

公路隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究

叶 飞^{1,2} 何 川¹ 夏永旭²

(1 西南交通大学, 成都 610034; 2 长安大学, 西安 710064)

摘要: 针对某高速公路隧道工程刚投入运营即出现较多衬砌裂缝的工程实际, 首先进行现场裂缝调查统计工作, 主要包括: 裂缝数量、长度、倾角、宽度, 以及典型裂缝的深度等。结合施工期地质观测报告、施工记录、施工监控量测资料、现场调查情况, 以及数值模拟分析结果, 系统总结分析裂缝产生的原因。研究认为, 地质因素、设计因素、偏压荷载以及施工因素是导致该隧道衬砌裂缝的主要原因。此外, 混凝土干缩、地震荷载的影响等因素也会对裂缝产生起到一定作用。进而选择有代表性的典型裂缝进行跟踪监测, 主要进行了裂缝扩展情况的三维监测、裂缝深度跟踪监测、裂缝长度扩展情况监测, 以及裂缝数量及发展情况现场适时统计等工作。通过对量测数据的整理分析研究, 对衬砌结构的承载状况及安全性进行了诊断和评价, 认为裂缝虽然有所扩展, 但尚未危及到结构安全, 并基于此对下一步的裂缝处治工作提出了意见和建议。

关键词: 公路隧道; 裂缝; 监测; 处治; 分析

中图分类号: U45 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X(2010)07-0097-08

Post construction monitoring and analysis for highway tunnel lining cracks

Ye Fei² He Chuan¹ Xia Yongxu²

(1. Southwest Jiaotong University Chengdu 610034, China; 2. Chang'an University Xi'an 710064, China)

Abstract: Lots of lining cracks have been found when a highway tunnel is open to traffic for only a short period of time. Investigation of the cracks was conducted to obtain the statistics which includes the number, length, inclination, width and depth of typical cracks. The causes for cracks occurrence were analyzed using the geological observation report during construction, construction recording, monitoring data, field investigation and numerical analysis. Such factors as the geology, construction, uneven load and design were considered as the major causes of cracking. Concrete shrinkage and the 5.12 earthquake were also believed to have influenced the crack appearance. Some typical cracks were selected for monitoring the three-dimensional extension, depth development, length growth and increase of the cracks. Through analysis of the collected data, the load-bearing condition and safety of the tunnel lining were diagnosed and evaluated. It was believed that the tunnel lining was stable and safe even with the cracks. Suggestions for crack treatment were presented.

Keywords: highway tunnel; cracks; monitoring; treatment; analysis

E-mail: xianyefe@sohu.com

引 言

我国是一个多山国家, 随着山区公路特别是高等级公路的大量修建, 隧道工程作为公路工程的重要组成部分, 得到了前所未有的发展和应用, 表现为隧道数量不断增多, 长度不断增长, 施工难度不断加大。隧道工程的建设水平也随着其大量修建取得了长足

的发展和巨大进步。但是, 随着大量公路隧道的建设和投入运营的同时, 不少隧道由于受地质、施工等各种因素的影响, 出现了不同程度的病害^[1-5], 个别隧道甚至存在严重的安全隐患。其中, 衬砌裂缝即为公路隧道施工及运营中常见的病害之一^[6-10]。

某高速公路隧道为一上、下行分离的双洞隧道。隧道左线桩号 ZK37+105~ZK38+765 长 1660m, 右线桩号 YK37+065~YK38+680 长 1615m。隧道平面线形大部分为直线, 仅进出口部分为曲线, 半径为 6000m, 最大埋深约 159m。

该隧道于 2005 年 10 月动工, 2007 年 12 月通车。由于诸多方面的原因, 5.12 汶川大地震后, 隧道管理

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808020), 中国博士后科学基金项目(20080440183), 长安大学科学发展基金项目(2008Q09)

