

连山2号隧道复合式衬砌试验研究

铁道部第二勘测设计院 刘诚心

前言

为进一步推广光面爆破、喷锚支护的施工工艺,探讨和完善软岩隧道喷锚支护和复合式衬砌的支护理论,决定由铁二局科研所、第五工程处及铁二院科研所共同组成试验小组,在该软岩隧道进行光面爆破、大断面开挖、复合式衬砌及声波测试等项科学试验。

试验工作于1984年5月开始进点,同年9月底结束。由于进点前各项试验准备工作做得较全面、细致,在现场施工单位的配合和支持下,试验进行得比较顺利,取得了原型观测的大量数据,达到了预期的效果。在泥质粉砂岩中采用该项新工艺基本上成功。

本文着重介绍复合式衬砌在连山2号隧道中的初期量测及使用情况,并对资料进行初步分析,模筑衬砌于1984年9月完成,电测工作尚在进行之中,故本阶段总结未含这部分内容。

一、试验段概况

南防线连山2号隧道位于南宁市南郊丘陵地区。隧道全长533米,穿过泥质粉砂岩夹砾岩地层,泥质充填成岩程度极差,岩层多断裂和褶曲,层理近水平状,并有少量地下水,开挖面呈现潮湿,综合判定为Ⅱ类围岩。隧道最大埋深50余米,表层厚0.5~3米的砂粘土夹角砾,植被情况很好。

复合衬砌试验段设计长62米($D_1K31+392 \sim D_1K31+330$),位于4%的直线坡道上,该段地质条件为单一的泥质粉砂岩夹砾岩,洞内一般干燥无水,岩石的物理力学指标为:

弹性模量: $E = 1.1 \times 10^4$ 公斤/厘米²

泊桑比: $\mu = 0.3$

平均容重: $\gamma = 1.8$ 克重/厘米³

粘结力: $C = 0.15$ 公斤/厘米²

内摩擦角: $\varphi = 35^\circ$

该隧道原采用衬砌断面为叁标隧0012Ⅱ类围岩曲墙式衬砌,现全部试验段改为喷锚加模筑层的复合式衬砌断面。

支护参数的选择是根据试验段工程及水文地质、围岩类别及施工方法,参考按新奥法(NATM)修筑的隧道支护衬砌参数表及国内黄土隧道等进行工程类比设计。

锚喷: 200号混凝土10厘米(二次完成); 钢筋网环向主筋直径12毫米,纵向分布筋直径6毫米,网距25×25厘米; 锚杆直径22毫米、长2米,间隔1.0×1.0米梅花形布置。

模筑混凝土：拱部30厘米等厚，边墙顶部30厘米变截面至墙底，水沟以下为原断面尺寸。

详见复合衬砌断面图（图1）。

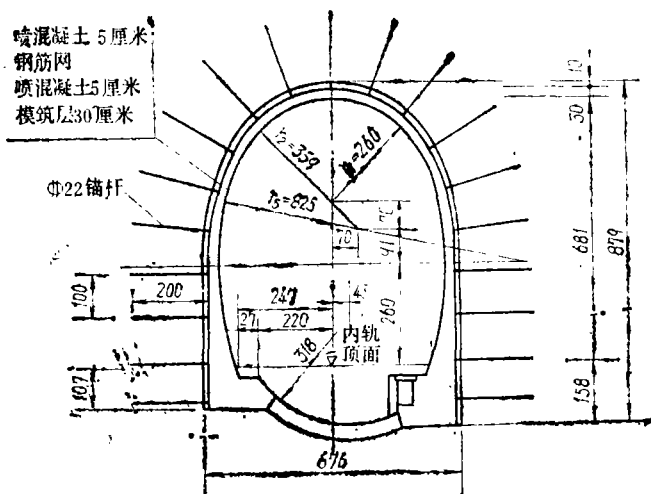


图1 复合式衬砌断面图

试验段内共设三个重点量测断面： $D_1K31+381$ 、 $D_1K31+341$ 为下沉、收敛量测断面， $D_1K31+362.5$ 为下沉、收敛、压力盒、单点位移计及应变计量测断面。

六十二米中 $D_1K31+392\sim+388$ 四米为试验过渡段（内层喷锚支护，外层为叁标隧0012Ⅱ类围岩曲墙式衬砌）， $D_1K31+388\sim+360$ 二十八米为本次试验的设计断面， $D_1K31+360\sim+330$ 三十米因发生坍方仍采用原设计衬砌断面。试验段布置见示意图（图2）。

