

# 新奥法隧道渗漏析因及预防\*

蓝祥雨<sup>1</sup>, 向阳开<sup>1</sup>, 吴仕东<sup>2</sup>, 王涛<sup>3</sup>

(1. 重庆交通学院, 重庆 400074; 2. 重庆甲多公路设计咨询有限公司, 重庆 400039; 3. 贵州路桥总公司, 贵阳 550000)

**摘要:**在对新奥法隧道开展的渗漏情况调查的基础上,对具有典型渗漏的缙云山隧道和宋家沟一号隧道的渗漏原因进行了探讨,并运用概率断裂力学对由衬砌混凝土开裂导致的渗漏进行了分析,针对渗漏原因就此类隧道的防水提出了几点建议。

**关键词:**隧道; 渗漏; 断裂; 预防

**中图分类号:**U457+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)05-0061-07

## Reason and Precaution of Seepage in NATM Tunnel

LAN Xiang-yu<sup>1</sup>, XIANG Yang-kai<sup>1</sup>, WU Shi-dong<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>3</sup>

(1. Chongqing Institute of Communications, Chongqing 400074, P. R. China; 2. Chongqing Jiaduo Highway Design Consultation Co. Ltd., Chongqing 400039, P. R. China; 3. Guizhou General Co. of Roads and Bridges, Guiyang 550000, P. R. China)

**Abstract:** On the basis of investigation on seepage in the Jinyunshan Tunnel and the Songjiagou No. 1 Tunnel, the reasons of the seepage were analyzed and the cracking in concrete that led to seepage was studied by using the probability fracture mechanics. Finally, some suggestions of tunnel waterproofing were proposed.

**Keywords:** tunnel; seepage; cracking; precaution

随着公路等级的不断提高,山岭重丘地区的公路隧道也越来越多,由此出现的隧道渗漏问题也愈加明显。隧道的渗漏水可造成洞内通信、供电、照明等设备处于潮湿环境而发生锈蚀或短路,导致设备出现故障,使用寿命降低;此外,渗漏水将使路面面积水或结冰,造成车辆打滑,危及行车安全,并影响洞内美观。现今,渗漏已成为隧道的常见病害之一。本文在对新奥法隧道开展的渗漏情况调查的基础上,对具有典型渗漏情况的缙云山隧道和宋家沟一号隧道的渗漏原因进行了初步分析,并结合新奥法隧道的防水特点以及渗漏原因对其预防措施提出了几点建议。

### 1 防排水措施概况

位于成渝高速公路的缙云山隧道及宋家沟1号隧道,采用新奥法施工,隧道支护采用封闭复合式衬砌,在初期支护与二次衬砌间设置聚乙烯塑料板及无纺布(缙云山隧道实施中改为橡胶板及无纺布),并设置弹簧排水管,间距根据地下水情况定为10~30m。隧道内设双侧水沟及中心排水管,为方便维修及检查,侧水沟每隔一定距离设铁蔑入水口及沉淀池,中心排水管设检查井<sup>[1]</sup>。

### 2 渗漏情况

宋家沟一号隧道右洞洞内有30多处渗漏,缙云山隧道左洞洞内有100多处发生渗漏,其渗漏情况见图1。

\* 收稿日期:2005-06-15

作者简介:蓝祥雨(1980-),男,重庆人,硕士生,主要从事桥梁与隧道工程研究。

从调查的情况来看,衬砌渗漏最为严重的位置在洞门50 m范围内(宋家沟一号隧道的拱部、边墙均有大面积的渗水现象,局部衬砌开裂,裂缝处有股水涌出;缙云山隧道渗漏情况与宋家沟一号隧道类似,洞门附近的渗漏其程度及出现密度是整个隧道中最为严重的。)此外,伸缩缝、沉降缝及施工缝(以下统称为三缝)处发生渗漏的情况也颇为严重。

