

# 监控量测技术在软岩隧道施工中的应用

程巧建

(中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 软岩隧道由于围岩压力大经常造成初支大变形, 影响施工安全和进度。以云桂铁路软岩隧道为例, 介绍了监控量测的测量方法、数据整理及应用等内容, 通过岩土商业软件 FLAC3D 计算隧道初衬变形, 并结合监控量测数据分析 and 初支变形的主要原因, 采取针对性的施工措施控制变形, 保证软岩隧道安全施工。变形计算和变形监测及解决问题的思路, 能够为其他类似隧道工程提供参考和借鉴。

**关键词:** 初支施工; 监控量测; 软岩隧道; 控制变形

中图分类号: U452.12 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2020)06-0065-05

doi: 10.7640/zggwjs202006015

## Application of monitoring and measuring technology in soft rock tunnel construction

CHENG Qiao-jian

(CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510290, China)

**Abstract:** The soft rock tunnel often causes large deformation of the initial support, which affects the construction safety and progress due to the high pressure of surrounding rock. Taking the soft rock tunnel of Yunnan-Guangxi Railway as an example, we introduced the measurement method, data arrangement and application of monitoring and measurement, calculated the deformation of the initial lining of the tunnel through geotechnical business software FLAC3D. Combined with the analysis of monitoring data and the main causes of the deformation of the initial support, targeted construction measures were taken to control the deformation to ensure the construction safety of the soft rock tunnel. The deformation calculation, deformation monitoring and solutions can provide reference for other similar tunnel projects.

**Key words:** initial support construction; monitoring measurement; soft rock tunnel; control deformation

### 0 引言

近年来, 国内隧道工程广泛采用新奥法设计与施工, 现场监控量测已成为隧道施工中不可缺少的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。勤测量和动态监控是隧道工程的施工原则之一, 以量测数据反馈变形和受力信息, 进行动态设计和施工, 是保证安全优质高效的基础。科学合理的监控量测及在此基础上的数据分析, 能直观地判断隧道围岩的稳定性, 更好地服务隧道施工<sup>[4]</sup>。

软岩隧道工程围岩稳定性差, 工程建设过程

中需要引起足够的重视。隧道围岩不稳定将造成巨大的经济损失, 甚至造成人员伤亡。当隧道的初期支护措施不足以抵抗围岩荷载时, 在围岩荷载的作用下会产生持续的变形, 当变形量超出预留变形量时会造成初支侵限, 需要采取换拱等措施处理; 当变形量超过初期支护的变形限度时会引起隧道塌方<sup>[4-5]</sup>。

由于初支的变形量与支护措施呈负相关, 因此在隧道施工过程中应根据初支的变形量来及时调整支护措施, 以达到控制初支的变形、确保隧道安全的目的, 初支的变形量可通过有限元数值模拟计算结合监控量测方法获取。本文基于云桂铁路那莫1号隧道出口的施工实践, 通过介绍初支变形的监测方法和分析变形数据, 探讨监控量

收稿日期: 2020-03-14 修回日期: 2020-04-28

作者简介: 程巧建 (1970—), 男, 福建南平人, 高级工程师, 从事铁路和港航工程施工管理及技术工作。

E-mail: cqiaojian@cccc4.com

测在现场施工中的应用。

### 1 监测内容和方法

#### 1.1 监控量测的内容

隧道监控量测的内容包括浅埋隧道的地表沉降、洞内的拱顶下沉、拱脚收敛和断面变形，围岩压力和钢架内力等。本文主要针对洞内拱顶下沉变形、拱脚收敛情况和断面变形 3 个方面，探讨监控量测在现场施工中的应用。

#### 1.2 监控量测的方法

拱顶下沉和拱脚变形的监控测量须预先在围岩上埋设监控量测点，然后在监控量测点上贴反光膜，最后用全站仪对反光膜中心进行观测来采集数据。拱顶沉降是采用全站仪测量拱顶观测点的高程，通过高程计算出沉降量和累计沉降量；拱脚收敛情况的判断是采用全站仪测量同一断面同一台阶两侧拱脚观测点标靶中心之间的距离，通过距离的变化计算出收敛值和累计收敛值。

