

· 工程应用 ·

②
113-119

高速公路隧道施工过程的新奥法监控

The Monitoring Measurements and Country Rock Control of NATM in Tunnel of Express Road during Construction

刘立

Liu Li

唐建新

Tang Janxin

U455.48

(重庆大学资源及环境工程学院, 重庆, 630044)

A 摘要 结合中梁山隧道西段施工现场的实测数据, 分析了该段围岩变形的条件和规律, 并对各类围岩的各测线进行了量测数据回归分析, 导出了各类围岩的稳定性判据, 给出了最佳初期支护及二次衬砌时间。

关键词 新奥法; 收敛速率; 稳定判据; 最佳二次衬砌时机
中国图书资料分类法分类号

高速公路,
隧道, 施工过程,
监控,

ABSTRACT In this paper the author's study on the monitoring measurement technique of NATM, the regularity and conditions of the country rock deformation are analysed based on the site measurement data in the west section of Zhongliangshan tunnel. The regression analysis of measure data for different measure lines of various country rock is done by the use of self-compiled CRAP program. The stability criterion for various rockmass and optimum time for primary and permanent support are provided. The conclusion available could conduct the theoretical research of NATM deeply as well as tunnel design and construction.

KEYWORDS NATM; convergent rate; stability criterion for rockmass; optimum time for permanent support

0 引 言

隧道施工过程的力学动态是极其复杂的。它不仅受到岩石的生成条件和地质作用的影响, 还受到隧道构筑过程中的开挖方法、支护类型、支护时机、支护参数等的影响。因而寻求正确反映岩体状态的物理力学模型是非常困难的。因此, 在设计、施工中, 目前主要是参考已建工程的设计参数, 即应用工程类比法与数理初步分析法进行。再通过施工过程对围岩的量测所得的信息, 进行数据分析和综合判断, 从而进一步完善设计并采取相应的施工对策。其中, 量测工作及量测结果分析就成为监视设计、施工是否合理的一项至关重要的工作。

本量测工作的主要目的是: 掌握围岩动态和支护结构工作状态, 利用量测结果检验设计

的合理性并指导施工;预见险情及事故,以防患于未然,为确保隧道安全提供可靠信息;积累资料,为以后的工程设计提供类比参考;并为进一步进行深入的理论研究提供原始依据。

1 监控量测方案

中梁山隧道地处中梁山北段。从中梁山背斜轴部起,往东、往西沿隧道对称分布的地层为 Q、J₁₋₂、T_{3s}、T_{2L}、T_{1L}、P_{2c}、P_{2L}共八个。地质构造以隧道中部的中梁山背斜为主。背斜附近有 F₁~F₄断层,其中西段测区内 F₁~F₃断层均由钙质或方解石胶结的压碎岩组成,自稳性较好。岩溶水在 T₁中较发育。

采用新奥法原理修筑隧道时,利用围岩周边变形的观测值可对隧道周边岩体内的应力动态过程及发展趋势、围岩稳定性、最终变形总量以及支护的合理性与二者间的相互关系进行良好的跟踪监视。因而对施工具有重要的指导作用。根据工程实际需要、课题目的及现场施工具体条件,在量测实施方案中,将隧道净空收敛量测作为重点必测项目,而对隧道围岩内变位量测等仅在必要处作针对性测试。

根据中梁山隧道地质条件及施工监测的要求,在各类围岩中布置了与之相应的量测断面,其测桩及测线布置如图 1 所示。即拱基线 *d*、侧墙线 *b*、斜基线 *a*、*c* 和拱顶下沉计算值 *h* 以及五个测桩。各类围岩监测断面间距及量测频度分别列于表 1 及表 2 中:

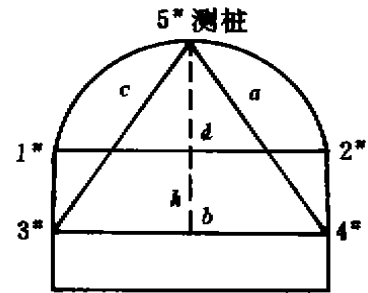


图 1 量测断面的测桩及测线布置

表 1 监测断面间距 m

围岩类别	I类	II类	III类	V类
监测断面间距	5~10	10~20	20~50	20~100

表 2 量测频度

开挖时间	1~15 d	16~30 d	31~90 d	91~120 d	>120 d
量测频度	1次/天	1次/2天	1次/周	1次/2周	1次/月

量测仪器采用 KM-1 型及 SWJ-78 型收敛计,并配用温度计作测尺温度修正用。

对 KM-1 型收敛计,因测读值随隧道净空的缩小而减小,故各测线相邻两次量测的收敛差值为:

$$\Delta U_i = R_{i-1} - R_i \tag{1}$$

第 *n* 次量测的总收敛值为:

$$U_n = \sum_{i=2}^n \Delta U_i \tag{2}$$

拱顶下沉量 Δh 按下式计算:

$$\Delta h = h_{i-1} - h_i \tag{3}$$

其中 $h_{i-1} = \frac{2}{b} \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$, $s = \frac{1}{2}(a+b+c)$ (4)

