

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.014

# 基于概率统计法的隧道围岩变形稳定时间及二衬施作时机研究

王睿<sup>1,2</sup>, 党发宁<sup>1</sup>, 李明亮<sup>2</sup>, 邓祥辉<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 隧道围岩变形稳定时间及二衬施作时机的科学确定是隧道设计和施工的关键技术难题。基于拱顶下沉监测数据,对某公路隧道 V 级围岩 29 个监测断面和 IV 级围岩 23 个监测断面围岩变形基本稳定时间进行分析。结果表明:25 个 V 级围岩监测断面和 21 个 IV 级围岩监测断面的时态曲线满足指数函数;通过概率统计分析,发现各断面围岩变形基本稳定时间虽不尽相同,但分布频率符合正态分布;由此推求出该隧道 V 级和 IV 级围岩基本稳定时间分别为 49 天和 40 天,与工程实际较为一致。本文的研究成果可为围岩稳定性分析、初期支护参数优化和二次衬砌施作时机选择提供理论依据。

**关键词:** 隧道; 围岩; 拱顶下沉; 概率统计; 二次衬砌

**中图分类号:** T451      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-4710(2017)02-0204-07

## Research on deformation stability time and secondary lining laying time of tunnel surrounding rock based on probability statistics method

WANG Rui<sup>1,2</sup>, DANG Faning<sup>1</sup>, LI Mingliang<sup>2</sup>, DENG Xianghui<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Tunnel rock deformation settling time and facilities for the timing of the second lining scientific certainty are the key to the tunnel design and construction technical problems. Based on the vault settlement monitoring data, Grade V 29 monitoring section and Grade IV 23 monitoring cross section deformation of surrounding rock deformation are of basically stable time with a highway tunnel analyzed. The results show that the 25 V level monitoring section of surrounding rock and 21 level IV surrounding rock monitoring section of temporal curves meet exponential function. By probability statistics analysis, the cross section of surrounding rock deformation basically stable time is different, but the distribution of frequency accords with the normal distribution Hence the tunnel V level and level IV surrounding rock stability time is basically 49 days and 40 days respectively, which is consistent with the engineering practice. In this paper, the research achievements of supporting parameters for stability analysis of surrounding rock are obtained, and the early timing optimization and secondary lining do provide a theoretical basis.

**Key words:** tunnel; the surrounding rock; vault sink; probability and statistics; the secondary lining

20 世纪 70 年代末新奥法被引入我国并逐步应用于隧道施工领域,其最显著的特点表现为围岩与喷锚支护结构形成承载环,共同承担隧道围岩压力,

而监控量测是新奥法施工的必要程序<sup>[1]</sup>。现场监控量测是监测围岩稳定,检验设计与施工是否合理及安全的重要手段。把量测信息及时反馈到设计和施

**收稿日期:** 2016-03-14

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51679199);陕西省交通运输厅建设科技资助项目(13-14K);陕西省科技统筹创新工程重点实验室资助项目(2014SZS15-Z01);水利部公益性行业科研专项基金资助项目(201501034-04);西安工业大学校长基金资助项目(XAGDXJJ16003)

**作者简介:** 王睿,男,讲师,博士生,研究方向为岩土与隧道工程。E-mail:wangrui@xatu.edu.cn

**通讯作者:** 党发宁,男,教授,博导,博士,研究方向为岩土工程数值分析、计算力学。E-mail:dangfn@mail.xaut.edu.cn

工中去,对初期支护优化,围岩稳定性分析,二次衬砌的施作时间选择,具有重要的理论和实际意义<sup>[2-3]</sup>。因此,科学确定公路隧道围岩变形稳定时间及二衬时机成为新奥法成败的关键技术难题,一直备受理论界和工程界的高度关注。众多的国内外学者在这方面做了大量研究<sup>[4-9]</sup>。这些研究对于分析不同工法施工时隧道的变形规律具有重要的价值,但大多数研究仅针对具体的几个监测断面就得出结论。而即使是同一个隧道同一级围岩也会由于岩性和岩体结构差异而导致不同断面的累计位移值和稳定时间差异较大。因此,针对这一情况,有必要在大量实测数据的基础上,探寻隧道围岩变形的规律性。

本文采用一元非线性回归方程逐一分析各监测断面围岩累计变形的时态规律,得出各断面的围岩基本稳定时间和二衬施作时机。同时,绘制同一隧道IV级、V级围岩变形基本稳定时间直方图和概率分布曲线,并结合MATLAB软件拟合分析,得出同级围岩基本稳定时间的概率分布满足正态分布规律。以90%的断面达到变形基本稳定作为该级围岩变形基本稳定时间和二衬施作时机,根据正态分布密度函数和正态分布曲线计算该级围岩的变形稳定时间。并结合工程实践总结出IV级、V级围岩变形稳定的普遍规律,为二次衬砌的施工提供可靠的理论依据。