### 3 渗漏原因分析及其预防措施

根据调查的渗漏情况,针对复合式衬砌隧道的防水特点(主要措施是:设置夹层防水层、二次衬砌采用防水混凝土、三缝处设置止水带和遇水膨胀橡胶)进行分析,渗漏发生的原因主要有:隧道排水不畅、衬砌开裂、防水层有损伤、三缝处防水施工质量不易得到保证等,以下分别进行分析并提出一些预防措施的参考意见。

#### 3.1 隧道排水不畅及其预防措施建议

在调查中发现,缙云山隧道的地下水量比宋家沟1号隧道的地下水量大得多,然而其渗漏发生的密度及漏水量则没有宋家沟1号隧道严重,其中一个重要因素在于两个隧道排水效果的差异:在雨天,缙云山隧道边沟流量大约为 $900\text{ cm}^3/\text{s}$ ,由此可知其排水系统能及时地排走大量地下水,减少衬砌背后的地下水的汇集,从而有效地防止渗漏的发生;而宋家沟1号隧道从洞内边沟排水情况来看,地下水几乎没有从边沟排出,而是大量从隧道的衬砌裂缝、施工缝、伸缩缝及沉降缝等防水薄弱位置,甚至从洞门处的拱圈渗出见图2,从这些现象可以看出,隧道的排水系统被堵塞、不畅通,致使大量的地下水不能及时的排走,在衬砌背后汇集,对防水层和二次衬砌施加了很大的水压力,引发渗漏。

由此可见,确保隧道排水的畅通对隧道的整个防水系统有非常重要的意义,排水畅通能减轻防水层和二次衬砌背后的水压力,为此施工中要确保环向盲沟及纵向排水沟不被堵塞,运营期间要及时对堵塞的边沟进行疏通,以保证排水系统的通畅。

#### 3.2 衬砌开裂机理分析及其预防措施建议

在对缙云山隧道及宋家沟一号隧道的调查中,发现渗漏的一个共同点:隧道洞门处渗水尤为频繁、严重,并存在二次衬砌出现开裂现象,这在宋家沟一号隧道更为明显,由此可以推知,衬砌存在贯通的裂缝,从而为地下水的最终渗出提供了必要通道。

二次衬砌直接承受穿过防水层的地下水的水压力,一旦衬砌开裂,混凝土中存在贯通裂缝,地下水就会从这些裂纹处渗出。隧道的渗漏最终表现为地下水从衬砌表面渗出,只要二次衬砌不存在贯通裂缝,即使地下水透过防水层在衬砌背后汇集,隧道也不会出现渗漏现象,因此衬砌是隧道防水的最后一道也是最为关键的一道防线。为此,特根据概率断裂力学理论,对二次衬砌的开裂、渗水进行分析。

断裂力学理论认为,一旦结构出现裂纹,则裂纹尖端将出现巨大的应力集中,即出现应力的奇异性,带裂纹结构的强度将远远低于相应无裂纹结构的强度。衬砌混凝土由于自身的材料特性,混凝土中存在着一些微裂纹;并且由于衬砌施工的先后原因,无论是先墙后拱还是先拱后墙,由于混凝土施工时间有先有后,在拱顶与边墙、边墙与仰拱的施工接缝处两侧的混凝土体积的塑性收缩会不一致,微裂纹会更多更密集。

瞬时状态下,除裂纹尖端的局部微小邻域外,混凝土是一种脆性材料,直到其破坏它的应力一应变基本上是线弹性的,因此不妨采用线弹性断裂力学来对混凝土开裂情况进行分析。每种混凝土材料存