$h_i = \frac{2}{b'} \sqrt{s'(s'-a')(s'-b')(s'-c')}$, $s' = \frac{1}{2}(a'+b'+c')$ (5)

测尺在温度修正后的真实微读数 R_s 为:

$$R_s = R_s + L_s \alpha (20 - t_s) \quad (6)$$

量测间隔时间(净天数)的计算式为:

$$\Delta T_i = \frac{(H_i - H_{i-1})60 + (M_i - M_{i-1})}{1440} + D \quad (7)$$

第 1 次至第 n 次量测的累积总时间为:

$$T_n = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (8)$$

上式中 U ——测线收敛值 mm;
 R ——测尺微读数 mm;
 Δh ——拱顶下沉值 mm;
 $i-1, i, n$ ——量测顺序号;
 L ——测尺总长度 mm;
 α ——测尺线膨胀系数;
 a, b, c, a', b', c' ——分别为 a, b, c 测线在上一次和本次量测的总长度 mm;
 H, M ——分别为某次量测时刻的钟点小时读数(24 小时制)和分钟读数;
 D ——相邻两次量测的间隔天数;
 T ——量测间隔时间(天数);
 t ——洞内观测点温度读数($^{\circ}\text{C}$).

2 量测结果与环境因素

2.1 量测实例分析

从大量的测线量测数据获悉,隧道周边变位动态过程及施工影响均体现于量测数据上,并可从变位时间曲线 $U-t$ 、变位速率时间曲线 $\dot{U}-t$ 及加速度时间曲线 $\ddot{U}-t$ 反映其对应特征。

以 D-5h 号量测断面(即位于 IV 类围岩、第 5 号断面、h 测线)为例,其所处围岩呈中厚层泥质石灰岩,层理明显,岩层较完整,岩质性脆,爆破后断面参差不齐,壁面凹凸较明显,纵横裂隙增多。实际初喷混凝土为 1~3 cm。

图 2 是该断面在前方施工过程中测得的变位 U -时间 T 曲线及与开挖面至量测断面距离 S 的关系。由图可知:最初几天的变位较显著,而以后逐渐趋缓,表明周边变位受时间及开挖面距离的影响很明显;同时,变位的发展快慢及波动大小又受某些施工因素的影响。如图中 ① 是初喷,② 是复喷,③ 是装锚杆并停工检修四天。从中可见影响是较明显的。之后随着时间及距离的增大,周边变位波动的总趋势已越来越小,总变位量也逐步逼近一固定值。证明这期间围岩是基本稳定的,可适时构筑二次衬砌。

图 3 是该断面的变位速率 \dot{U} -时间 T 曲线,是以单位时间内产生的变位来衡量围岩的稳定状态。图中实线为本次收敛量测值减去上一次收敛量测值后再除以这两次量测间隔时间而得,即:

$$\dot{U}_i = \frac{\Delta U_i}{\Delta T_i} = \frac{U_i - U_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} \quad (9)$$

位移速率 \dot{U} 能及时反映当天或近几天的变位速度,在现场作近期稳定状态判断时可以此量

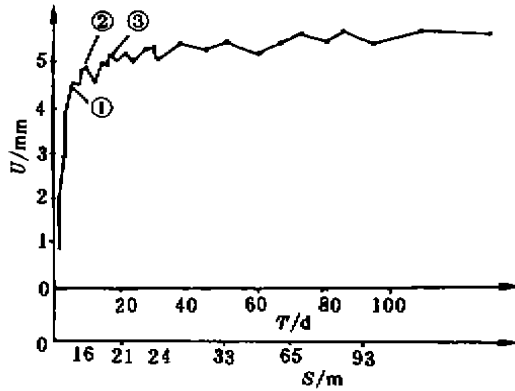
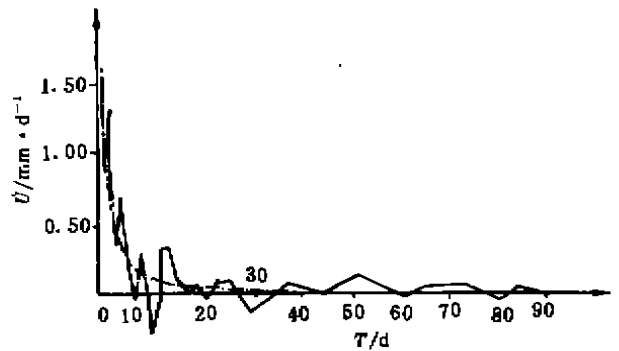