## 1 基于概率统计的围岩稳定时间分析方法

以“岩承理论”为基础的新奥法施工强调动态监控量测,根据现场监测数据确定围岩变形稳定时间及二衬的施作时机,并以此为依据优化开挖及支护参数,确保施工安全。由于隧道施工现场条件的复杂性,仪器误差和人员观测误差等因素,导致现场量测的原始数据具有很大的离散性,因此必须对数据进行归纳整理、误差分析,对数据的规律进行发掘和总结,找出各个变量之间的相关性并化为量测曲线或数学方程。

依据《公路隧道施工技术规范 JTG F-2009》<sup>[10]</sup>的要求,结合具体工程的围岩条件、支护参数、施工方法等因素布设监测断面和监测点,按规定频率和次数进行现场观测后,将各断面监测结果绘制成时态曲线。再应用对数函数、指数函数、幂函数等方程对每一个监测断面的数据进行一元非线性回归分析,当相关性系数 $R^2$ 大于0.8时,可判定其回归相关,并总结累计变形量随时间的动态变化规律,分析围岩变形稳定时间和二衬的施作时机。

由于岩体各向异性、非连续、材质不均、地质构

造复杂多变,导致即使是同类围岩,变形达到基本稳定所需的时间也不尽相同。故通过各级围岩基本稳定时间频率直方图及概率分布曲线,发现基本稳定时间的概率分布近似服从正态分布。采用概率统计的方法进一步确定围岩变形稳定时间的概率分布规律,本文建立的基于概率统计的围岩稳定时间分析方法具体步骤如下:

1) 将原始数据在MATLAB中运用概率纸检验数据的正态分布情况,检验结果输入命令[h, p, jbstat, cv]=jbtest(x, 0.05),运行程序后若结果显示 $h=0$ ,则在正态分布概率图中,所有的样本点都在实线附近,稳定时间服从正态分布。

2) 用命令Jarque-Bera检验,构造一个包含数据样本的偏度( $g_1$ )和峰度( $g_2$ )的分布统计量(自由度 $n=2$ ),对于显著性水平,当分布统计量小于分布的分位数时,接受 $H_0$ :总体服从正态分布;否则拒绝 $H_0$ ,即总体不服从正态分布。

3) 经验证该级围岩变形基本稳定时间符合正态分布后,再通过MATLAB进行拟合和统计分析得到期望值和方差,即可得到正态分布的概率密度函数 $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ ,  $t \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,并绘制正态分布曲线。

4) 由正态分布曲线可得分布函数: $\phi(t) = \int_0^T \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt = P(t \leq T)$ ;  $P$ 表示某个时间落在 $(-\infty, T]$ 中的概率。综合考虑施工的安全性和围岩材质的不均匀性假定保证率 $P=90\%$ ,即认定90%的断面围岩变形达到基本稳定的时间为该级围岩的变形基本稳定时间和二衬施作时机,则令 $\phi(t)=0.9$ ,推求出 $t$ 。

## 2 工程实例

### 2.1 工程地质概况

某高速公路隧道是安康至汉中高速公路第三合同段的一座分离式隧道。隧道洞身横穿多条构造带,这些构造带经历了多期构造运动、变质运动和混合岩化作用,地质构造和地层岩性复杂并伴有多条断层。岩性主要为弱风化、强风化、变质安山玄武岩。隧道右线里程桩号YK225+161~YK226+240,全长1 079 m,最大埋深152 m;隧道左线里程桩号ZK225+135~ZK226+228,全长1 093 m,最大埋深160 m。地下水主要为基岩裂隙水、构造裂隙水,表层分布少量覆盖层孔隙水。拟建区内无滑坡、泥石流等不良地质现象,地下水对混凝土无侵蚀。