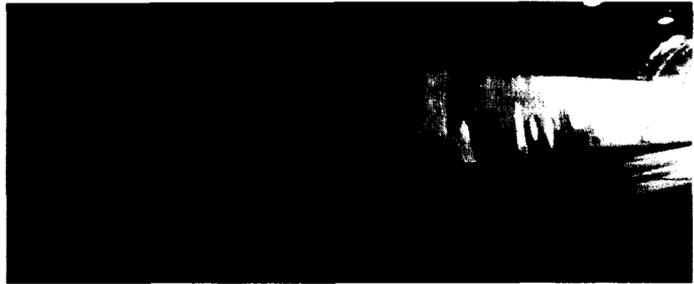


图1 渗漏概况

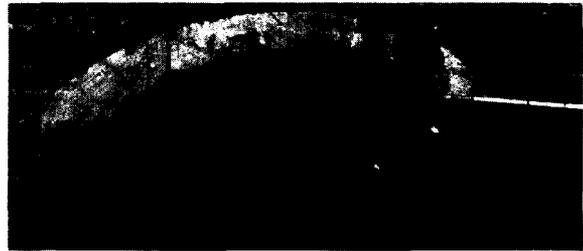


图2 地下水从拱圈渗出

在一个固有的临界应力强度因子  $K_{Ic}$  值,由于混凝土材料所具有的随机统计特性,这个  $K_{Ic}$  的值受尺寸因素的影响而出现有规律的变化,根据研究其变化规律可用脆性破坏的断裂统计来描述。据文献 2 表明,测定的小尺寸混凝土试件的断裂韧度  $K_{Ic}$  的观测值符合 Weibull 分布,其分布函数  $F(k)$ , 密度函数  $f(k)$ , 数学期望  $E(K)$  分别为:

$$F(k) = P_f(K < k) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{k-k_0}{k_u}\right)^a\right] & k \geq k_0 \\ 0 & k < k_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(k) = \begin{cases} \frac{a}{k_u} \left(\frac{k-k_0}{k_u}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{k-k_0}{k_u}\right)^a\right] & k \geq k_0 \\ 0 & k < k_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E(K) = \int_{-\infty}^{\infty} kf(k) dk = \int_{-\infty}^{\infty} k \frac{a}{k_u} \left(\frac{k-k_0}{k_u}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{k-k_0}{k_u}\right)^a\right] dk = k_u \Gamma\left(1 + \frac{1}{a}\right) + k_0 \quad (3)$$

式中:  $a$  为形状参数,  $a = \pi / (\sqrt{6.5} C_v)$ , ( $0.013 \leq C_v \leq 0.23$ ), 在材料试验中它是与试验条件、材料脆性有关的一个参数,在标准常规试验条件下,  $a$  值反映材料脆性的大小,  $a$  越小,材料的脆性越显著,在标准试验条件下混凝土的  $a$  值为  $10 \pm 3$ ;  $k_u$  为尺度参数,  $k_u = E(K) / \Gamma(1 + 1/a)$ ;  $k_0$  为  $K_{Ic}$  的最小值,由于脆性材料的断裂韧度  $K_{Ic}$  观测值的离散性比较大,所以一般近似地取  $k_0 = 0$ 。

对于紧凑拉伸试件见图 3,其应力强度因子由下式(4)<sup>[3]</sup>计算:

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \beta\left(\frac{\alpha}{W}\right) = \sigma W^{1/2} \beta\left(\frac{\alpha}{W}\right) \quad (4)$$

其中,  $P$  为荷载

$$\beta\left(\frac{\alpha}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{\alpha}{W}\right) \left(0.886 + 4.64 \frac{\alpha}{W} - 13.32 \frac{\alpha^2}{W^2} + 14.72 \frac{\alpha^3}{W^3} - 5.6 \frac{\alpha^4}{W^4}\right)}{\left(1 - \frac{\alpha}{W}\right)^{3/2}} \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  为净截面名义应力;  $\beta\left(\frac{\alpha}{W}\right)$  为几何因子,与相对缝深有关;  $W$  为截面高度。当相对缝深  $\frac{\alpha}{W}$  给定之后,断裂韧度  $K_{Ic}$  随净截面名义应力临界值  $\sigma_c$  与截面高度  $W$  而变化。 $W$ 、 $\alpha$  一般由试件的预制尺寸确定。用  $\bar{\sigma}_c$  表示一组同一尺寸试件脆断时的净截面名义应力临界值的平均值,则该组试件断裂韧度的平均值  $\bar{K}_{Ic}$  为:

$$\bar{K}_{Ic} = \bar{\sigma}_c W^{1/2} \beta\left(\frac{\alpha}{W}\right) \quad (6)$$