图2 变位-时间及距离曲线

图3 变位速率-时间曲线 $\dot{U}-t$

为依据。

图中点划线是用量测所得的各组数据作回归计算,求得残差平方和最小的最佳拟合曲线,即时态方程 $U = f(T)$,求其一阶导数即得变位速率方程。例如,图2的回归方程为:

$$\hat{U} = 5.47287e^{-1.69005/T} \quad (10)$$

故相应的变形速率方程为:

$$\dot{U} = \frac{d\hat{U}}{dT} = \frac{9.24943}{T^2} e^{-1.69005/T} \quad (11)$$

据此,只要代入所需考察的时间 T ,即可求得对应的瞬时变位速率值 \dot{U} ,只是此法须获得足够的数据后才可计算分析,因而适合于中远期预测。

变位加速度也可用于判断隧道周边稳定性或危险性。其值可由量测值近期的变位速率及间隔时间确定,即

$$\ddot{U} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{i-1}}{T_i} \quad (12)$$

或用回归方程计算:

$$\ddot{U} = \frac{d^2\hat{U}}{dT^2} \quad (13)$$

据计算结果,若 $\ddot{U} < 0$,即变位速率在减小,预示围岩在逐渐趋稳;若 $\ddot{U} = 0$,则表明围岩位移速率为定值,需加强支护;若 $\ddot{U} > 0$,则变位速率在不断加快,表明围岩处于危险状态,必须立即采取紧急措施。例如,对上述变位回归方程求二阶导数,其加速率为:

$$\ddot{U} = \frac{d^2\hat{U}}{dT^2} = \left(\frac{15.6320}{T^4} - \frac{18.4989}{T^3} \right) e^{-1.69005/T} < 0 \quad (14)$$

证明围岩变位速率在逐渐减小。

其它观测断面所得大量围岩变位过程具类似结果,仅最终变位量、回归方程形式及回归系数不同。

现场还进行了围岩内变位量测,其结果证明围岩内空变位量测是可信的,并以此确定了围岩松动圈的深度限于篇幅,在此不予赘述。

2.2 围岩性质与变位

围岩类别不同,其物理力学性质差异也较大,围岩的稳定性及变形特征也必然不同。据实际量测所得 I、II、IV 类围岩收敛数据的统计结果,列于表3中。即围岩类别越高,其急剧

变位期 $T_{\text{变}}$ 、最大变位速率 U_{max} 和基本稳定时间 $T_{\text{基}}$ 就越小。这与围岩自身性质密切相关。当然,也与支护结构及施工工艺有关。如 I 类围岩,若因开挖进度放慢,且初期支护加强或提早二次衬砌,都会使其量值较通常值偏小。

表 3 各类围岩的变位

围岩类别	$U_{\text{max}}/\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	$T_{\text{变}}/\text{d}$	$T_{\text{基}}/\text{d}$
I	2.5 ~ 8.5	10 ~ 22	34 ~ 59
II	0.5 ~ 4.2	5 ~ 9	14 ~ 32
N	0.2 ~ 0.9	3 ~ 6	9 ~ 15

2.3 端面效应与变位

图 4 绘出了三类围岩中代表性的三个监测断面所得围岩变位 U 与量测面至开挖面距离 s 的相互关系。量测结果表明,中梁山隧道西段中 I、II、N 类围岩的显著变位距离分别约为 $3.9D$ 、 $2.8D$ 和 $1.5D$ (D 为隧道开挖跨度,现场实际开挖跨度 $11 \sim 12 \text{ m}$)。即在开挖端面刚解除期间,由于前方失去支撑,随着圆形拱部周边的二次应力调整及初期支护的作用,加上周边自承载拱的形成,逐步使其受力及位移达到平衡,因而周边位移随之愈来愈小。当超过一定距离后,距离对位移的影响已很微小。即由端面效应转为时效过程,围岩渐趋稳定。