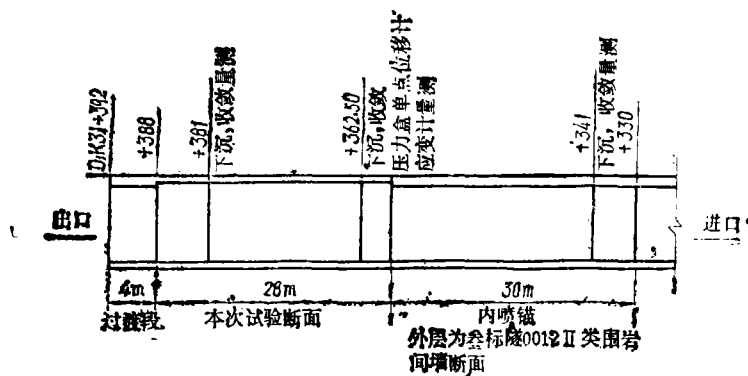


图2 试验段布置示意图

二、试验目的及试验内容

连山2号隧道的工程地质条件比我国试验过的铁路软弱围岩隧道条件显得更差，推广

“新奥法”技术更具有一定的研究试验代表性和实用性。

1. 试验目的

(1) 采用喷锚加模筑的复合式衬砌, 以进行工程实践, 验证其可靠性, 确定下一步推广使用。

(2) 在泥质粉砂岩夹砾石中进行全断面光爆, 为在该类围岩中改革修建技术, 实现大断面机械施工开创新的途径。

(3) 通过各项量测手段, 掌握该类围岩及结构的时间效应、变形特征, 为设计理论积累资料。

为实现以上目的, 并考虑时间、经费和量测条件等因素, 结合本隧道实际情况, 借鉴它隧道的试验经验, 采用了以量测位移为主的机械量测办法。并把重点放在初期支护阶段, 对模筑衬砌受力较大部位布置了双支电测元件, 保证长期观测质量和效果。

2. 试验内容

试验内容见表一, 测试断面元件布置见图3至图6。

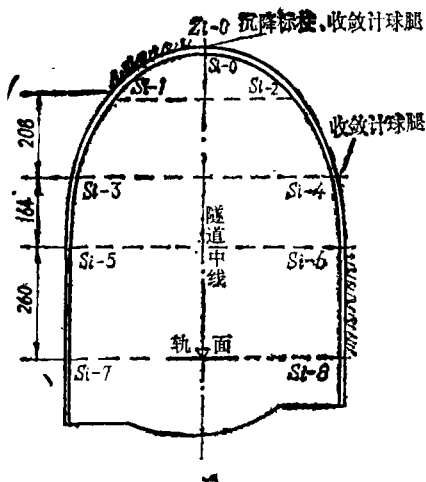


图3 顶部沉降、收敛量测布置

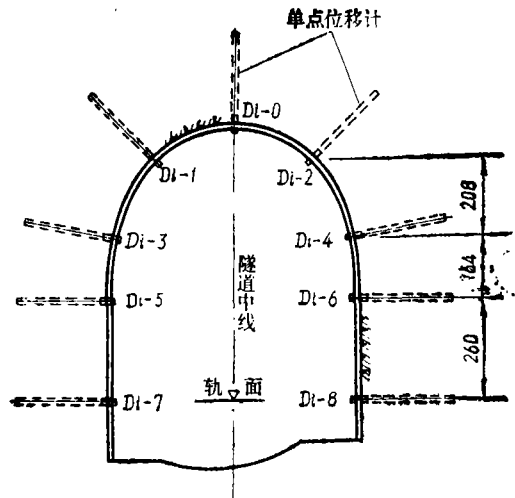


图4 径向位移量测布置

三、施工方法及施工情况

本段施工方法为正台阶、光面爆破、先喷锚后模筑, 模筑层为先墙后拱的方法, 并配合变形预报指导施工。施工设备除一台自制的简易模板台车和一台施工作业平台, 没有大型机械, 装碴运输用一般机械配合人力作业。施工方向由出口端向进口端独头掘进。施工程序按如下进行:

(1) 上部弧形断面开挖超前距离3米, 上下台阶同时钻眼爆破, 一次成型, 每次循环进尺约1.2米。

(2) 上下台阶进行初期支护: 初喷5厘米, 埋拱顶下沉桩、收敛桩及压力盒、单点位

移计后打锚杆，同时进行以上项目的量测。

测 试 工 作 一 览 表

表一

序号	量测项目	测试内容	使用仪器	接受仪器	埋设时间	观测次数	测试断面里程	备 注
1	洞内观察调查	地质情况、施工问题、洞径宏观变化	视力判断			2—1次/日	各断面及其临近	
2	拱顶下沉量测	抄平作业测出拱顶下沉量	拱顶预埋“下沉观测标桩”	精密水准仪、钢尺	喷完第一层将预埋桩埋好	待观测桩稳固后，立即观测，前十天每天二次（放炮后各一次），以后每天一次	+ 381.50 + 362.50 + 341.00	待模筑层灌注后停止
3	净空变位量测	测拱腰、拱脚、墙中、墙脚部位的水平基线长	SLJ-80型洞径收敛计 SWJ-78型隧道周边收敛计	大行程 0~30 mm 百分表 读数精度 0.01 mm	喷完第一层将预埋桩埋好	待观测桩稳固后，立即观测，前十天每天二次（放炮后各一次），以后每天一次	+ 381.50 + 362.50 + 341.00	待模筑层灌注后停止
4	围岩内部与周边相对位移量测	将单点位移计装入钻好的孔位中（孔位同净空变位量测位置），沿钻孔方向插百分表，测其读数	杆式单点位移计	大行程 0~30 mm 百分表 读数精度 0.01 mm	开挖或喷第一层完，钻孔埋单点位移计	待观测桩稳固后，立即观测，前十天每天二次（放炮后各一次），以后每天一次	+ 362.50	待模筑层灌注后停止
5	模筑衬砌内部轴向应变变量测	在模筑衬砌内沿周边安设混凝土应变计及无应力计，测其电阻及电阻比值	D-100型差动式电阻应变计 CJP型片式混凝土应变计 自制无应力计	水工比例电桥 静态电阻应变仪	灌注混凝土同时	埋后立即测，头24小时每小时观测，稳定后酌减	+ 362.50	长期观测项目
6	围岩与喷混凝土接触应力量测	初喷后，即埋设压力盒，测其频率读数	高磁电阻调频压力盒	袖珍数字频率计	喷完第一层将压力盒密贴在围岩上	灌注前开始读，灌注后头24小时每小时一次，稳定后酌减	+ 362.50	长期观测项目

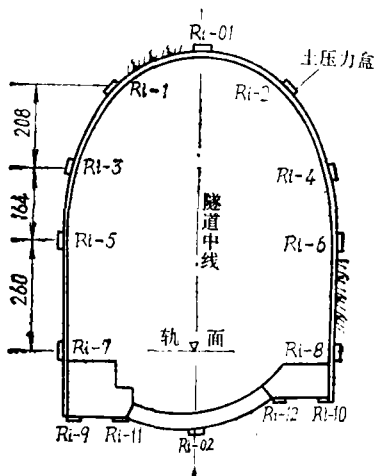


图 5 地压量测布置

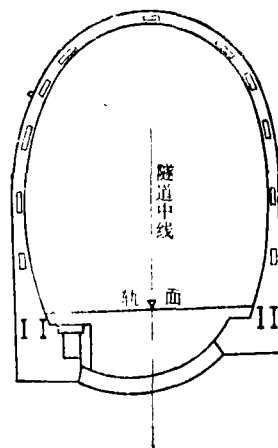


图 6 应变量测布置

(3) 墙底以上断面开挖喷锚后, 开挖并灌注墙基。

(4) 下台阶开挖5米后, 挂网4~5米, 再喷5厘米混凝土(图7)。

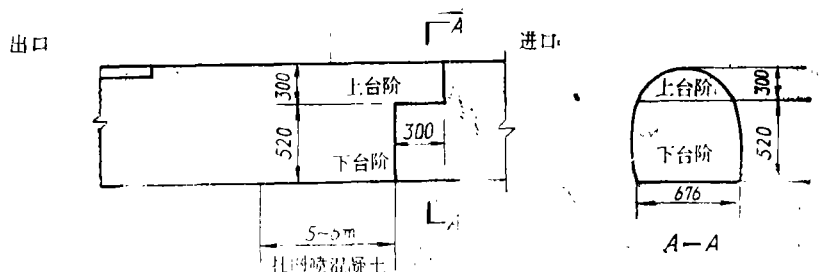


图7 施工程序示意图

(5) 待围岩基本稳定(由量测手段判定, 下沉日变形量小于0.23毫米)做模筑衬砌, 同时埋设应变计进行结构应变测量。

(6) 全段按1至5步工序完成后, 最后施作仰拱, 并在仰拱底埋设压力盒。原施工程序第3步为墙基和仰拱同时灌注, 后因洞径下沉及收敛变化不大, 又鉴于现场施工单位习惯于仰拱后做, 才改为以上施工程序。但必须指出, 这种作法对支护尽快封闭成形是不理想的。