把小尺寸测得的  $\sigma_c$ ,  $K_{Ic}$  的数学期望值记为  $E_s(\sigma_c)$ ,  $E_s(K)$ , 大尺寸试件相应参数记为  $E(\sigma_c)$ ,  $E(K)$ 。当它们的相对  $\frac{\alpha}{W}$  相同时,则两种不同尺寸的试件测得的断裂韧度  $K_{Ic}$  的数学期望值有以下关系:

$$\frac{E(K)}{E_s(K)} = \left[ \frac{E(\sigma_c)}{E_s(\sigma_c)} \right] \left( \frac{W}{W_s} \right)^{1/2} \quad (7)$$

并由 Weibull 脆性破坏统计理论可知:

$$\frac{E(\sigma_c)}{E_s(\sigma_c)} = \left( \frac{V_{*s}}{V_*} \right)^{1/a} \quad (8)$$

式中,  $V_* = \int_{\sigma>0} [f(x, y, z)]^a d_x d_y d_z$  为试件的转换体积,  $f(x, y, z)$  为应力的无量纲坐标函数。当  $\frac{\alpha}{W}$  相同(并

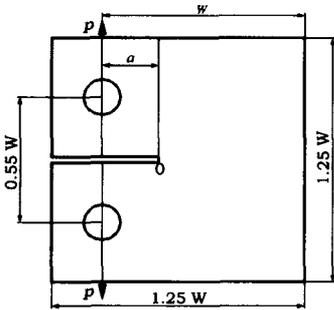


图3 紧凑拉伸试件

注意到形状参数  $a$  为常数), 经推导可知, 对两种不同尺寸的紧凑拉伸试件有:  $\frac{V_s^{*s}}{V_*} = \frac{V_s}{V}$ 。这里  $V_s, V$  为试件的体积, 下标  $s$  表示小尺寸试件, 无下标  $s$  的则为大尺寸试件。因此式(7)可写为:

$$E(K) = E_s(K) \left( \frac{W}{W_s} \right)^{1/2} \left( \frac{V_s}{V} \right)^{1/a} \quad (W \leq 2 \text{ m}) \quad (9)$$

对于三点弯曲试件, 也可得到式(9)。由式(7)、(8)可知混凝土  $K_{1C}$  的尺寸效应不仅与试件尺寸有关, 而且与试件的应力场有关。由于应力场类同, 同类型构件的尺寸效应可看成仅与构件体积成比例。式(9)只限于在试件高度  $W \leq 2 \text{ m}$  的范围内应用, 当  $W > 2 \text{ m}$  时, 取  $W = 2 \text{ m}$  的换算结果。

表1所列数据为标号为C25, 尺寸  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 515 \text{ mm}$  的混凝土的三点弯曲切口梁试件断裂韧度  $K_{1C}$  的试验值。

表1 C25号混凝土  $K_{1C}$  试验观测数据 ( $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ )

序号 $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_{1C}$	0.284	0.311	0.328	0.341	0.358	0.362	0.365	0.365	0.375	0.375	0.375	0.375
序号 $i$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$K_{1C}$	0.376	0.376	0.389	0.406	0.412	0.414	0.417	0.418	0.425	0.426	0.426	0.428
序号 $i$	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$K_{1C}$	0.436	0.440	0.443	0.443	0.445	0.449	0.450	0.453	0.456	0.456	0.460	0.468
序号 $i$	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
$K_{1C}$	0.468	0.473	0.476	0.477	0.479	0.480	0.482	0.482	0.487	0.488	0.489	0.491
序号 $i$	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$K_{1C}$	0.494	0.498	0.500	0.505	0.505	0.505	0.508	0.510	0.518	0.520	0.522	0.524
序号 $i$	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
$K_{1C}$	0.526	0.527	0.529	0.532	0.536	0.547	0.549	0.550	0.552	0.565	0.567	