## 2.2 设计参数

该隧道为分离式长隧道,隧道建筑限界净宽 10.50 m,净高 5.0 m。设计内轮线为半径 5.57 m 的单圆,仰拱半径为 15.0 m;最大开挖线 12.88 m,隧道的净空断面图如图 1 所示。隧道采用复合式衬砌,支护参数为:① IV 级围岩喷 22 cm 厚的 C25 混凝土,钢拱架为 I18b 型间距 1 m,  $\phi 8$  间距 @20×20 钢筋网,纵向间距为 1.0 m,长度为 2.5 m 的早强砂浆锚杆,二次衬砌采用 35 cm 厚的 C30 钢筋混凝土;② V 级围岩喷 25 cm 厚的 C25 混凝土,钢拱架为 I22b 型间距 0.8 m,  $\phi 8$  间距 @20×20 钢筋网,纵向间距为 0.5 m,长度为 4.0 m 的早强砂浆锚杆,二次衬砌采用 50 cm 厚的 C30 钢筋混凝土。施工方法采用环形开挖预留核心土法。

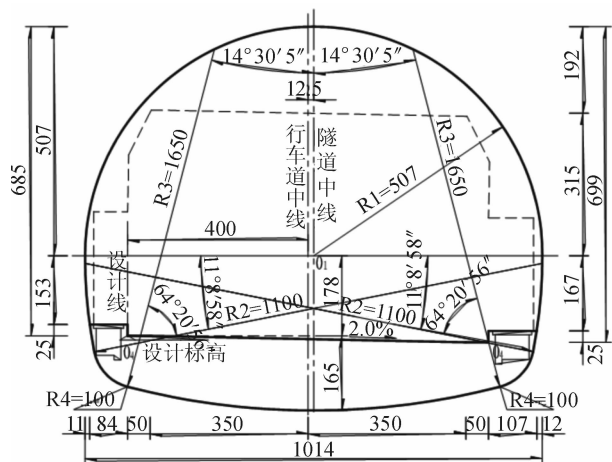


图 1 隧道净空断面图

Fig. 1 The clearance section of the tunnel

## 2.3 隧道动态监测方案

公路隧道施工阶段进行的变形监测分为必测项目和选测项目两大类,其中必测项目包括拱顶下沉和洞周收敛,贯穿于隧道施工的全过程,可较直观反映围岩的变形情况,对围岩的稳定性及时进行评估,为确定二次衬砌的施作时机提供理论依据<sup>[11]</sup>。

依据《公路隧道施工技术规范 JTG F-2009》的要求,结合本公路隧道的围岩条件、支护参数、施工方法,拟定了本隧道监控量测方案。本文仅针对本隧道右洞拱顶下沉监测数据进行分析研究。

### 1) 监测断面布置

拱顶下沉断面的布置按围岩级别划分,对于 V 级围岩,间距 5~10 m 布置一个量测断面;对于 IV 级围岩,间距 10~20 m 布置一个量测断面;对于 III 级围岩,间距 20~50 m 布置一个量测断面;对于 II 级围岩,间距 50~100 m 布置一个量测断面。结合

本隧道的实际围岩条件共布设拱顶下沉监测断面 52 个,其中 V 级围岩 29 个,IV 级围岩 23 个,具体里程桩号见表 1、表 2。

### 2) 监测点布置

为确保数据可靠拱顶下沉共布设 3 个测点,要求 3 个测点应埋设在同一垂直平面内。其中,点 1 设在拱顶中央,在其两侧各 1.5 m 处对称设置点 2 和点 3,具体位置见图 2。

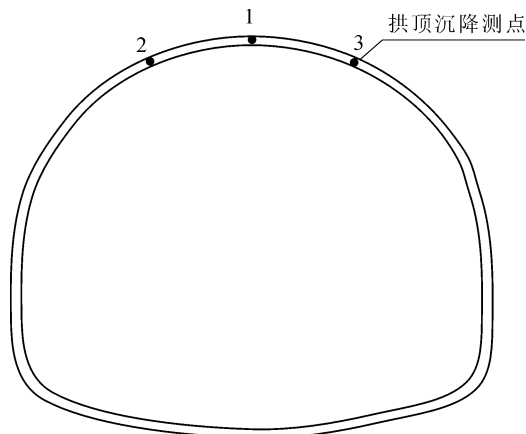


图 2 洞内拱顶下沉断面测点布置图

Fig. 2 Arrangement of crown settlement section measuring point in tunnel

### 3) 监测方法

本隧道拱顶沉降监测采用 PENTAX R-422NM 全站仪,仪器精度 1 mm+1 ppm。根据《公路隧道施工技术规范 JTG F-2009》中对监测频率的要求,并结合工程的具体情况,拟定现场监控量测频率:1~15 天,1~2 次/天;16 天~1 个月,1 次/天;1~3 个月,1~2 次/周;大于 3 个月,1~2 次/月。在具体监测过程中可根据施工中出现的各种现象适当增加监测频率和监测次数。