试验段由于用喷锚支护代替了木支撑, 空间作业面开阔, 劳动条件亦得到了改善, 在严格执行施工程序的地段, 未发生坍方事故, 通过信息指导施工, 对施工安全和试验的顺利进行起到了保证作用。

在试验过程中, 我们发现该类围岩在干燥无水的情况下, 其自稳能力很强, 可达48小时。 $D_1K31+377\sim+388$ 一段, 喷5厘米混凝土后, 十四天才打锚杆, 喷层未发生开裂。但 $D_1K31+372\sim+377$ 左侧因临近放炮造成局部坍塌, 又如 $+330\sim+345$ 发生大坍方, 锚杆连同喷层整体坠落, 与洞顶、洞身渗水很有关系。为此, 我们对水的问题视为试验成败的关键, 除加强目测, 并考虑了各种补救的设计方案。

关于设计参数尺寸和喷、锚、网的匹配问题, 经现场实践检验是合理可行的。原担心锚杆二米长是否达到锚固作用, 后通过声波测试, 围岩的扰动范围在1.8米以内, 使用效果通过局部坍方现状及锚杆抗拔试验, 锚杆作用十分显著, 故未再加长。锚杆间距由 1.0×1.0 米调整为 1.2×1.2 米。其余尺寸未做变动。

模筑层在日变形小于0.23毫米的标准下灌注混凝土, 拆模后未见到任何裂缝。

四、围岩稳定性和支护效果的测试

1. 拱顶下沉量测:

拱顶下沉量测设在 $D_1K31+381.30$ 、 $+362.50$ 、 $+341$ 三个断面拱顶。在拱顶垂直打入下沉观测标点桩, 标点桩桩头有三角形挂钩, 量测时, 把钢钢尺挂在标点桩上, 下挂重砣, 待尺稳定后用精密水准仪进行抄平。下沉量测是在开挖后一天或下次放炮前开始读初读数。三个断面的拱顶下沉量实测曲线及回归分析如图8、图9所示。