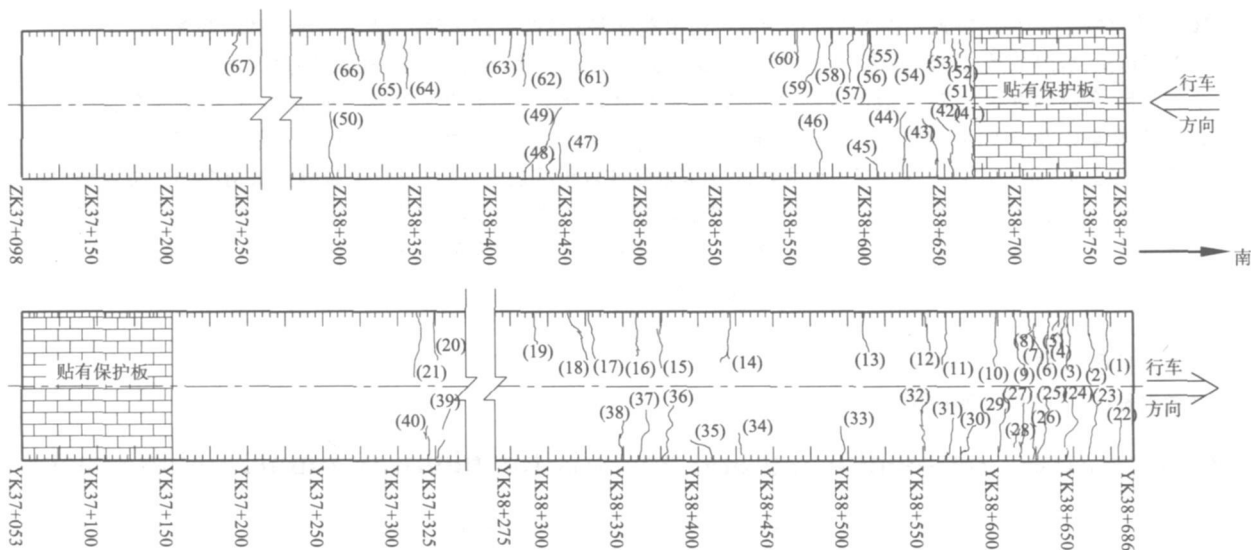
作者简介: 叶飞, 博士, 副教授

收稿日期: 2008-07-05

人员在例行巡视中发现,隧道衬砌出现了一些环向裂缝。为了进一步了解已有裂缝的扩展及新裂缝的产生和发展情况,分析衬砌结构的受荷及安全状况,并对存在裂缝进行有效处治,确保隧道结构安全及运营服务水平,有关部门委托专业人员对该隧道结构进行了裂缝的跟踪监测及综合分析研究工作,以期有针对性地提出治理建议。

1 裂缝现状调查及分析

课题组于 2008年 5月 21日至 23日间对该隧道现有裂缝情况进行了详尽调查,调查的主要内容包括:裂缝数量、长度、倾角、宽度,以及典型裂缝的深度等。图 1 主要描述了隧道左右线裂缝的数量及分布情况。



注: 1.此图不包括施工缝; 2.由于左右线隧道进口100米贴有保护板,所以未进行裂缝检查。

图 1 衬砌裂缝分布情况示意图

Fig 1 Cracks distribution of the tunnel lining

通过对调结果的分析,可初步得到以下规律:

(1) 裂缝产生的地段多位于洞口部位。通常情况下,这些地方覆盖岩层薄、岩体松散、裂隙发育、垂直压力大;在隧道通过断层、破碎带区、地下水富集区时,由于隧道的开挖改变了地下水的渗流通道,使隧道成为地下水的汇集地,这不但会增加隧道衬砌的外压力,同时由于裂隙水的流动,会把岩体中的充填物带走,大大降低了岩体的完整性,进而造成岩体坍塌,衬砌开裂。

(2) 裂缝多为环向裂缝,且在素混凝土和钢筋混凝土中同时存在。目前发现一条与水平交角近 45°的斜向裂缝。

(3) 裂缝宽度多在 1mm之内(多数在 0.5mm之内,个别超过 1mm),多集中于边墙,裂缝的长宽不一,有向拱顶发展的趋势。两侧拱角处较为密集,一般每 3~5m就有一条。

(4) 右线裂缝数量多于左线,在此次调查统计中,右线共计发现明显裂缝 40条,左线为 27条,右线裂缝数量约为左线裂缝数量的 1.5倍。

(5) 裂缝多集中于两边墙角处及其附近。两边的检修道的侧壁上裂缝分布较为密集。

2 裂缝成因分析

一般来说,从隧道衬砌结构受力角度,隧道衬砌裂缝的主要原因可归结为: 1)由外荷载(静、动荷载)的直接作用引起的裂缝,其中,围岩自重直接荷载中占很大部分; 2)由结构次应力(由温度、收缩和膨胀、不均匀沉降等因素引起应力变化)引起的裂缝。从引起裂缝的外部因素角度,隧道裂缝产生及扩展的原因是多方面的,如地质、设计,以及施工因素等。

依据现场调查情况,并结合设计及施工期的地质勘测资料,以及施工记录及现场监控量测情况,认为引起本隧道裂缝的主要原因有:地质因素、设计因素、施工因素,以及其他因素等。

2.1 地质因素

由图 1可以看出,右线裂缝明显多于左线裂缝,而施工中的地质观测报告也显示“左线围岩好于右线”。

在左右线的南出口段,右线的 YK48+300~+430段,以及左线的 ZK38+300~+460段,裂缝相对比较集中。而依据施工中的地质观测报告:南端洞口段,围岩主要为第四系残积物,主要由粘土、白云岩残块

及绢云母石英片岩碎块组成。桩号 YK38 + 420 ~ +404 围岩为深灰色薄至中厚层白云岩、细晶结构、块状构造,局部夹有条纹状灰质白云岩,节理不太发育,有小溶洞。桩号 YK38 + 404 ~ +310 该段围岩仍为深灰色薄至中厚层白云岩,但节理较发育,溶洞出现较多,节理多为顺层微张型,由于节理和溶洞均较发育,在 ZK38 + 455 处,发现 2×4×6 m³ 的较大溶洞,主要充填物为黄土、少量白云岩碎块。在 ZK38 + 315 处,有一较大溶洞。表 1 将施工的地质观测记录与本次裂缝观测相对集中区段的对应情况作了对比分析。