由于隧道变形监测数据的大小和稳定时间受施工工艺、监测点距掌子面距离、监测开始时间影响显著,故为了准确监测围岩变形的全过程,在掌子面爆破 6 小时内,距掌子面 1 m 内,在初期支护施工阶段将监测点焊接在钢拱架上,并读取初始数据,再用保鲜膜包裹后喷射混凝土,待第二天混凝土硬化后拆除保鲜膜每天定时实施监测。

## 3 数据分析处理

### 3.1 现场量测数据回归分析

随机选取 V 级围岩 YK225+166 断面和 IV 级围岩 YK225+288 断面,运用指数函数、对数函数和双曲函数分别进行回归分析,发现位移时态曲线与指数函数相关性较高(见图 3、图 4),故假定该隧道

围岩变形规律符合指数函数。并运用指数函数  $u = a \cdot e^{-\frac{b}{t}}$  对该隧道 52 个拱顶下沉监测断面数据

进行非线性回归分析,逐一得出其回归方程和相关系数  $R^2$ 。具体回归方程如表 1、表 2 所示。

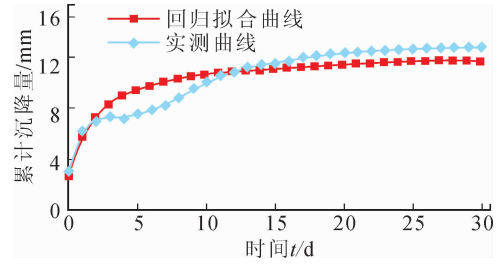
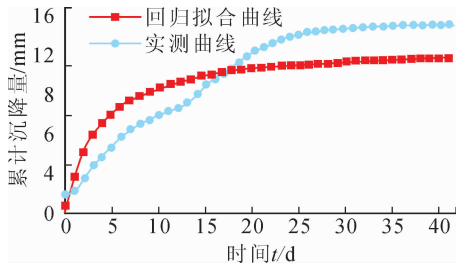


图 3 YK225+166 断面实测曲线和回归拟合曲线  
Fig.3 Section of YK225+166 measured curve and regression curve fitting

图 4 YK225+288 断面实测曲线和回归拟合曲线  
Fig.4 Section of YK225+288 measured curve and regression curve fitting

表 1 V 级围岩监测断面回归分析、稳定时间与稳定速度统计结果

Tab.1 Statistical results of regression analysis, stable time and stable rate of monitored sections for rock level V surrounding

编号	里程桩号	拱顶下沉量回归方程	相关系数 $R^2$	预计最大位移/mm	基本稳定位移/mm	实测最大位移/mm	稳定时间 $t/d$	基本稳定速度/(mm/d)
1	YK225+166	$U=13.492\exp(-2.974/t)$	0.873 2	13.492	12.143	15.200	28	0.118
2	YK225+186	$U=22.937\exp(-5.479/t)$	0.924 1	22.937	20.643	21.300	52	0.048
3	YK225+202	$U=16.510\exp(-2.318/t)$	0.831 7	16.51	14.859	15.210	22	0.102
4	YK225+220	$U=10.695\exp(-1.580/t)$	0.860 8	10.695	9.626	10.475	15	0.121
5	YK225+240	$U=27.055\exp(-4.952/t)$	0.867 7	27.055	24.350	26.050	47	0.064
6	YK225+258	$U=16.182\exp(-3.582/t)$	0.812 8	16.182	14.564	15.980	34	0.056
7	YK225+333	$U=44.416\exp(-4.320/t)$	0.959 4	44.416	39.974	42.450	41	0.123
8	YK225+351	$U=49.737\exp(-4.109/t)$	0.900 7	49.737	44.763	45.900	39	0.146
9	YK225+366	$U=33.490\exp(-3.055/t)$	0.986 4	33.49	30.141	32.375	29	0.142
10	YK225+441	$U=25.567\exp(-4.004/t)$	0.918 0	25.567	23.010	23.730	38	0.077
11	YK225+461	$U=9.916\exp(-2.423/t)$	0.888 4	9.916	8.924	9.410	23	0.057
12	YK225+585	$U=14.944\exp(-3.793/t)$	0.981 8	14.944	13.450	13.956	36	0.048
13	YK225+605	$U=13.529\exp(-3.372/t)$	0.990 5	13.529	12.176	13.385	32	0.051
14	YK225+625	$U=15.133\exp(-2.739/t)$	0.942 9	15.133	13.620	14.500	26	0.074
15	YK225+640	$U=7.661\exp(-3.477/t)$	0.965 5	7.661	6.895	7.625	33	0.028
16	YK225+660	$U=5.077\exp(-1.896/t)$	0.889 6	5.077	4.569	4.808	18	0.042
17	YK225+676	$U=2.478\exp(-2.456/t)$	0.424 6	2.478	2.230	3.050	7	0.250
18	YK225+686	$U=8.676\exp(-2.107/t)$	0.922 1	8.676	7.808	8.925	20	0.062
19	YK225+835	$U=12.076\exp(-2.634/t)$	0.900 0	12.076	10.868	11.150	25	0.062
20	YK225+850	$U=5.353\exp(-4.516/t)$	0.682 5	5.353	4.818	8.200	21	0.051
21	YK225+870	$U=36.293\exp(-4.636/t)$	0.980 2	36.293	32.664	35.825	44	0.092
22	YK226+132	$U=50.451\exp(-4.214/t)$	0.936 8	50.451	45.406	48.850	40	0.143
23	YK226+147	$U=62.081\exp(-5.057/t)$	0.975 8	62.081	55.873	59.675	48	0.142
24	YK226+156	$U=3.512\exp(-2.318/t)$	0.342 3	3.512	3.161	5.720	11	0.091
25	YK226+166	$U=12.153\exp(-3.688/t)$	0.813 1	12.153	10.938	11.300	35	0.041
26	YK226+181	$U=34.399\exp(-3.898/t)$	0.963 3	34.399	30.959	33.350	37	0.107
27	YK226+201	$U=13.109\exp(-4.741/t)$	0.933 8	13.109	11.798	12.530	45	0.032
28	YK226+217	$U=11.268\exp(-8.467/t)$	0.792 9	11.268	10.141	7.690	38	0.063
29	YK226+235	$U=16.118\exp(-5.795/t)$	0.934 2	16.118	14.506	13.260	55	0.032