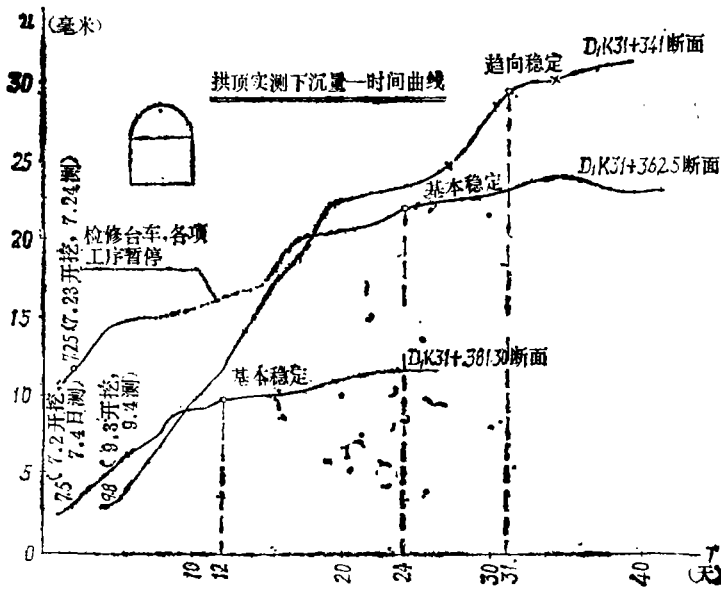


图 8

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	2.60	0.87	1	5.99	7.03	4	2.96	- 0.41
2	2.61	3.30	2	11.52	10.18	5	3.13	2.70
3	4.10	4.67	4	14.24	13.33	9	8.30	10.93
4	4.65	5.63	5	14.76	14.35	12	11.77	14.95
5	5.31	6.38	7	14.84	15.88	15	16.67	18.88
6	6.11	6.99	15	17.27	19.34	18	20.33	20.63
8	7.86	7.96	16	19.16	19.63	19	22.14	21.39
9	9.15	8.36	19	20.58	20.12	27	24.62	26.30
10	9.17	8.71	21	20.75	20.87	31	29.45	28.23
11	9.36	9.03	24	22.09	21.48	32	29.87	28.68
12	9.85	9.32	26	22.28	21.84	34	30.68	29.53
13	9.85	9.59	27	22.17	22.01	37	31.29	30.71
14	9.88	9.81	28	22.52	22.18			
15	10.15	10.07	29	22.66	22.34	$Z = A + BLNX$ $A = - 19.81 \quad B = 13.99$ $R = 0.97$		
17	10.45	10.49	30	22.84	22.49			
19	10.79	10.87	32	23.44	22.79			
20	11.18	11.01	35	23.91	23.19			
25	11.66	11.79	37	23.38	23.45			
$Z = A + BLNX$ $A = 0.97 \quad B = 3.35$ $R = 0.95$			38	23.13	23.57			
			39	22.87	23.68			
			40	23.35	23.80			
			$Z = A + BLNX$ $A = 7.03 \quad B = 1.54$ $R = 0.97$					

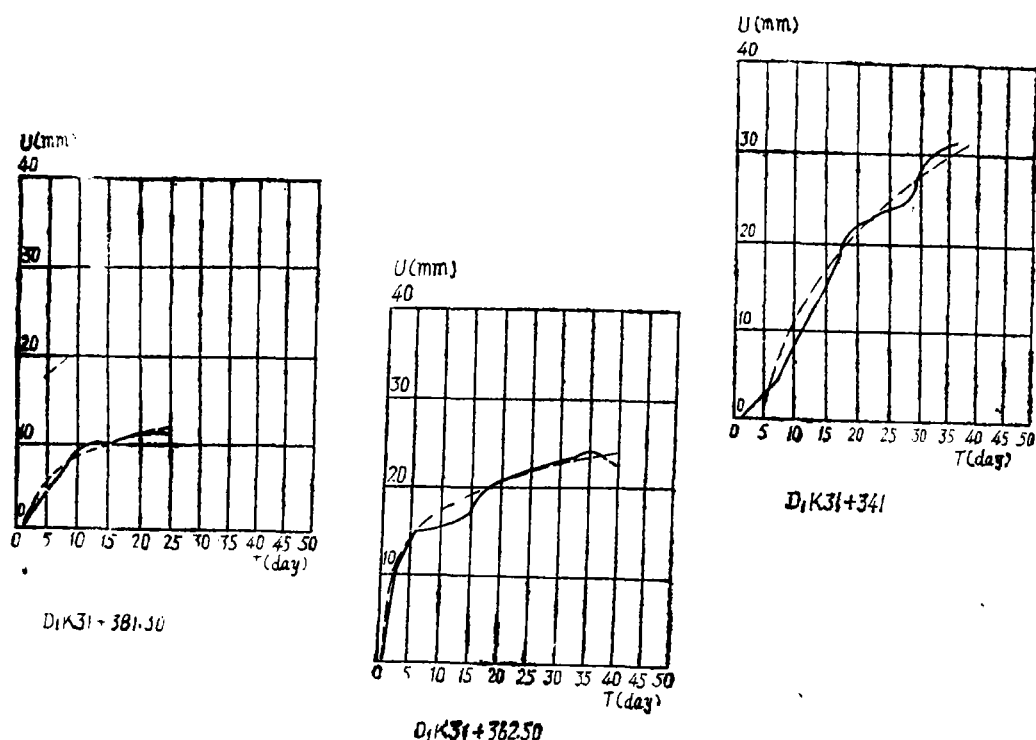


图9 下沉量回归分析图

注 1.实线为现场实测曲线,虚线为对数函数回归曲线;

2.X代表观测天数,Y代表实测下沉量值,Z代表回归计算的下沉量值。

通过量测资料分析及下沉量与时间变化曲线关系,可以看出以下情况:

(1) 拱顶下沉量在该类围岩中变化不大,最大下沉量为20~30毫米,+381.30断面拱顶25天下沉量为12毫米,+362.50断面40天下沉量23毫米,+341断面37天下沉量31毫米。一般开挖后15~20天就趋于稳定。