表 1 裂缝集中处的围岩地质情况

Table 1 Geology of rocks with cracks concentration

裂缝集中处	裂缝情况	施工期的地质描述
南出口段: ZK38+770~ZK38+580	16条(贴保护层区段 ZK38+770~ZK38+580 无法统计)	围岩为浅灰、深灰色薄至中厚层白云岩夹少量泥质、粉砂质泥灰岩及绢云母石英片岩。片岩相对破碎,揉皱发育,片理面具丝绢光泽。
左线 ZK38+300~ZK38+460	10条	围岩中节理和溶洞均较发育,在 ZK38+455 处,有一 2×4×6m ³ 的较大溶洞,主要充填物为黄土、少量白云岩碎块。在 ZK38+315 处,有一长 5m 宽 8m 高 2m 的溶洞。
南出口段: YK38+680~YK38+550	23条	围岩为第四系残积物。主要由粘土、白云岩块及绢云母石英片岩碎块组成。YK38+557 处,有长 4m 宽 0.3~1.5m 高 2m 的溶洞。
右线 YK48+300~YK48+430	11条	围岩为深灰色薄至中厚层白云岩、细晶结构、块状构造。节理和溶洞均较发育。YK38+420 处,有长 1.5~2m 宽 2.5m 高 10m 的溶洞。

由表 1 可以看出,左线 350m 长度(占总长度的 20%)上分布了 26 条裂缝,即几乎全部的裂缝;右线 260m 长度(占总长度的 16%)分布了 34 条裂缝,占该洞总裂缝数的 85%。这些裂缝密集区段在施工过程中均为围岩较差且溶洞较为发育的地段。事实上,该隧道最突出的不良地质即为溶洞,比较而言右线的溶洞比左线发育。施工期地质勘察报告中提到:右线整个隧道小的溶洞不计其数,较大溶洞出现过 4 次,分别为:YK38+557 处,长 4m 宽 0.3~1.5m 高 2m; YK38+420 处,长 1.5~2m 宽 2.5m 高 10m; YK38+263 处,长 2.5m 宽 4m 高 2m; YK37+130 处,长 3m 宽

4.5m 高 8m 左线溶洞也比较发育,比较大溶洞有: ZK38+455 处,长 2m 宽 4m 高 6m; ZK38+315 处,长 5m 宽 8m 高 2m; ZK37+780 处,长 3m 宽 4m 高 3m。

可以看出,现已发现的裂缝集中地段也是施工中发现溶洞较大、较集中的地段。显然,溶洞对裂缝的影响不可忽视,是衬砌裂缝产生的一个原因。

2.2 设计因素

设计文件及现场调查情况均表明,该隧道左线南出口端 ZK38 + 480 ~ ZK38 + 770 及右线南出口端 YK38 + 400 ~ YK38 + 686 的各自近 300m 长度段的埋深均在 30m 以下,围岩为 III、IV 级,图 2 为该隧道左线出口段的里程及埋深情况(右线与之类同)。

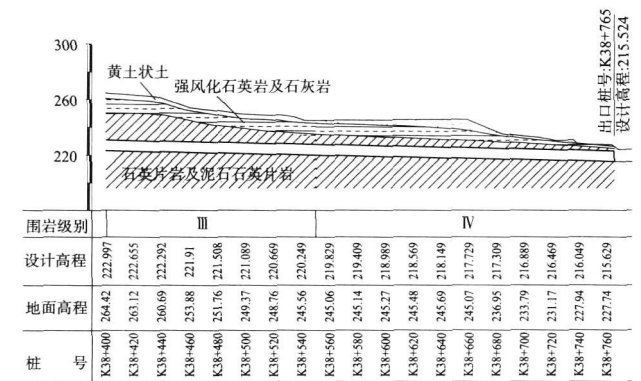


图 2 左线南出口端里程及埋深情况

Fig 2 Mileage and depth of south end of the left line tunnel

该隧道净宽为 11.4m 即毛洞开挖跨度 13m 左右,紧急停车带处的开挖跨度在 15m 以上。而且,该隧道为一上下分离式隧道,北端洞口左右线间距约为 40m,南端约为 48m,施工期对围岩扰动的叠加效应亦不可忽视。

综合分析,其复杂的地质条件、数量众多的溶洞,加之如此长的浅埋段,以及两洞之间施工扰动效应的叠加,致使上部围岩很难形成拱效应,进而让衬砌结构承受了较大的围岩压力荷载。而且,雨季雨水的下渗将在一定程度上增大围岩容重,从而进一步增大衬砌结构所承受的荷载。这些均为衬砌裂缝的产生留下了隐患。

本文选择了一典型断面对衬砌结构的受力进行数值分析。计算模型左边取至右线隧道开挖边沿附近,右边取四倍开挖洞径 49m 上方覆土厚度取 28m 下方取三倍洞径 37m(如图 3 所示)。围岩、初期支护和二次衬砌均采用 P1m42 实体单元进行模拟,锚杆采用 Link1 杆单元模拟。共划分 12353 个单元。材料参数取值如表 2 所示 (IV 级围岩)。