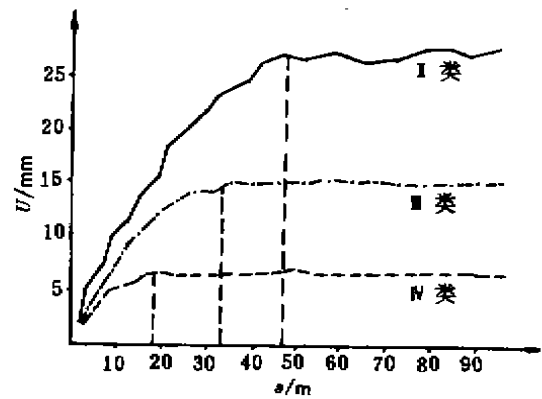


图 4 量测面至开挖面距离与围岩变位的关系

3 数据处理程序与综合评价

3.1 围岩变位与支护

隧道开挖后,围岩即由一次应力状态变为二次应力状态。此时围岩的应力、位移视围岩强度不同可能处于弹性、塑性或松弛状态。中梁山隧道由于埋深较大,地压明显,岩体强度较低,因而属于塑性破坏。假定岩体的内聚力及内摩擦角不变,据莫尔-库仑准则,塑性区围岩周边位移在一定的岩体条件、隧道形态及原岩应力条件下,主要取决于支护抗力 P_i ,其值越大,位移就越小。

有关围岩变位与支护类型、支护时间及围岩压力间的关系及影响曲线在许多文献及专著中已有论述。在人们熟知的 Fenner-Pacher 曲线中已阐明:支护刚度过大或支护时间过早,会使支护承受过大的载荷;而支护强度过低或支护时间过迟会使周边围岩产生过大位移,造成松动破坏区扩大,降低围岩的自承载能力,同样会使支护超载过大,甚至出现失稳垮落现象。因此,合理的支护抗力应满足

$$P_{i\text{max}} > P_i > P_{i\text{min}} \quad (14)$$

或围岩位移 U 应满足

$$U_0 < U < U_1$$

其中 P_{\max}, U_0 ——最大支护抗力及对应的周边位移;

P_{\min}, U_1 ——隧道不失稳的最小支护抗力及对应的周边位移。

因此,用新奥法指导施工时,应适当允许并控制围岩周边的变位量,合理选择初期支护结构及刚度,在恰当的时机构筑二次衬砌,才能确保支护构筑物的安全、围岩的完整性及稳定性,使设计与施工更经济合理。为此,在施工期间将观测所得围岩周边变位量与该类围岩允许最大变位量 $[U]$ 相比较,若接近 $[U]$ 值,预示围岩有可能出现大的松动破坏或垮塌,应立即对支护补强;大于 $[U]$ 时,围岩一般已发生松动破坏,且支护正承受过大载荷或已发生破坏;对明显小于 $[U]$ 的情况则应视具体条件分析,有可能是支护刚度偏大,也可能是因施工方法的原因造成大断面开挖前已释放了相当的位移量,还有可能是因围岩本身是脆性岩石,破坏前变位量本身就较小,在一定的支护作用下导致变位量较小。一般认为,小于 $[U]$ 时,围岩基本上是稳定的,但不排除例外,如破碎硬岩失稳时的变形值比相应的 $[U]$ 值小得多。中梁山隧道则属后一情况。按隧道周边允许相对位移及隧道宽度算得本隧道段 I、II、IV 类围岩 $[U]$ 值分别为 72 mm、48 mm 和 24 mm,而由回归方程推算的拱顶下沉最终位移值约为 18 ~ 51 mm、8 ~ 26 mm 和 4 ~ 9 mm。由于围岩呈脆性,在正常开挖推进中,工作面初始位移是很小的,同开挖后总位移相比可不计入。因此,由推算的最终位移值可初步判断,围岩位移是较明显地小于 $[U]$ 的。实际施工中 IV 类及少量 III 类围岩也确发生过几处局部小面积脆性断裂、垮落现象(初期支护为喷射混凝土 1 ~ 3 cm,还未复喷和打锚杆),证明了脆性围岩变位虽较小,但在较大洞跨下,初期支护不宜减弱。但总的说来,该初期支护基本上是适宜的,对少数破坏处作补强后,仍能使隧道工程顺利进行。