断面变形测量是使用全站仪测量任意断面初支表面任意点的空间坐标，将同一断面若干测点用曲线连接起来得到初支断面图，通过初支断面图与设计断面图比较判断初支断面是否侵限，不同时间的初支断面图叠加和比较能够形象掌握初支的变形情况。

测点一般布置在拱顶和每个台阶的拱脚处，V级围岩每 5 m 设置 1 个监测断面，IV级围岩每 10 m 设置 1 个监测断面，III级围岩每 30 m 设置 1 个监测断面，同一监测断面的各测点应基本对齐。云桂铁路那莫 1 号隧道围岩等级为 V 级，测点在断面上的布置见图 1。

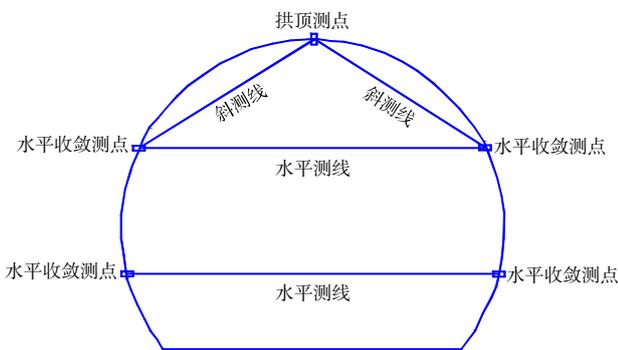


图 1 测点断面布置图

Fig. 1 Section layout of measuring points

在隧道开挖至监测埋设断面后，在断面上布设监测点，其布设要点为：1) 在围岩上钻孔；2)

在孔内埋入直径 20 mm 的螺纹钢，外露长度为 100 mm；3) 用快凝水泥或锚固剂将螺纹钢锚固在围岩上，其埋入围岩深度不小于 20 cm；4) 初支的喷射混凝土完成后，在外露的螺纹钢上焊接 1 块边长 50 mm 的正三角形钢板；5) 在钢板上贴 1 块带有测点标靶的反光膜。需要注意的是监控量测点必须埋在围岩里，不能直接焊在初支钢架上，否则当初支背后有脱空时，钢架和围岩的变形不一致，将导致监控量测不能及时测出围岩的变形。

确定监测断面和布设监测点后，按照表 1 所示的监测频率开展监测工作，其中拱顶沉降和拱脚收敛的观测频率根据观测点的位移速率来判定。

表 1 监测频率

Table 1 Monitoring frequency

监测内容		监测频率/d
拱顶沉降和拱脚收敛	位移速率 < 5 mm/d	1
	位移速率 ≥ 5 mm/d	2
初支断面测量		初支完成后及施工二衬前各测 1 次，其余根据需要在任意位置和时间测量

#### 1.3 监控量测相关工程性质判别

围岩承载力判别：当拱脚测点发生沉降时，可以判断拱脚的地基承载力不足，应采取措施提高拱脚地基承载力或增加拱脚面积来降低地基的应力<sup>6)</sup>。

初支钢架刚度判别：当拱顶的沉降量与两侧拱脚沉降量的平均值相等时，可以判断初支钢架没有变形，初支刚度满足要求。当拱顶的沉降量大于两侧拱脚沉降量的平均值时，可以判断初支刚度不满足要求，此时应采取措施加大初支钢架的刚度<sup>7-9)</sup>。

初支稳定性判别：根据监控量测的时态曲线判断初支是否稳定，当曲线趋于水平时说明初支变形趋于稳定隧道安全；当曲线一直向上时说明初支变形持续增加需要采取措施使初支稳定；当曲线急剧向上时说明初支变形急剧增加，隧道即将发生坍塌，需要立即采取应急措施。