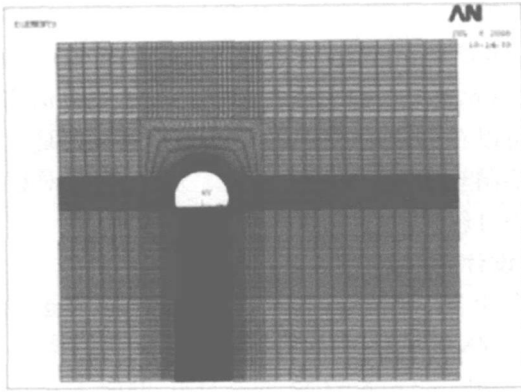


图 3 计算模型

Fig 3 Analysis model

表 2 材料参数取值表

Table 2 Material Parameters

单元类型	重度 (kN/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	内摩擦角 (°)	粘聚力 (MPa)
围岩	23	3	0.31	35	0.3
初期支护	23	23	0.22		
二次衬砌	23	29.5	0.2		
锚杆	77	210	0.3		
铺装层	23	31	0.2		

算得第一主应力云图如图 4 所示,可以看出,拱脚处的最大拉应力达到 2.4MPa,出现在靠围岩的一侧(外侧),内侧拉应力值也达到 0.6MPa 以上,已超过 C25 衬砌混凝土的容许拉应力 0.5MPa。与实际该位置出现较多裂缝相吻合。

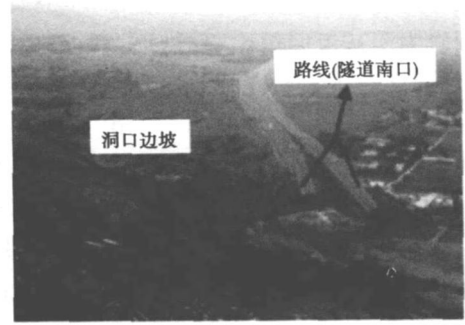


图 5 南洞口端山顶俯瞰图

Fig. 5 Aerial view of the south end of the tunnel



图 6 南洞口地形示意图

Fig. 6 Land configuration of the south end of the tunnel

本文未对偏压效应展开深入分析,但明显的偏压现象无疑使得长达数百米的南端浅埋洞口段受力更为复杂和不利。

2.4 施工因素

该隧道的施工记录显示,施工中右线曾发生过大的塌方 6 次,其中裂缝较为集中的 YK48+300 ~ YK48+430 段发生了 4 次。左线也曾出现过塌方事故,其中 ZK38+300 ~ ZK38+460 段发生较大的塌方 2 次。施工中对塌方主要采用了注浆、加强支护等方式进行治理,为防止塌方范围的扩大并尽快通过塌方段,施工中采用了尽快施做二次衬砌的方式,但由于初期支护变形尚未稳定,这相当于在一定程度上加大了二次衬砌所受荷载,同样为衬砌裂缝的产生埋下了隐患。

2.5 其他因素

隧道贯通后,由于洞内环境变化,主要是风速加大、洞内气温下降、湿度降低,可能引起混凝土的收缩变形,进而产生干缩应力。通常情况下,收缩在早期发展较快,以后逐渐减慢。当混凝土不能自由收缩时,会在其内引起拉应力,进而产生裂缝。一般来说,干缩裂缝多在衬砌施做以后以至数月这段时间内产生^[11]。而且,在洞口段,由于与外界接触,受洞外因素影响较大,相应温度、湿度变化也比洞内大,因而洞口段的收缩变形一般也比洞内要大,故收缩裂缝容易在洞口段产生。

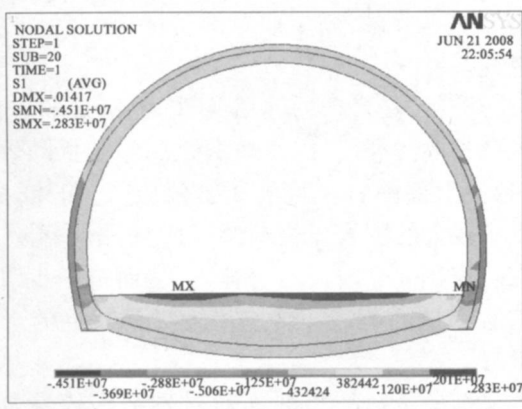


图 4 第一主应力云图 (Pa)

Fig 4 Distribution of the first Principal stress

2.3 偏压荷载

现场调查发现,在此次裂缝较为集中的南洞口端,隧道线路沿山脚边坡而过,属典型傍山而过的隧道,存在较为明显的偏压现象。图 5 为南洞口端山顶俯瞰图,图 6 为依据现场调查结果绘制的南洞口地形示意图。

另据现场调查结果,现场环卫人员坚信在四川汶川地震发生前未发现衬砌裂缝,而地震发生后的第二天则发现了衬砌裂缝(地震时隧道所在地区震感强烈)。因此,地震因素可能是该隧道衬砌裂缝产生的诱因。此外,隧道仰拱地基不均匀沉降可能也是引起衬砌结构裂缝的一个原因。