由上表数据可知:  $K_{1C}$  观测值的数学期望  $E_s(K)$  的无偏估计值为  $0.456 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ , 方差  $D(K)$  的无偏估计值为  $0.065^2 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ , 变异系数  $C_v$  为  $0.144$ , 形状参数  $a$  为  $8.56$ , 尺度参数  $k_u$  为  $0.483 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ , 并取位置参数  $k_0 = 0$ , 则混凝土标号为C25的小试件断裂韧度服从的分布为:

$$F(k) = P_f(K < k) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{k}{0.483}\right)^{8.56}\right] & k \geq 0 \\ 0 & k < 0 \end{cases} \quad (10)$$

取隧道衬砌尺寸为  $0.3 \times 1 \times 5 \text{ m}$ , 则由尺寸效应公式(9)换算得隧道衬砌混凝土的  $K_{1C}$  的数学期望值  $E(K)$ :

$$\begin{aligned} E(K) &= E_s(K) \left( \frac{W}{W_s} \right)^{1/2} \left( \frac{V_s}{V} \right)^{1/a} \\ &= 0.456 (0.3/0.1)^{1/2} [(0.1 \times 0.1 \times 0.515)/(0.3 \times 1 \times 5)]^{1/8.56} \\ &= 0.407 \end{aligned}$$

求得  $k_u = 0.407/\Gamma(1 + 1/8.56) = 0.431$  于是推得该隧道衬砌混凝土断裂韧度服从的分布为:

$$F(k) = P_f(K < k) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{k}{0.431}\right)^{8.56}\right] & k \geq 0 \\ 0 & k < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$k$  为  $0.456 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$  时, 裂纹失稳扩展的概率为  $81.83\%$

$k$  为  $0.490 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$  时, 裂纹失稳扩展的概率为  $95\%$

众所周知, 新奥法施工的隧道衬砌受到弹塑性膨胀地压、自重压力、静水压力形成的侧压力作用, 对直墙式衬砌其受力图式见图4。

边墙中任一距边墙顶为  $x$  的截面内力由下式计算:

$$M = -u_c \frac{k}{2\alpha^2} \varphi_3 + \beta_c \frac{k}{4\alpha^3} \varphi_4 + M_c \varphi_1 + H_c \frac{1}{2\alpha} \varphi_2 \quad (12)$$

$$H = -u_c \frac{k}{2\alpha} \varphi_2 + \beta_c \frac{k}{2\alpha^2} \varphi_3 - M_c \alpha \varphi_4 + H_c \varphi_1$$

$M_c, H_c, \beta_c, u_c$  为初参数,可由初参数方程求得,具体见文献[4]。

此时衬砌边墙主要受弯矩和水平力,衬砌可看作具有单边裂纹的有限板受纯弯曲作用,其应力强度因子  $k_1$  由式(13)<sup>[5]</sup>计算:

$$k_1 = \sigma_b \sqrt{\pi a} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[ 1.99 - 2.47 \left( \frac{\alpha}{W} \right) + 12.97 \left( \frac{\alpha}{W} \right)^2 - 32.17 \left( \frac{\alpha}{W} \right)^3 + 24.80 \left( \frac{\alpha}{W} \right)^4 \right] \quad (13)$$

式中  $\sigma_b$  是无裂纹的上述平板在裂纹位置截面上的最大弯曲应力。

如果认为裂纹失稳扩展的概率达到 95% 时即  $k_1 = 0.490 \text{ MN/m}^{3/2}$  时,裂纹必然扩展,则此时所需的拉应力  $\sigma_b$  为:

当  $a = 10 \text{ cm}, W = 30 \text{ cm}$  时  $k_1 = 0.545\sigma_b, \sigma_b = 0.899 \text{ MPa}$

当  $a = 5 \text{ cm}, W = 30 \text{ cm}$  时  $k_1 = 0.404\sigma_b, \sigma_b = 1.213 \text{ MPa}$

当  $a = 1 \text{ cm}, W = 30 \text{ cm}$  时  $k_1 = 0.192\sigma_b, \sigma_b = 2.550 \text{ MPa}$

从文献[6]中郭村隧道的衬砌内力分布图 5 中,可知衬砌在围岩等应力作用下所受最大拉应力为 1.67 MPa,根据前述分析,衬砌在此应力作用下容易出现裂缝,根据文献 6 的调查,郭村隧道衬砌有裂缝出现。

