重点是临时仰拱的施工, 支护结构自上而下及时封闭, 步步成环。临时仰拱能有效阻止支护结构的水平收敛, 减少隧道围岩变形。

### 参考文献:

- [1] 赵敏, 池鹏, 吴润龙, 等. 茶镇隧道施工位移监测与分析[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(6): 540-544.  
Zhao Min, Chi Peng, Wu Runlong, et al. Monitoring and Analysis of the Displacement of Chazhen Tunnel in Construction[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2010, 30(6): 540-544.
- [2] 胡聿渊, 何晖. 隧道净空收敛量测及其数据分析研究[J]. 科技信息, 2011(7): 259, 233.  
Hu Yuyuan, He Hui. Tunnel Net Convergence Measurement and Data Analysis[J]. Science & Technology Information, 2011(7): 259, 233.
- [3] 胡百万, 魏清华, 刘丽. 施家梁隧道监控量测及其应用[J]. 西部探矿工程, 2007(11): 157-160.  
Hu Baiwan, Wei Qinghua, Liu Li. Monitoring and Application in Shijialiang Tunnel[J]. West-China Exploration Engineering, 2007(11): 157-160.
- [4] 徐林生. 东门关隧道出口新奥法施工监控量测研究[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(1): 24-26.  
Xu Linsheng. Monitoring During the Exit NATM Construction of Dongmenguan Tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25(1): 24-26.
- [5] 中华人民共和国铁道部. TB10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 中国铁道出版社, 2005: 105-107.  
Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB10003 — 2005 Code for Railway Tunnel Design[S]. China Railway Publishing House, 2005: 105-107.
- [6] 孙乐富, 王平. 三台阶临时仰拱法在滇中红土泥岩隧道中的应用[J]. 山西建筑, 2015, 41(6): 174-175.  
Sun Lefu, Wang Ping. The Application of the Three Steps of Temporary Inverted Arch in Clay Shale Tunnel of Yunnan[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(6): 174-175.
- [7] 王海涛, 贾金青. 监控量测技术在乔庄隧道中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 237-239.  
Wang Haitao, Jia Jinqing. Application of Monitoring Measurement Technology in Qiaozhuang Tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(2): 237-239.

(责任编辑: 邓光辉)