3 裂缝发展情况跟踪监测

常用的裂缝观测方法有:1)记录末端位置法:即标注好裂缝末端位置,定期观测其位置的变化,以观测其长度方向的扩展情况;2)贴石膏条(饼)法:调制稠度适中的浆体,跨待测裂缝处做一适当厚度的石膏条或石膏饼,定期检查该石膏条(饼)是否开裂,用以确定裂缝的发展情况;3)用刻度显微镜观测:即在待测缝适当位置作定位标示,然后定期在标示位置用刻度显微镜进行宽度量测;4)专用测缝计量测:其他还有诸如在裂缝两侧固定测板或测钉并配合游标卡尺进行量测的方法等。

本项目对裂缝的发展情况主要采用了三维跟踪监测及深度量测(初始宽度在第一次调查统计时量测)同时,定期对裂缝数量进行统计标示,并对典型裂缝的长度进行跟踪监测。其中,三维监测采用自行设计加工的机械式三维测缝仪^[12],裂缝深度则采用DJCS05型裂缝测深仪进行量测。

3.1 裂缝扩展情况三维监测

所谓三维裂缝监测,即监测裂缝三个方向上的位移发展情况,从而判断裂缝两侧的移动和错动情况,对隧道衬砌来说,三个方向即轴向、径向及断面切向。量测示意图如图 7 所示。

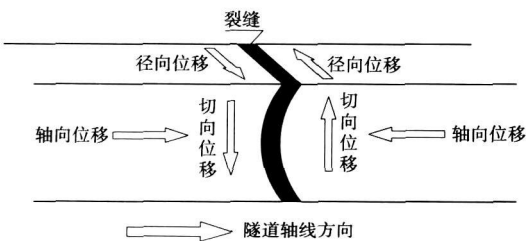


图 7 裂缝三维监测示意图

Fig 7 General view of three-dimensional monitoring method for cracks

若只对图 7 中所示三个方向的任一方向进行量测,则为一维测缝。同理,进行两个方向量测即为二维测缝,三个方向都量测则为三维量测。图 8 即为本项目所用的三维测缝仪器概念图。

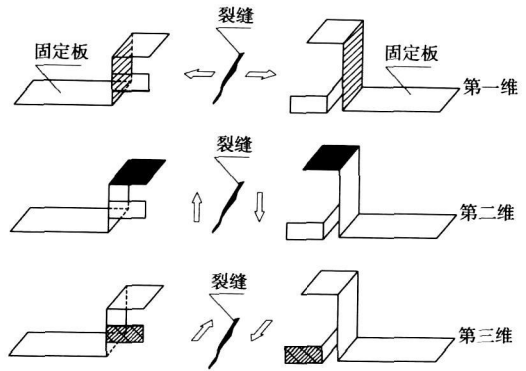


图 8 隧道衬砌混凝土裂缝三维量测概念图

Fig 8 Concept of three-dimensional monitoring method for cracks of tunnel lining

依据现场实际情况,在左右线各选择了 3 条有代表性的裂缝进行观测,在图 1 中编号分别为 13、33、37、46、52、60。桩号分别为:右线 YK38+516.7、YK38+496.57、YK38+361.27;左线 ZK38+565.12、ZK38+660.1、ZK38+552.34。

图 9~14 为所测各条裂缝在轴向、径向及切向三个方向的变化值与时间的关系曲线,以及其变化趋势线。可以看出,总体上各条裂缝均有所扩展,其中变化最大的 YK38+496.57 测点轴向增长值超过 0.3mm。