此外,隧道衬砌混凝土的干缩、热胀冷缩受到衬砌外侧围岩阻碍,导致二次衬砌发生不均匀膨胀或收缩,在衬砌内部产生温度应力,隧道衬砌的温度应力计算简图见图 6。

温度应力由式(14)<sup>[7]</sup>计算:

$$\sigma_x = -E\alpha T \left( 1 - \frac{\cosh \beta x}{\cosh \beta \frac{L}{2}} \right) H(t) \quad (14)$$

对直墙拱形隧道有:  $\beta = \sqrt{\frac{C_x}{Et}}$

式中:  $T$  为温差;  $\alpha$  为线膨胀系数;  $L$  为隧道长度或变形缝间距,  $t$  为衬砌厚度;  $H(t)$  一般取 0.3 ~ 0.5。

在  $x = 0$ , 即变形缝间距中线处有最大应力:

$$\sigma_x = -E\alpha T \left( 1 - \frac{1}{\cosh \beta \frac{L}{2}} \right) H(t) \quad (15)$$

衬砌混凝土弹性模量  $E = 2.98 \times 10^4 \text{ MPa}$

温度线膨胀系数  $\alpha = 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

地基水平阻力系数  $C_x = 1.4 \text{ MPa/mm}$

当取环境温差  $T = -20^\circ\text{C}$ , 温度应力为 1.20 ~ 2.01 MPa(拉)

在温度应力作用下,衬砌可看作具有单边裂纹的有限板受均匀拉伸,其应力强度因子  $k_1$  由式(16)<sup>[5]</sup>计算:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\alpha} \left[ 1.99 - 0.41 \left( \frac{\alpha}{W} \right) + 18.7 \left( \frac{\alpha}{W} \right)^2 - 38.48 \left( \frac{\alpha}{W} \right)^3 + 53.85 \left( \frac{\alpha}{W} \right)^4 \right] \quad (16)$$

如果认为裂纹失稳扩展的概率达到 95% 时即  $k_1 = 0.490 \text{ MN/m}^{3/2}$  时,裂纹必然扩展,则此时所需的

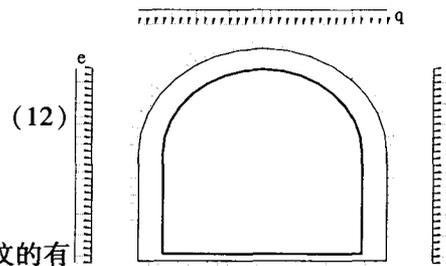


图4 直墙式衬砌其受力图式

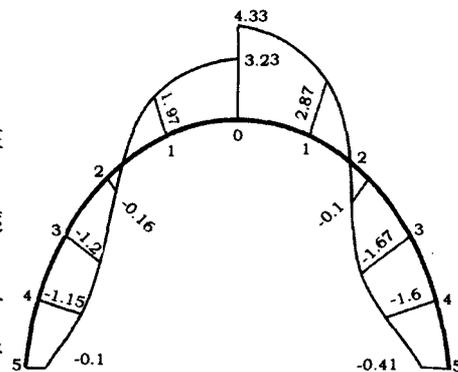


图5 郭村隧道的衬砌内力分布/MPa

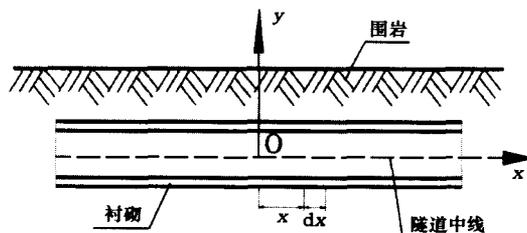


图6 隧道衬砌的温度应力计算简图

拉应力  $\sigma$  为:

当  $a = 10 \text{ cm}$ ,  $W = 30 \text{ cm}$  时  $k_1 = 1.0027\sigma$ ,  $\sigma = 0.489 \text{ MPa}$

当  $a = 5 \text{ cm}$ ,  $W = 30 \text{ cm}$  时  $k_1 = 0.53767\sigma$ ,  $\sigma = 0.911 \text{ MPa}$