(2) 三个断面中, $D_1K31+341$ 断面拱顶日变形率及下沉总量较其它两断面大。

(3) 正常施工中,下沉量受爆破松动影响大,每次放炮前后,下沉值就有突变,空间效应不明显。

(4) 用对数函数、双曲线函数、指数函数三种方法回归,下沉变化规律为对数曲线函数为最理想。对数函数公式为: $Y = A + BLNX$ 。通过回归资料估算出+381.30和-362.50断面,下沉分别在16天、22天后基本稳定。+341断面因受坍方影响中断观测,资料不全,初步估算63天基本稳定(基本稳定标准日变形量0.23毫米)。

2. 洞径收敛量测

洞径收敛量测断面做了三个,分别在初喷5厘米之后,在每个量测断面的拱脚、拱腰、墙中及轨面四个部位安设埋置桩,用收敛计进行量测。为了加强关键部位的测试质量,在+362.50断面的拱腰和墙中同时用SLJ—80球铰式洞径收敛计和SWJ—78型隧道周边收敛计进行读数。

洞径收敛实测值统计表

表 2

断面 里程	拱 腰			拱 脚			墙 中			墙 脚		
	观测时间及 收敛值			观测时间及 收敛值			观测时间及 收敛值			观测时间及 收敛值		
	起至日期	间隔 天数 (天)	收敛值 (mm)	起至日期	间隔 天数 (天)	收敛值 (mm)	起至日期	间隔 天数 (天)	收敛值 (mm)	起至日期	间隔 天数 (天)	收敛值 (mm)
D ₁ K31+381.30	1984 24/6~10/7	17	36	1984 30/6~10/7	10	27	1984 1/7~10/7	10	49			
D ₁ K31+362.50	1984 26/7~13/9	49	*12	1984 9/8~2/9	24	9	1984 9/8~5/9	27	(33) 27	1984 9/8~5/9	27	(4) 9
D ₁ K31+341	1984 4/9~19/9	16	29	1984 18/9~6/10	20	29	1984 18/9~6/10	20	52	1984 17/9~6/10	19	58

1. 括号内数据是球铰SLJ-80洞径收敛计量测。
2. *该值由于埋设桩松动, 只做参考。

从表二的实测值看: 三个断面的净空均向洞内方向收敛, 其中以墙中、墙脚收敛较快。例如+362.5断面墙中27天收敛值27.38毫米, 平均每天为1毫米变形。而拱脚24天收敛值为8毫米, 平均每天为0.3毫米变形。+341断面墙中20天收敛值为52.87毫米, 而拱脚19天变形29毫米, 墙中变形相当拱脚的2倍。