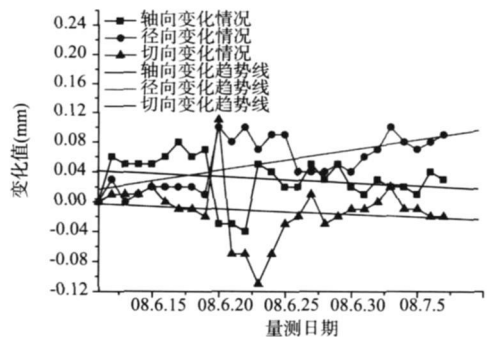


图 9 YK38+516.7 裂缝三维扩展情况

Fig. 9 Three-dimensional extension of YK38+516.7 crack

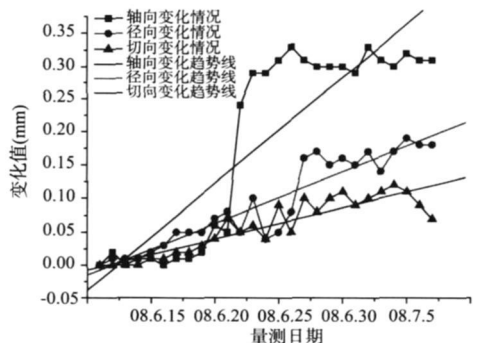


图 10 YK38+496.57 裂缝三维扩展情况

Fig. 10 Three-dimensional extension of YK38+496.57 crack

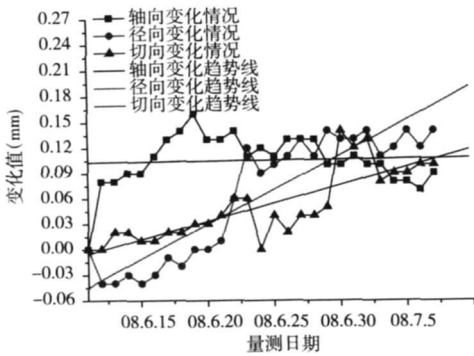


图 11 YK38 + 361.27 裂缝三维扩展情况

Fig. 11 Three-dimensional extension of YK38 + 361.27 crack

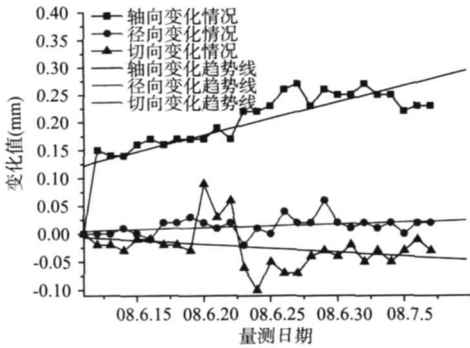


图 12 ZK38 + 565.12 裂缝三维扩展情况

Fig. 12 Three-dimensional extension of ZK38 + 565.12 crack

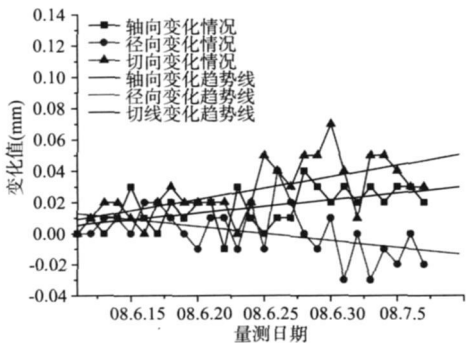


图 13 ZK38 + 660.1 裂缝三维扩展情况

Fig. 13 Three-dimensional extension of ZK38 + 660.1 crack

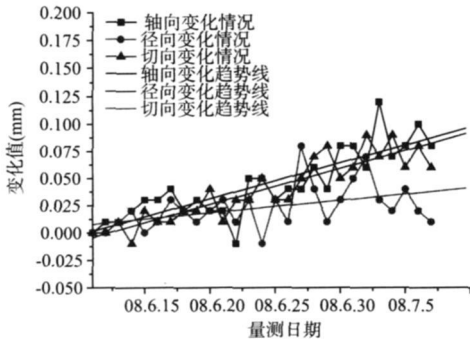


图 14 ZK38 + 552.34 裂缝三维扩展情况

Fig. 14 Three-dimensional extending of ZK38 + 552.34 crack

3.2 裂缝深度扩展情况监测

应用超声波法检测混凝土结构的裂缝深度,是一种重要的混凝土无损检测方法,其主要方法有:单面斜测法、双面斜测法、钻孔对测法、冲击回波法,以及首波相位反转法等^[13-14]。

本项目采用 DJCS05 型裂缝测深仪进行裂缝深度量测(见图 15),避免了用通常量测仪器量测时较为繁复的量测和计算过程。其测深原理为:振动能量在混凝土内传播,穿过裂缝时,振动能量在裂缝端点产生衍射,衍射角与裂缝深度具有几何关系,依据该几何关系,实现裂缝的高精度测深。

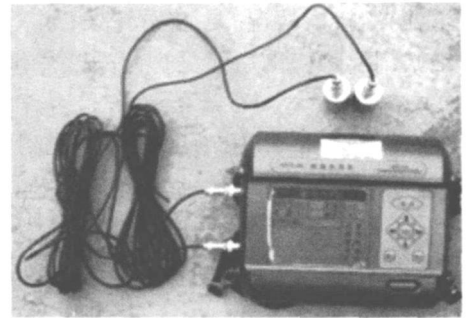


图 15 DJCS05 型裂缝测深仪

Fig. 15 Ultrasonic depth finder of DJCS-05

DJCS05 型裂缝测深仪主要由信号发射、接收,信号处理、显示、键盘操作、数据传输等单元组成,如图 16 所示。首先由信号发射单元向混凝土内部发射超声波,接收换能器接收超声波信号,信号处理单元对接收的信号进行处理,根据收发间距换算裂缝的深度并显示、储存。

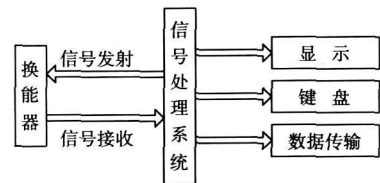


图 16 DJCS-05 型裂缝测深仪工作原理图

Fig. 16 Operating principle of ultrasonic depth finder of DJCS05

选取与三维测缝相一致的 6 条典型裂缝进行深度监测,表 3 将监测期间(已进行过两次监测,分别是 08 年 6 月 16 日和 7 月 9 日,目前尚在继续跟踪监测)各条裂缝深度的变化情况进行了统计和归纳。

由表 3 可以看出,裂缝深度有的增大,有的减小,也有基本保持不变的,说明衬砌结构的受力尚未稳定,结合图 9~图 14 的结果,可以发现纵向宽度有变小趋势的裂缝,如 YK38 + 516.7 及 YK38 + 516.7 在深度上也显现出减小的趋势,即出现了裂缝的自愈合现象。因目前采得数据尚不多,更进一步结论需等取