3.2 回归分析与综合评价

为使现场监测所得大量原始数据得到及时处理并作回归分析,找出最佳拟合方程,以便预测未来发展趋势及最终变位量,并对各量测点作综合分析,以便对围岩稳定性、支护可靠性提出评价,对施工及设计修正提供参考依据,特编制了 CRAP 程序(其程序框图从略)。该程序据中梁山隧道西段具体观测情况,预置了 12 个回归方程式,由计算所得回归精度最高者作为最佳回归方程。

表 4 各测线观测数据总体比较表

测 线	\bar{U}/\bar{U}_0		
	I 类围岩	II 类围岩	IV 类围岩
拱顶 a	34.50	17.00	6.50
	5.50	2.35	0.56
拱脚 d	7.62	4.32	2.71
	0.74	0.51	0.43
侧墙 b	3.58	1.86	0.69
	0.35	0.17	0.12

注: \bar{U} 为总收敛平均值; \bar{U}_0 为最大收敛速率平均值

经大量观测及数据处理分析后得到(因量大,有关数据表、曲线图及方程式从略,总体数据比较表参见表 4);各类围岩中拱顶下沉值相对较大,边墙收敛值最小,证明隧道开挖后拱部岩体活动较强,而侧墙相对较平稳;初期最大变位速率及最终变位量也有类似规律;同一

种测线中, I 类围岩变位置最大, IV 类最小, 基本稳定时间也如此。表明围岩的完整坚固性越好, 其变位值就越小, 达到完全稳定所需时间就越短。

4 监测对工程的指导

监测工作随隧道工程进展不断进行, 所有数据及时处理。为使量测信息反馈及时, 以指导工程, 采用当日或近几日 $\frac{\Delta U}{\Delta T}$ 值及变化趋势预测围岩稳定性及支护安全性。在量测数据达到 25 ~ 30 个时即可作回归计算分析, 以预计未来发展及最终变位置。为检验其可靠性, 有条件处仍坚持收敛量测, 测出最终变位置, 并与 $[U]$ 值比较, 以作辅助判断。在重点地段配合围岩内变位置测, 既能检验净空收敛量测的符合度, 又可考查锚杆合理锚固深度。

监控量测反馈信息有: 提供围岩稳定时间, 用以构筑二次衬砌; 围岩即将失稳预报, 以策安全; 围岩及支护破坏报告, 配合工程地质描述, 提出支护补强或修改建议; 每月或每季提出阶段总结评价报告。

5 结 论

1) 经大量实测与研究, 在隧道周边内空变位置测中, 用两条水平基线和两条斜基线可实现对隧道内空变位的良好监测, 量测数据所反映的规律能较合理地代表围岩变形过程及发展趋势。结合围岩内变位置测, 可判断围岩松动圈深度并验证内空量测的符合度。

2) 据围岩变形速率值可将围岩变位过程分为显著变位期、缓和变位期和微小变位期。自拱顶下沉速率小于 0.1 mm/d 起, 围岩已进入基本稳定状态, 结合实际工程, 以此作为围岩稳定性判据是合理和实用的。

3) 据量测数据计算所得最佳拟合回归方程, 可估算围岩最终变位置, 并可结合量测所得总收敛值与周边允许变位置 $[U]$ 相比较作辅助判断, 借以检验支护工作状态及围岩稳定性。而最佳二次衬砌应在围岩产生适量变形并在发生松动破坏之前构筑。

4) 变位置及变位速率值受多种因素的综合影响, 量测数据的可靠性及精度取决于仪器结构、量测技术及误差修正技术。

5) 围岩变位置测的数据反馈, 可及时提供围岩稳定性和支护工作状态信息, 可有效地指导实际工程, 这已为施工实践所证实。

参 考 文 献

- 1 K. Najm, Y. Ishijima. Back Analysis of Tunnel Lining Deformation; Development and Application of Passive Resistance Method, Rock Mech. Rock Engng. 1993, 26(1), 71~79
- 2 Г. Hitagawa T. Kumeta T. Ichizyo. 用收敛——约束法研究挤压岩石隧道的初期位移. 隧道译丛, 1993(5), 12~23
- 3 王建宇. 隧道工程监测技术和信息化设计原理. 北京: 中国铁道出版社, 1990. 47~79
- 4 铁道部基本建设总局. 铁路隧道新奥法指南. 北京: 中国铁道出版社, 1988. 94~113
- 5 韩瑞庚. 地下工程新奥法. 北京: 科学出版社, 1987. 15~30