### 2 那莫 1 号隧道初支变形分析

对那莫 1 号隧道进行了 FLAC3D 有限元模拟计算和隧道初支变形监控量测，对模拟计算数值和监控量测数据进行对比分析，确定隧道的变形规律和最大变形值，进而确定进行下一工序的施

工时间。

### 2.1 隧道变形模拟计算分析

本次隧道开挖三维模拟计算岩土体本构模型采用弹塑性模型，初衬、二衬和临时支撑采用弹性模型；设置边界条件时需要注意进出洞口局部边界不能忽略，因此边界条件为：在整体模型左右前后边界约束水平位移，底部约束三向位移；

在洞口左右边界和前边界上约束水平位移。

以地面到隧道底部平均高度为依据，模型左右边界各扩展其高度的2倍、前后边界扩展其平均高度的3倍，以消除边界影响。

由于现场条件和试验方法的限制，无法开展现场试验，只能参考室内土工试验来评定参数，本次计算参数如表2所示。

表2 各岩土层物理力学指标建议值

Table 2 Recommended values of physical and mechanical indexes of each rock layer

土层名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	抗剪强度标准值		弹性模量/GPa	泊松比	压缩模量/MPa
		$c_k / \text{kPa}$	$\varphi_k / (^\circ)$			
素填土	21.0	20	10	0.032	0.39	4.63
强风化砂质泥岩	24.5	31	29	0.140	0.35	4.63
中风化砂质泥岩	25.7	400	31	1.033	0.33	103
中风化砂岩	24.9	1 650	40	6.200	0.25	620
初衬	23.6			28	0.20	4.0
花管注浆等效土体	2 360	70	29	0.572	0.22	57.2
临时支撑	2 500			206	0.20	20 600

那莫1号隧道初值数值模拟计算结果如图2所示，最大变形量可达到200 mm，出现在里程DK435+300附近。

判断初支是否稳定；但当拱顶沉降量较大时，则无法判断拱顶的沉降是由于初支整体下沉造成的还是初支变形造成的，无法直观判断支护是否合理。因此当隧道的变形量较大时，应结合数值模拟分析结果和对各台阶拱脚的测点增加沉降观测的内容，进而通过计算结果、拱顶和拱脚沉降量的比较判断支护合理与否。

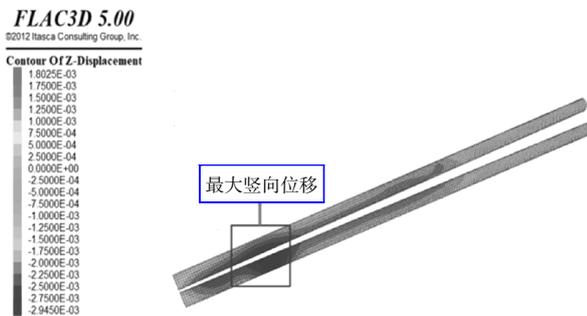


图2 隧道衬砌变形云图

Fig. 2 Cloud image of tunnel lining deformation

### 2.2 隧道变形监控分析

基于拱顶沉降和拱脚收敛的测量结果，可以

按照规范监测频率对拱顶沉降和拱脚收敛进行监控量测，根据监测数据反馈，对监测频率调整进而指导施工。首先，记录并处理数据得到单次测量位移量和累计位移量，以5 d的短期测量记录结果为例，如表3所示：监测里程DK435+310监测点78号，监测内容为拱顶沉降，其中有2 d的拱顶沉降速率大于5 mm/d，当天监测2次进行数据核对，分析拱顶沉降较大的原因并采取工程措施。

表3 拱顶下沉量测分析

Table 3 Measurement and analysis of vault settlement

序号	量测日期	观测数值	本次下沉值/mm	累计下沉值/mm	时间间隔/d	开挖累计时间/d	下沉速率/(mm·d <sup>-1</sup> )	备注
0	05-16	1 248.982	0.0	0.0	0	0	0.0	初始值
1	05-17	1 248.975	7.0	7.0	1	1	7.0	
2	05-18	1 248.975	0.0	7.0	1	2	0.0	
3	05-19	1 248.974	1.0	8.0	1	3	1.0	
4	05-20	1 248.968	6.0	14.0	1	4	6.0	