得更多数据后才能分析得到。

表 3 典型裂缝深度扩展情况

Table 3 Depth variation of typical cracks

裂缝位置	第一次测值 (mm)	第二次测值 (mm)	变化值 (mm)	扩展 说明
YK38+516.7	187	151	-36	自愈
YK38+496.57	150	181	31	增大
YK38+361.27	122	45	-77	自愈
ZK38+565.12	90	138	48	增大
ZK38+660.1	60	76	6	稳定
ZK38+552.34	125	134	9	稳定

注: 仪器相对误差 $\leq 10\%$, 表中“扩展说明”据此判断。

3.3 裂缝数量发展情况跟踪监测

监测过程中的另一项重要工作就是对裂缝数量情况的跟踪和统计, 即随时掌握新裂缝产生和发展情况。

2008年6月22日, 课题组在右线新发现26条裂缝, 左线新发现10条裂缝。7月1日, 右线又新增10条裂缝, 左线新增4条裂缝。同第一次裂缝调查过程一样, 监测组对新增裂缝的长度、宽度、走向、倾角等情况进行了详细统计。不过, 新增裂缝多为小裂缝, 宽度一般都在0.5mm以内, 长度在3m以内。同时, 不排除第一次统计未能统计完全, 造成此次误以为是新增裂缝的可能。对于新增裂缝, 也选择了典型裂缝进行三维扩展情况监测和深度变化监测。

3.4 裂缝长度扩展情况监测

采用记录末端位置的方法进行量测。先运用刻度显微镜标注好初始裂缝末端位置(图17中的“第一次标记位置”), 之后再运用刻度显微镜定期观测其位置的变化, 并做好标记, 以观测其长度方向的扩展情况。

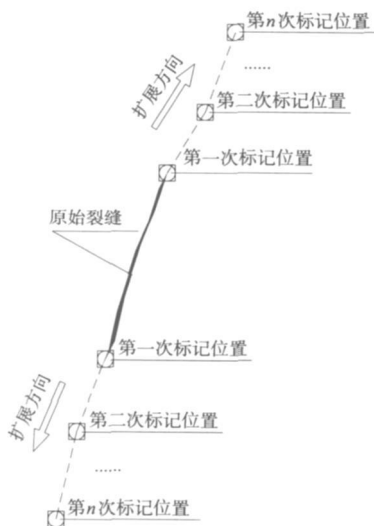


图 17 裂缝长度扩展情况监测示意图

Fig 17 Monitoring concept of extension of crack length

4 衬砌安全性初步诊断及整治建议

从一个多月以来的监测情况来看, 已有裂缝仍然呈发展态势, 表现为三维测缝结果尚未稳定(张开度缓慢增大, 并伴随着环向和径向的错动)、典型裂缝深度仍有扩展, 长度也有所变化。而且, 更为重要的是, 监测过程中发现了为数不少的新裂缝。说明围岩及衬砌结构的受力和变形尚未最终稳定。

所幸的是, 目前发现的裂缝基本都为环向裂缝, 大多尚未贯通, 宽度均在1.5mm之内。依据参考文献[15]所提出根据裂缝宽度 δ 对裂缝进行分类的方法: 毛裂缝(发丝裂缝) $\delta \leq 0.3\text{mm}$; 小裂缝, $0.3\text{mm} < \delta \leq 2\text{mm}$; 中裂缝, $2\text{mm} < \delta \leq 20\text{mm}$; 大裂缝 $\delta > 20\text{mm}$, 可知本隧道现有裂缝均为小裂缝。目前虽然有所发展, 但速度缓慢, 局部裂缝还有自愈现象, 即有闭合的趋势。所以, 现有裂缝并未危及到结构稳定和安全。

对于衬砌裂缝的治理, 一般的原则是: 对隧道承载力有影响的裂缝, 应对隧道结构及围岩进行加固处理; 对不影响结构受力的裂缝, 可以直接对裂缝进行治理。针对本隧道当前情况, 建议暂不采取治理措施, 但相应的监测工作还应持续, 并应加大监测力度和频率, 密切关注裂缝的产生和扩展情况。监测过程中, 建议运用地质雷达等补充手段探测衬砌厚度及背后空洞情况, 综合检验衬砌质量, 进一步分析确认裂缝产生原因。待裂缝变化稳定, 并没有新裂缝产生时, 再对裂缝进行治理。如果监测过程中发现裂缝扩展速度加快, 形成贯通状, 并有新的尤其是纵向或斜向裂缝产生, 且宽度较大, 则需考虑对结构和围岩采取必要的加固措施。

5 结语

(1) 衬砌裂缝产生的原因复杂, 外荷载及结构次生应力均可能导致其产生。而且, 地质、设计、偏压荷载、施工, 以及外界环境的变化等都可能是衬砌裂缝产生的诱因。

(2) 对衬砌裂缝的监测和分析要以获得尽量多的基础数据和信息为原则。如现场监测裂缝的长度、宽度、角度、深度的变化, 裂缝纵向、径向及环向的三维扩展, 以及新裂缝的产生和扩展情况等; 并尽可能查阅诸如施工记录、施工期地质预报资料、施工期监控量测资料, 以及设计文件等资料等。进而综合分析裂缝产生的原因, 以便有针对性地提出治理建议。