表2 IV级围岩监测断面回归分析、稳定时间与稳定速度统计结果

Tab.2 Statistical results of regression analysis, stable time and stable rate of monitored sections for rock level IV surrounding

编号	里程桩号	拱顶下沉量回归方程	相关系数 $R^2$	预计最大 位移/mm	基本稳定 位移/mm	实测最大 位移/mm	稳定时间 $t/d$	基本稳定速度 /(mm/d)
1	YK225+288	$U=12.321\exp(-1.522/t)$	0.929 0	12.321	11.089	12.800	15	0.088
2	YK225+313	$U=4.912\exp(-2.739/t)$	0.854 6	4.912	4.421	5.400	26	0.024
3	YK225+396	$U=30.062\exp(-4.741/t)$	0.964 1	30.062	27.056	28.340	45	0.074
4	YK225+421	$U=5.759\exp(-2.002/t)$	0.899 5	5.759	5.183	6.150	19	0.044
5	YK225+489	$U=5.567\exp(-1.686/t)$	0.918 0	5.567	5.010	5.730	16	0.056
6	YK225+519	$U=4.485\exp(-1.871/t)$	0.601 0	4.485	4.037	6.000	18	0.032
7	YK225+545	$U=9.446\exp(-3.055/t)$	0.845 8	9.446	8.501	11.170	29	0.040
8	YK225+575	$U=7.145\exp(-2.107/t)$	0.932 1	7.145	6.431	8.250	20	0.051
9	YK225+714	$U=16.118\exp(-4.109/t)$	0.934 2	7.185	6.467	7.125	17	0.066
10	YK225+739	$U=5.343\exp(-1.580/t)$	0.826 5	16.118	14.506	15.260	39	0.047
11	YK225+769	$U=10.948\exp(-3.477/t)$	0.907 9	10.948	9.853	11.810	33	0.039
12	YK225+795	$U=7.559\exp(-2.423/t)$	0.866 0	7.559	6.803	8.925	23	0.044
13	YK225+825	$U=7.837\exp(-2.634/t)$	0.913 9	7.837	7.053	8.375	25	0.040
14	YK225+890	$U=7.020\exp(-2.845/t)$	0.921 8	7.020	6.318	8.250	27	0.033
15	YK225+918	$U=15.133\exp(-3.161/t)$	0.942 9	15.133	13.620	14.500	30	0.061
16	YK225+943	$U=15.760\exp(-2.950/t)$	0.983 9	15.760	14.184	15.930	28	0.070
17	YK225+963	$U=15.917\exp(-3.688/t)$	0.855 2	15.917	14.325	13.150	35	0.053
18	YK225+989	$U=37.976\exp(-4.952/t)$	0.936 9	37.976	34.178	38.800	47	0.089
19	YK226+014	$U=13.529\exp(-4.004/t)$	0.990 5	13.529	12.176	15.38	38	0.041
20	YK226+044	$U=11.651\exp(-1.896/t)$	0.982 9	11.651	10.486	11.510	18	0.097
21	YK226+069	$U=17.477\exp(-2.318/t)$	0.927 0	17.477	15.729	16.530	22	0.108
22	YK226+097	$U=11.268\exp(-2.529/t)$	0.812 9	11.268	10.141	10.690	24	0.062
23	YK226+122	$U=2.478\exp(-2.456/t)$	0.424 6	2.478	2.230	4.185	10	0.188