+341断面各观测部位均较其余两断面大, 原因是该断面潮湿且受临近断面坍方的影响。+362.50断面收敛变形亦在二十天左右稳定。

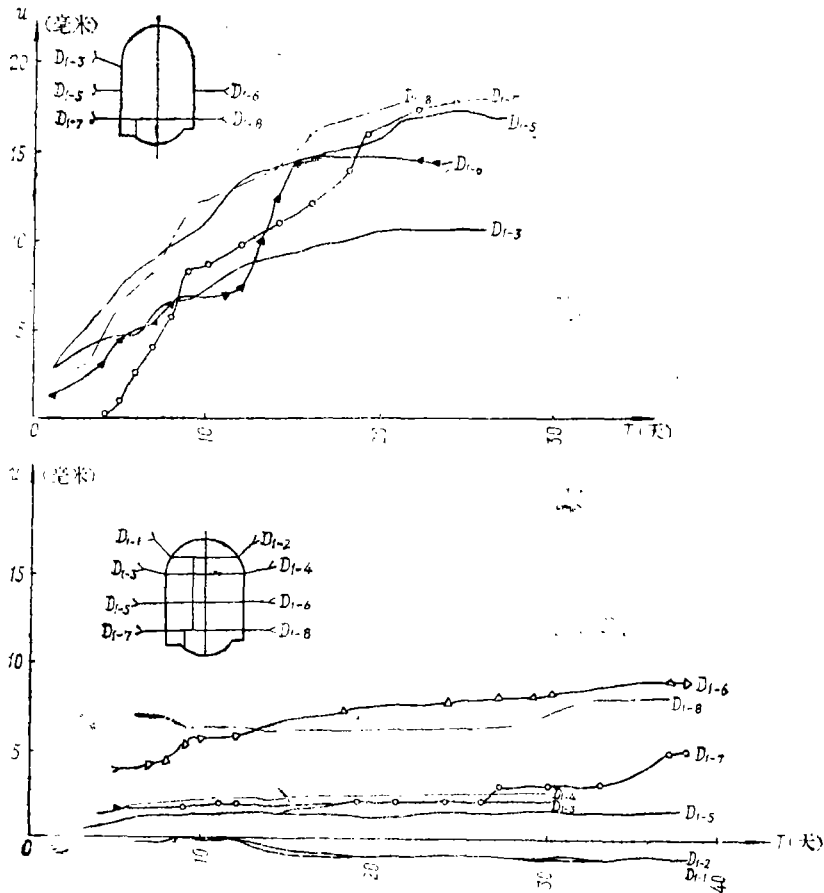


图 10

3. 围岩内部位移量测

为了了解洞径两侧各自变形情况,校核其变形规律与收敛量测是否一致;在围岩均质的情况下变形是否对称,我们在收敛量测的布点部位相应地埋设了单点杆式位移计,埋置深度为2.5米。

该单点位移计的锚头为空心带钩,加大了在软岩中的锚固力,使用率果较好。图10为+362.50、+341两断面单点位移计实测曲线。图11是以上两断面墙脚处单点位移计的回归曲线。

从曲线图的变化规律可看出:

(1) +341断面较+362.50断面各点测值大,变形速率大。两组曲线中,墙中和墙脚的位移曲线均在其它部位上方,这些规律与洞径收敛测出的规律一致。

(2) 从D1—7与D1—8两墙脚回归曲线上看,曲线形状及变化幅度基本相同,从其余各对应点的变化也相近,说明该隧道围岩均质变形也基本对称。

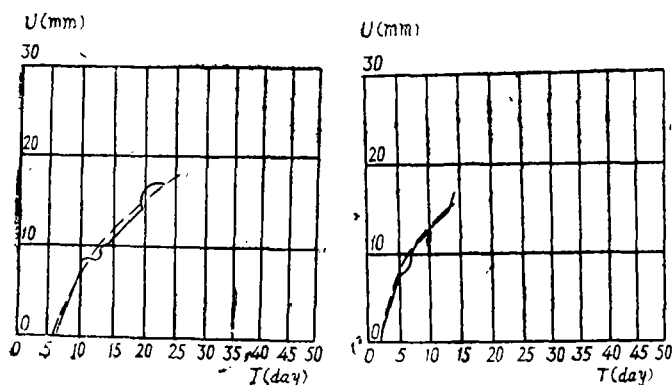
(3) 单点位移值与同部位的收敛测值比偏低,初步分析原因是否单点位移计锚固点有松动所致。

X	Y	Z	X	Y	Z
4	0.25	-1.21	1	2.76	0.40
5	0.43	1.11	2	3.02	4.40
6	2.90	3.02	3	6.27	6.74
7	4.11	4.63	4	7.67	8.39
8	5.84	6.03	5	8.25	9.68
9	8.48	7.26	6	10.11	10.72
10	8.67	8.35	7	11.89	11.62
11	8.34	9.35	8	12.35	12.39
12	9.02	10.26	9	12.96	13.07
14	10.55	11.88	10	13.31	13.67
15	11.43	12.60	11	13.69	14.22
18	13.75	14.50	12	14.96	14.72
19	16.22	15.07	13	16.32	15.19
21	16.87	16.11	14	17.24	15.61
22	16.70	16.60	$Z = A + BLNX$		
24	18.18	17.51	$A = 0.40 \quad B = 5.76$		
25	18.05	17.94	$R = 0.94$		
$Z = A + BLNX$					
$A = -15.70 \quad B = 10.45$					
$R = 0.98$					

通过拱顶下沉、净空变位及围岩内部相对位移等量测资料及其规律分析,初步得出以下结论:

(1) 泥质粉砂岩夹砾岩的地层,大断面开挖、喷锚支护的施工方法是可行的,支护参数是可靠的。

(2) 各种测量手段得出的资料基本吻合。该类围岩在正台阶、光面爆破、喷锚支护的施工条件下,洞顶的下沉量相对来讲变化大,洞径变形的规律是朝洞内方向收敛,在收敛过



$D_1 K31+341$ $D1-7$ 点回归曲线 $D_1 K31+341$ $D1-8$ 点回归曲线
图11 单点位移计位移变化曲线。

注 1. 实曲线是单点位移计的实测位移曲线, 虚曲线为对数函数回归曲线;
2. X 代表观测天数, Y 代表实测变位量值, Z 代表回归计算的位移量值。

程中, 以墙中、墙脚处变化较快。这说明土的侧压力大, 应先做仰拱使其断面闭合为好。

(3) 该类围岩的变形与颗粒级配、天然含水量及粘结力有关, 与开挖放炮振动及断面有无渗水有关, 与掌子面的掘进关系不明显。

(4) 根据变形发展及变形速率, 该类围岩一般在20天左右基本稳定。从开挖到模筑一个月的时间是合适的。

五、几点收获

连山2号隧道试验是在软弱围岩中进行新奥法施工的又一实践。它吸收和采用了既成软岩隧道复合式衬砌的试验和施工经验, 在松散的粉砂岩夹砾岩的地层中, 成功地由传统的上下导坑的施工方法改为大断面掘进, 用信息控制工程的施工方法。通过试验, 与传统方法相比, 不论其施工条件、支护效果、施工安全都较优越。同时为同类围岩中如何进行新的开掘工艺、支护和测试等方面都积累了资料和经验。

用信息控制施工是当前推行新奥法的关键。如何结合该隧道的地质、施工等具体条件搞好试验设计的可行性方案研究, 搞好施工监测, 提高测试技术和数据的利用率, 及时合理地支护, 使围岩自承能力充分得到发挥, 我们做了一些工作, 收到一定效益。

1. 为试验效果提供一个忠于新奥法原则又保证施工安全可行的设计方案

(1) 试验段总的布局图必须体现通过观测结果, 直接反馈到施工中去, 及时指导施工, 不盲目地为测量而增加断面元件布置和千篇一律地等距离设置。例如: 在试验段起点先布置必要的预测工作, 为下步施工提供参考。又如: 试验段开挖后围岩均质, 把选定的七个测试断面减少为三个, 并加强了一个电测元件埋设断面, 从目前量测效果对试验段的变化反映是敏感的。

(2) 试验段断面支护参数的拟定, 要在保证支护和衬砌长期安全度前提下, 使其具备柔性条件。

近年来, 通过软岩隧道的量测分析, 说明了支护形成闭合结构式衬砌完成以后, 虽然位

移已难以测知,但支护的切向应变仍有明显增加,所以,位移基本稳定后做了喷锚支护就万无一失的想法是不够慎重的。连山2号隧道根据土质隧道受力特点,选用拱部30厘米等厚,边墙为变截面模筑尺寸,从电测资料上看压力变化虽不很大,但是逐渐向增加的趋势变化。

(3) 测试元件的选择及埋设,应做到及时掌握山体开挖后变化,且直观可信。

2. 加强测试数据的质量管理

观测数据的质量管理是目前测试工作中一薄弱环节,也是一个急待解决的问题。在这次试验中除对原始读数、元件埋设质量严格把关外,针对如何扣除土压以外原因引起的应力问题进行了研究。并自行设计和制做了无应力计,与同类元件埋置在一起进行工作。这项工作现正在进行阶段,暂不做分析。

对收敛计的基线量测工作,借鉴利子依达和南岭隧道的经验,用拉斜基线求其拱顶下沉是不可行的,其原因是三角形水平边的两个端点有竖向位移,斜向收敛量测精度低,各三角形的顶点不在同一竖直面,计算结果造成拱顶上升……。连山2号隧道未做斜基线量测。

此外,为使采用元件符合土质隧道的要求,亦对元件进行了革新。如单点位移计的套筒由光面接触改为螺丝口的,锚头的凿子过去是实心的,为加大锚固力改为空心带倒钩砂夹石围岩中,因坍孔单点位移计周壁难与围岩为孔隙,加设塑料套管……等。

3. 关于设计断面的经济性

新奥法在本质上对山体是一种合理的施工方法,相应支护参数亦应是较经济的。该隧道原采用断面为叁标隧0012—16Ⅱ类围岩衬砌断面,新旧支护尺寸比较,圬工和土方均是节省的,特别是木材节省量较大。由于目前在施工中新工艺不过关,机具不配套,劳保防护措施未跟上,经济性不显突出。但相信其施工方法的优越性一定会受施工现场欢迎,为其带来一定的生命力。