其次，对每次测量结果进行数据整理，并绘制累计位移量和对应位移速率的时态曲线，图3为那莫1号隧道DK435+310断面拱顶沉降变化曲线，该断面2013年5月16日埋设监控量测点并观测初始值，截止到6月1日最大沉降速率7

mm/d，累计沉降量44 mm，沉降量时态曲线平缓。从6月2日开始，沉降速率加大，沉降量时态曲线持续上扬，初支拱顶沉降加速加大，并且没有收敛的趋势，最大沉降量超过110 mm，并且还在持续增加，这与数值模拟计算结果相吻合。

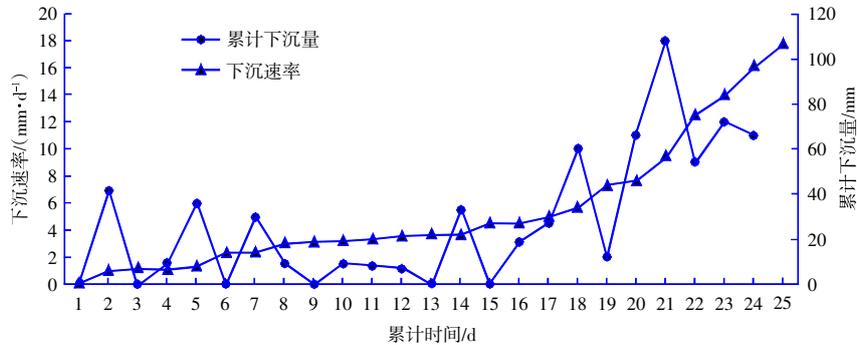


图3 DK435+310拱顶沉降和累计沉降变化曲线

Fig. 3 Curves of DK435 + 310 vault settlement and cumulative settlement

最后，进行初支断面测量并及时绘制断面图以便对比使用，根据初支断面图判断初支是否侵限。那莫1号隧道DK435+297初支断面图如图4所示，实测断面与设计断面比较，该断面所有测点都没有侵限，最大预留变形量还有410 mm位于左侧拱脚处，最小预留变形量剩下3 mm位于拱顶左侧，该处即将侵限需要尽快施作二衬，否则初支继续变形会造成侵限。

由于铁路对建筑限界的要求非常严格，任何建筑物侵入建筑限界将会影响列车运营安全，也无法通过动态验收，因此二衬施工后必须使用相同的方法测量二衬断面，检验二衬是否侵限。

2.3 预留变形量的判断

初支的变形是不可避免的，开挖时必须扩挖出初支的预估变形量，使初支变形稳定后不侵入二衬。初支的预估变形量可根据数值模拟技术和相邻已经稳定的初支的监控量测数据确定。

初支的累积变形量可以作为预留变形量的依据，但监控量测点埋设后，由于太靠近掌子面经常被施工机械破坏，因此一般埋点3 d以后进行首次观测，而初支的变形量通常在施作后的前几天比较大，因此实际变形量通常比监控量测测得的累计变形量大得多。为了准确测量初支的实际变形量，可采用断面测量和沉降测量相结合的方法，即在初支完成后及时测出初支的断面，首次沉降测量的同时再次测量初支断面，通过两次断面图的叠加比较可以测出首次沉降测量时初支已经产生的沉降量。每次沉降测量测得的累计沉降量，再加上首次沉降测量时初支已经产生的沉降量就可以得到初支的实际沉降量。