从表1可见:V级围岩的29个拱顶下沉监测断面中,共有25个断面(约86.2%)的回归方程相关系数 $R^2$ 在0.8以上;仅有4个断面(约13.8%)的回归方程相关系数 $R^2$ 在0.8以下,拟合度不足,数学回归不相关。由表2可见:IV级围岩的23个拱顶下沉监测断面中共有21个断面(约91.3%)的回归方程相关系数 $R^2$ 在0.8以上;仅有2个断面(约8.7%)的回归方程相关系数 $R^2$ 在0.8以下,拟合度不足,数学回归不相关。可见本隧道的拱顶下沉监测数据基本符合指数函数。

根据《公路隧道施工技术规范 JTG F-2009》规定,围岩变形基本稳定应满足:各测试项目的位移速率明显收敛,围岩基本稳定;已产生的各项位移已达预计总位移量的80%~90%;周边位移速率小于0.1~0.2 mm/d,或拱顶下沉速率小于0.07~0.15 mm/d。故由回归方程解得各拱顶下沉监测点的预计最大位移值,并取其值的90%作为基本稳定变形

值,位移值达到此时对应的时间为围岩变形基本稳定时间,再从此时间向前推算7天,取这7天的位移速度平均值为基本稳定速度。具体计算结果同见表1、表2。

分析相关系数0.8以上的46个断面的监测数据得到以下结论:

1) 实测最大拱顶下沉值均达到回归分析所得计算最大值的90%以上,说明该隧道施工动态监测方案安全可靠,能有效确保施工安全,并为支护参数的优化提供理论依据。

2) 拱顶下沉各测点在监测工作完成时拱顶下沉速度均小于规范规定的围岩基本稳定速度0.15 mm/d,说明此时围岩已达到基本稳定,具备施作二次衬砌的条件。

### 3.2 围岩变形稳定时间的统计分析

对表1、表2中计算的V级和IV级围岩基本稳定时间进行分析统计发现,当围岩级别变差时,其变

形稳定时间会增加。且由于岩体材质不均,地质构造复杂多变导致即使是同级围岩,变形达到基本稳定所需的时间也不尽相同。通过绘制 V 级和 IV 级围岩拱顶下沉基本稳定时间频率直方图及概率分布曲线(见图 5,图 6),可以发现基本稳定时间的概率分布近似服从正态分布。

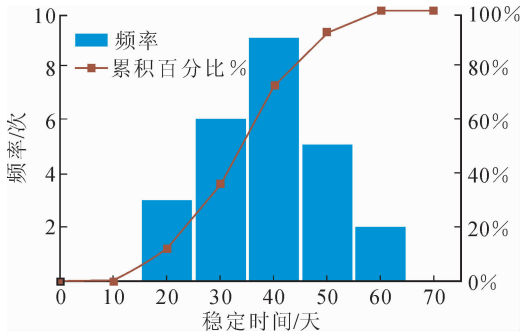


图 5 V 级围岩拱顶稳定时间频率分布直方图  
Fig. 5 Frequency distribution histogram of stabilization time for level V surrounding rock

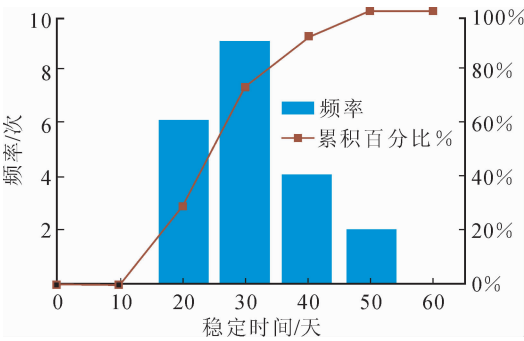


图 6 IV 级围岩拱顶稳定时间频率分布直方图  
Fig. 6 Frequency distribution histogram of stabilization time for level IV surrounding rock