(3) 裂缝扩展情况的三维监测可以监测裂缝三个

方向,即纵向、径向和环向的变化情况,通过裂缝运动的监测,可以了解隧道结构整体受力的健康情况,对结构稳定的判断和裂缝治理方案的确定有一定指导作用。

(4)隧道衬砌裂缝的治理要具体情况具体对待。一般来说,对隧道承载力有影响的裂缝,应对隧道结构及围岩进行加固处理;对不影响结构受力的裂缝,可以直接对裂缝进行治理。从这个角度说,裂缝扩展情况的跟踪监测也尤为重要。

参考文献

- [1] 吴梦军,张永兴,刘新荣.公路隧道病害处治技术研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(5):967-971(Wu Mengjun Zhang Yongxing Liu Xinrong Research on disease treatment technology of highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2007,3(5):967-971(in Chinese))
- [2] 刘庭金,朱合华,丁文其.某高速公路隧道二次衬砌安全性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(1):75-78(Liu Tingjin Zhu Hehua Ding Wenqi Safety analysis of secondary lining of a freeway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004,23(1):75-78(in Chinese))
- [3] 苗晓岐.九燕山隧道病害原因分析及整治措施建议[J].铁道工程学报,2003,78(2):70-72(Miao Xiaochi Analysis on reason of defects in Jiuyanshan Tunnel and suggestion of measures for their regulation[J]. Journal of Railway Engineering Society 2003,78(2):70-72(in Chinese))
- [4] 代高飞,朱合华,夏才初.某公路隧道病害成因分析与治理研究[J].中国安全科学学报,2005,15(12):89-92(Dai Gaofei Zhu Hehua Xia Caichu Study on causation of highway tunnel defects and their countermeasures[J]. China Safety Science Journal 2005,15(12):89-92(in Chinese))
- [5] 丁锐.大垵口隧道病害整治施工技术[J].现代隧道技术,2001,38(5):53-57(Ding Rui Disease treatment in Dayakou Tunnel[J]. Modern Tunneling Technology 2001,38(5):53-57(in Chinese))
- [6] Lackner R, Mang HA. Cracking in shotcrete tunnel shells[J]. Engineering Fracture Mechanics 2003,70(7/8):1047-1068
- [7] 李治国,张玉军.衬砌开裂隧道的稳定性分析及治理技术[J].现代隧道技术,2004,41(1):26-31(Li

Zh Guo Zhang Yujun Stability analysis for tunnels with cracked linings and the techniques for repairing the cracked linings[J]. Modern Tunneling Technology 2004,41(1):26-31(in Chinese))

- [8] 潘洪科,杨林德,黄慷.公路隧道偏压效应与衬砌裂缝的研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3311-3315(Pan Hongke Yang Lindeng Huang Kang Research on unsymmetrical load effect and lining cracks of a highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005,24(18):3311-3315(in Chinese))
- [9] 王建秀,朱合华,唐益群,等.连拱隧道裂缝运动的监测与分析[J].土木工程学报,2007,40(5):69-73(Wang Jianxiu Zhu Hehua Tang Yiqun et al Monitoring and analysis for movement of cracks of twin arch tunnel[J]. China Civil Engineering Journal 2007,40(5):69-73(in Chinese))
- [10] 叶飞,朱合华,丁文其,等.连拱隧道衬砌裂缝的三维监测研究[J].现代隧道技术,2006,43(2):30-33(Ye Fei Zhu Hehua Ding Wenqi et al Three dimensional in site monitoring for the cracks on a multi-arch highway tunnel lining[J]. Modern Tunneling Technology 2006,43(2):30-33(in Chinese))
- [11] 张学龙,罗缙锦.三都岭隧道裂缝形成原因分析[J].湖南交通科技,2003,29(1):84-86(Zhang Xuelong Luo Junjin Study on causation of cracks of Sanduling tunnel lining[J]. Hunan Communication Science and Technology 2003,29(1):84-86(in Chinese))
- [12] 叶飞.隧道衬砌混凝土裂缝的三维量测装置:中国,200620079781.9[P].2007.09.26
- [13] 袁善杭,殷金栋,郑树寅,等.混凝土裂缝深度检测技术研究[J].甘肃科技纵横,2006,35(1):121-122(Yuan Shanhang Yin Jindong Zheng Shuyin et al Testing technology for the depth of concrete crack[J]. Gansu Science and Technology 2006,35(1):121-122(in Chinese))
- [14] 林维正,苏勇,洪有根.混凝土裂缝深度超声波检测方法[J].无损检测,2001,23(8):323-326(Lin Weizheng Su Yong Hong Yougen Ultrasonic testing methods for the depth of concrete crack[J]. Nondestructive Testing 2001,23(8):323-326(in Chinese))
- [15] 朱常春.公路隧道衬砌裂缝病害治理技术[J].岩土工程界,2004,7(9):67-68(Zhu Changchun The treatment technology of highway tunnel lining[J]. Geotechnical Engineering World 2004,7(9):67-68(in Chinese))

叶飞(1977-),男,博士,副教授。主要从事公路隧道的教学与研究。

何川(1964-),男,博士,教授。主要从事隧道与地下工程的教学与研究。

夏永旭(1954-),男,博士,教授。主要从事公路隧道工程安全研究。