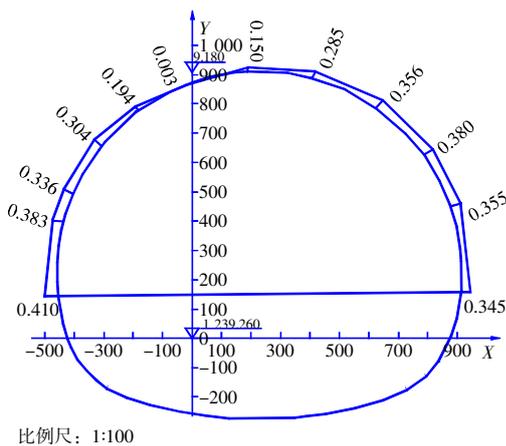


图4 DK435+297测量断面图

Fig. 4 Measurement section of DK435 + 297

从断面图中可以看出拱顶左侧初支变形量比其他部位大，该处为初支的薄弱部位，后续施工时应对该处加强措施控制初支变形。

3 结语

初支变形的影响因素很多，隧道施工前可以根据有限元数值模拟技术预估隧道变形量，结合施工中的监控量测分析影响初支变形的主要原因。

然后, 基于初支变形的不同原因, 采取有针对性的变形控制措施。

控制初支变形对软岩隧道的施工意义重大。云桂铁路软岩隧道较多, 施工过程中遭遇了不少挫折, 在挫折中总结经验教训, 改进监控量测方法, 加强对监控量测数据的分析, 结合现场的实际情况及及时调整支护参数, 顺利完成了软岩隧道的施工任务。

#### 参考文献:

- [1] 张明太. 监控量测在隧道施工中的应用效果[J]. 工程建设, 2017, 49(11):65-68.  
ZHANG Ming-tai. Application effect of monitoring measurement in tunnel construction[J]. Engineering Construction, 2017, 49(11): 65-68.
- [2] 苏兴. 浅埋大跨度双线铁路隧道施工技术及其变形控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
SU Xing. Research on construction technology and deformation control technology of shallow buried long-span double-track railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [3] 肖志明, 罗春雨, 祁海军. 柏杨湾软弱围岩连拱隧道支护结构变形与受力分析[J]. 公路交通技术, 2008(3):97-100.  
XIAO Zhi-ming, LUO Chun-yu, QI Hai-jun. Analysis of deformation and stress of supporting structure of Baiyangwan connecting-arch tunnel with weak wall rock[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(3): 97-100.
- [4] 高吉才. 城市浅埋大断面隧道穿越不良地质施工技术探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2018(10):151-153, 161.  
GAO Ji-cai. Discussion on the construction technology of urban shallow-buried large-section tunnels passing through unfavorable geological conditions[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(10): 151-153, 161.
- [5] 王新平. 典型公路隧道围岩变形特性与稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2004.  
WANG Xin-ping. Research on deformation characteristics and stability of typical highway tunnel surrounding rock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2004.
- [6] 金昊, 刘立. 基于监控量测的隧道的稳定性研究[J]. 四川建筑, 2011, 31(5):218-219.  
JIN Hao, LIU Li. Research on tunnel stability based on monitoring measurement[J]. Sichuan Architecture, 2011, 31(5): 218-219.
- [7] 乐大璞. 大断面浅埋铁路隧道施工中围岩变形的探讨[J]. 上海铁道科技, 2009(4):73-74, 42.  
YUE Da-ying. Discussion on deformation of surrounding rock in construction of large-section shallow buried railway tunnel[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2009(4): 73-74, 42.
- [8] 徐宾宾, 张羽, 司维. 基于Plaxis3D的老鹰山隧道超长破碎带隧道开挖仿真分析[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(9):16-20, 53.  
XU Bin-bin, ZHANG Yu, SI Wei. Excavation numerical simulation of super-long broken zone in Laoying mountain tunnel based on Plaxis3D[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(9): 16-20, 53.
- [9] 刘和文, 张羽, 郭玉彬, 等. 岩溶隧道超长破碎带超前预报方法[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(9):38-43.  
LIU He-wen, ZHANG Yu, GUO Yu-bin, et al. Synthetic advanced prediction technology for super-long broken tunnel in karst area[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(9): 38-43.

欢迎订阅