运用 MATLAB 中的概率纸法进行检验,在正态分布概率图中可见所有的样本点都在实线附近,则稳定时间服从正态分布是合理的(见图 7、图 8)。采用 Jarque-Bera 命令进行正态分布拟合检验,结论为接受  $H_0$ : 总体服从正态分布。最终,确认 V 级和 IV 级围岩拱顶下沉稳定时间均服从正态分布。

运用 MATLAB 求得期望值和方差。可得 V 级围岩拱顶下沉稳定时间的正态分布的概率密度函数:  $f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ ,  $t \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 其中  $\mu = 34.52, \sigma = 10.82$ ; IV 级围岩拱顶下沉稳定时间的正态分布的概率密度函数:  $f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ ,  $t \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 其中  $\mu = 27.62, \sigma = 9.13$ 。

由正态分布密度函数可得 V、IV 级围岩稳定时间正态分布曲线,具体如图 9 所示。

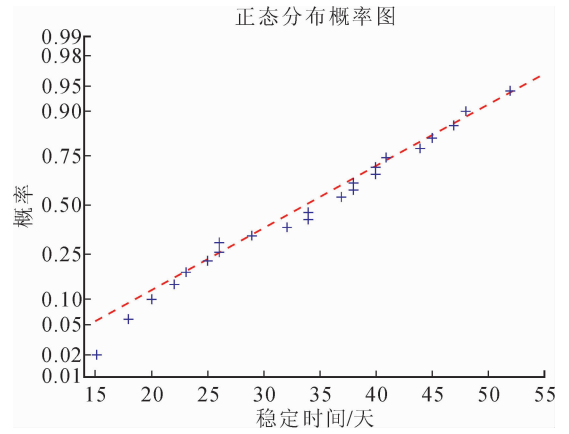


图 7 V 级围岩拱顶稳定时间概率纸检验图  
Fig. 7 Probability paper test stabilization time for level V surrounding rock

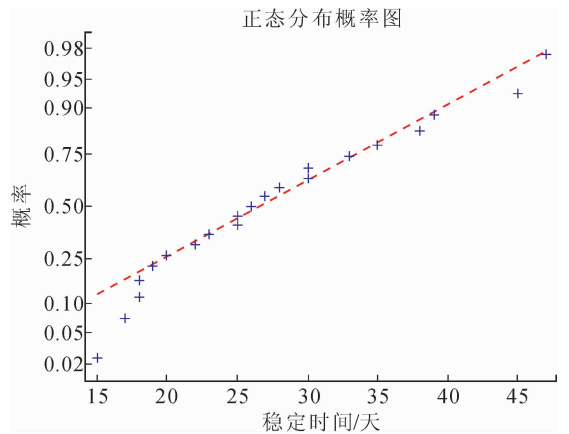


图 8 IV 级围岩拱顶稳定时间概率纸检验图  
Fig. 8 Probability paper test stabilization time for level IV surrounding rock

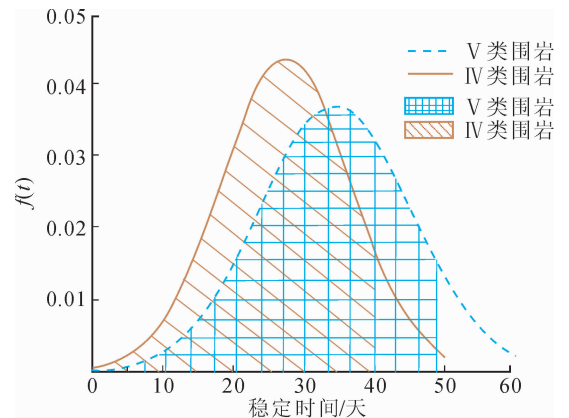


图 9 V 级、IV 级围岩拱顶稳定时间正态分布曲线  
Fig. 9 Stability time of normal distribution curve for level V and IV surrounding rock

由正态分布曲线可得分布函数:  $\phi(t) = \int_0^T \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt = P(t \leq T)$ ;  $P$  表示某个时间落在  $(-\infty, T]$  中的概率,也就是正态分布图阴影部分面积。

对于 V 级围岩,令  $\phi(t)=0.9$ ,可得  $t=49$ ,由此计算 V 级围岩稳定时间落在  $(-\infty, 49]$  中的概率是 90.66%,说明在第 49 天 V 级围岩中有 90% 的断面洞顶下沉达到基本稳定。