当  $a = 1 \text{ cm}$ ,  $W = 30 \text{ cm}$  时  $k_1 = 0.19971\sigma$ ,  $\sigma = 2.453 \text{ MPa}$

从以上分析可知,环境温差  $T = -20^\circ\text{C}$  时衬砌会产生  $1.20 \sim 2.01 \text{ MPa}$  的拉应力,  $20^\circ\text{C}$  的温差在重庆地区是很容易达到的,再计入混凝土水化热,以及混凝土自身的收缩后衬砌的拉应力会更大,因此衬砌在温度应力作用下产生裂缝的概率会很大。

传统强度理论判断结构是否破坏是基于结构中的应力是否超过相应材料的允许应力,素混凝土受拉破坏时的应力一般在  $3 \text{ MPa}$  左右。从上述分析可以看出,当衬砌混凝土中存在的裂纹时,衬砌在弹性膨胀地压、自重压力、静水压力形成的侧压力以及温度应力作用下开裂的概率很大。当裂纹深度达到衬砌厚度的  $1/3$  时,只需要  $0.489 \text{ MPa}$  的拉应力(远低于传统强度理论的  $3 \text{ MPa}$ ) 裂纹就会失稳扩展以致贯通整个衬砌厚度,为地下水的最终渗出提供了必要通道;即使裂纹深度只有衬砌厚度的  $1/30$ ,此时裂纹失稳扩展所需的拉应力也只有  $2.453 \text{ MPa}$ ,也比传统强度理论的  $3 \text{ MPa}$  低了  $18.2\%$ 。并且这里所取的衬砌尺寸只为  $0.3 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ,如果所取尺寸加大,由于尺寸效应裂纹失稳扩展所需的拉应力会进一步减小。

根据前面的分析,衬砌在侧压力以及温度应力作用下裂纹失稳扩展的概率很大,导致隧道洞门处容易出现贯通裂缝,发生渗水现象。在实地调查中发现,隧道洞门附近渗漏严重,并且在宋家沟一号隧道右洞的洞门处更发现一条宽约  $1.5 \text{ mm}$  的肉眼可见裂缝,见图7。

二次衬砌混凝土有贯通的裂缝是渗漏发生的必要条件之一。如果衬砌混凝土中的微裂纹较少并且分散,混凝土有较好的抗裂能力的话则能有效地阻止裂缝的扩展和贯通,从而减少地下水的渗漏。由断裂力学知识及纤维混凝土的相关研究<sup>[8,9]</sup>可知,在混凝土中纤维的存在能将裂缝分散、分细并能有效地阻止裂缝的扩展,从而提高混凝土的抗裂能力,减少混凝土的漏水量,因此使用钢纤维混凝土及柔性纤维混凝土是衬砌抗裂的一个有效方法。

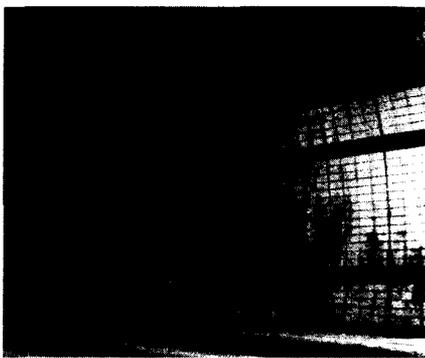


图7 洞门处裂缝

### 3.3 防水层损伤原因分析及其预防措施建议

缙云山隧道和宋家沟1号隧道出现的严重渗漏情况,另一重要原因在于防水层受到了损伤(通常不可避免):在防水层有破损的情况下,地下水在较小的压力下就能穿过防水层向衬砌防水的薄弱环节汇集,以至于出现如图1所示的严重的渗漏。从隧道防水层的施工工艺及其受力情况来看,损伤主要来自两个方面:

1) 从其防水层的施工来看,二次衬砌混凝土施工时,绑扎钢筋或震捣混凝土不可避免地会造成防水板的局部破损,而这些损伤可能未被发现或发现后修补不当。

2) 隧道建成后围岩的应力与位移会逐渐调整,由于二次衬砌为人工结构,其整体性较好并且变形相对围岩较小,因此喷射混凝土与二次衬砌间会出现变形不协调,在局部,喷射混凝土会对二次衬砌施加极大的压力。此外,受温度变化的影响,二次衬砌会发生纵向收缩,并且在围岩应力重分布的作用下,喷射混凝土与二次衬砌之间会出现相对的错动,这些错动使防水层承受较大的剪应力。由于喷射混凝土表面十分粗糙,有的地方甚至会出现“葡萄状”结块,防水层在压剪情况下很容易被硌破,并使施工时防水层已受的损伤进一步加大。

防水层是新奥法隧道的主要防水措施之一,防水层的完好程度与隧道的渗漏有着密切关系。因此,首先,在做防水层施工之前应凿除喷射混凝土表面的“葡萄状”结块,割除基面钢筋、管件等尖锐突出物,并在割除部位用砂浆抹成圆曲面,填补基面明显的坑洼,最好在喷射混凝土表面增加一道喷射砂浆

或抹一层砂浆罩面,使防水层铺设基面尽量平整光滑,以减少防水层的受损机会;其次,在防水层铺设好后应认真检查并及时进行修补、保护。

### 3.4 三缝渗漏原因分析及其预防措施建议

缙云山隧道和宋家沟一号隧道发生的渗漏很大一部分位于三缝处,从三缝所用防水材料及其施工工艺来看,其渗漏原因主要有:一方面,在做三缝防水时,止水的接茬部位也不易紧密结合,而将止水带接茬置于拱顶的做法,不利于使水流尽快顺畅通过接茬,这些使止水带接茬处防水能力很差。另一方面,在衬砌基础以上,穿过防水层的渗水通常向三缝汇集,三缝虽然有一定的宽度和排水能力,但排水能力往往比较小,尤其是在夏季,衬砌发生膨胀,三缝的宽度变小,其排水能力更弱,造成止水带外侧水压增高。

根据上述分析,要有效防止三缝渗漏,可采取以下措施:在三缝防水施工时,应对止水带接头打磨整形并可靠胶合;将接茬处置于隧道的边墙或拱脚上下排水坡度较大处,使水流尽快顺畅通过接茬。

## 4 结语

隧道的防水是一个系统的工程,它与工程的地质条件及水文条件密切相关。要有效的防止渗漏现象的发生,首先应保证隧道排水畅通,尽量排出衬砌背后的地下水;其次,在选材上应根据衬砌的受力及地下水的分布情况选择适当的防水层材料及抗渗混凝土(例如纤维混凝土能提高混凝土的抗裂能力,减少混凝土的渗漏),做到即能有效的防渗又经济;此外,在做防水施工时要严格把关,做好止水带的接茬,尽量使防水层基面平整光滑,认真检查防水板的损伤情况并及时修补,以防患于未然。

## 参考文献:

- [1] 莫文卿. 成渝高速公路中梁山隧道和缙云山隧道的设计[J]. 世界隧道, 1999, (5): 13 - 18.
- [2] 徐世焯. 混凝土断裂韧度的概率统计分析[J]. 水利学报, 1984, (10): 25 - 31.
- [3] H. L. Ewalds, R. J. H. Wanhill. 断裂力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1988.
- [4] 覃仁辉, 王成. 隧道工程[M]. 重庆:重庆大学出版社, 乌鲁木齐:新疆大学出版社, 2001.
- [5] 尹双增. 断裂·损伤理论及应用[J]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [6] 刘宝有. 隧道衬砌应力的量测[J]. 铁道建筑, 1990, (7): 26 - 29.
- [7] 蒲春平, 夏才初. 隧道的温度应力及由其引起的裂缝开展规律的研究[J]. 中国公路学报, 2000, (2): 76 - 79.
- [8] 周明耀, 扬鼎宜, 汪洋. 合成纤维混凝土材料的发展与应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2003, (4): 1 - 4.
- [9] 苏晓薇, 刘丽英. 聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 吉林水利, 2002, (3): 15 - 17.