同理对于 IV 级围岩,令  $\phi(t)=0.9$ ,可得  $t=40$ ,由此计算 IV 级围岩稳定时间落在  $(-\infty, 40]$  中的概率是 91.31%,说明在第 40 天 IV 级围岩中有 90% 的断面洞顶下沉达到基本稳定。

由以上分析可得:

1) 本隧道 V 级围岩变形基本稳定时间为 49 天,IV 级围岩变形基本稳定时间为 40 天,且此时变形速率满足规范要求,具备施作二次衬砌的条件,这一结论与工程实际较为符合。

2) 在与类似工程的围岩基本稳定时间比较中发现,本隧道中 V 级围岩 49 天、IV 级围岩 40 天变形基本稳定属于时间较短的,这是由于本工程初期支护设计是偏安全考虑,支护参数较大的影响结果。说明支护力的增加,可有效加快围岩的稳定时间。

## 4 结 论

1) 建立了基于概率统计的隧道围岩稳定时间分析方法,首先对各级围岩的各个监测断面分别进行回归分析统计其累计变形值和基本稳定时间,再运用 MATLAB 软件分析各级围岩变形基本稳定时间的概率分布规律,最后根据所得的概率分布方程得出该级围岩的变形基本稳定时间。此方法将各级围岩的全部监测断面进行统计分析,所得规律更加全面可靠,同时直方图结合计算分析的方法既直观体现规律又确保了结果的准确性,在工程实践中有较强的适用性。

2) 针对单个断面,根据监测数据绘制的位移时态曲线可与规范提供的非线性回归方程较好的拟合,并在此基础上可求得各断面的基本稳定时间。

3) 对于同级围岩的多个断面,基本稳定时间因围岩岩性和地质构造的复杂多变而有所不同,但其分布频率符合正态分布,由此可较为可靠地推求各级围岩的基本稳定时间,并以此作为施作二次衬砌的依据。

在分析中还发现初期支护给予围岩的支护力大小,会明显影响围岩的基本稳定时间。施工中可结合围岩条件的变化动态优化支护参数,以达到安全、经济与节省工期的目的,这方面的内容还有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 郑颖人,朱合华,方正昌. 地下工程围岩稳定分析与设计理论 [M]. 北京:人民交通出版社,2012.

- [2] 李晓红. 隧道新奥法及其量测技术 [M]. 北京:科学出版社,2002.
- [3] 关宝树. 隧道工程施工要点集 [M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [4] 刘怀恒,熊顺成. 隧洞衬砌变形监控及安全预测 [J]. 岩石力学与工程学报,1990,9(2): 91-99.  
LIU Huaiheng, XIONG Shuncheng. Monitoring the deformation and forecasting the safety of tunnel lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1990, 9(2): 91-99.
- [5] 王胜涛,梁小勇,周亦涛. 隧道监控量测的数据回归分析探讨 [J]. 隧道建设,2009,29(6): 629-632.  
WANG Shengtao, LIANG Xiaoyong, ZHOU Yitao. Regression analysis on monitoring data of tunnel works [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(6): 629-632.
- [6] 赵勇. 隧道围岩动态变形规律及控制技术研究 [J]. 北京交通大学学报,2010,34(4): 1-5.  
ZHAO Yong. Study on dynamic deformation rules and control technology of surrounding rock for tunnel [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(4): 1-5.
- [7] 陈建勋,杨忠,袁雪勤. 秦岭终南山特长公路隧道大埋深段施工监测及分析 [J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(3): 71-75.  
CHEN Jianxun, YANG Zhong, YUAN Xuekan. Construction monitoring and measuring in segments of large embedded depth in Qinling Zhongnanshan super-long highway tunnel [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 71-75.
- [8] 陈建勋,王梦恕,轩俊杰,等. 两车道公路黄土隧道变形规律 [J]. 交通运输工程学报,2012,12(3): 9-18.  
CHEN Jianxun, WANG Mengshu, XUAN Junjie, et al. Deformation rule of loess highway tunnel with two lanes [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 9-18.
- [9] 叶飞,丁文其,朱合华,等. 公路隧道现场监控量测及信息反馈 [J]. 长安大学学报(自然科学版),2007,27(5): 79-83.  
YE Fei, DING Wenqi, ZHU Hehua, et al. Site monitoring and information feedback of highway tunnel [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27(5): 79-83.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道施工技术规范 JTG F-2009 [S]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [11] 刘学增,苏京伟,王晓彤. NATM 公路隧道围岩时间效应的统计分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1): 2662-2666.  
LIU Xuezeng, SU Jingwei, WANG Xiaoxing. Statistical analysis of time effects on surrounding rock of NATM highway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2662-2666.