

文章编号:1671-8879(2009)01-0064-05

带裂缝的隧道衬砌刚度验算与加固

王华牢^{1,2}, 李 宁¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要:针对某隧道在竣工后不久出现较多衬砌裂缝的情况,对裂缝进行了详细调查,得到了裂缝的基本参数,对裂缝安全等级进行了评价。采用基于刚度退化理论的混凝土刚度折减公式,对带裂缝的衬砌结构进行了安全系数验算,对结构的安全性进行了分析。采用套拱法对隧道结构进行加固设计,并对加固后的衬砌结构进行了安全系数验算。结果表明:加固后的衬砌结构安全系数为 2.69,满足《公路隧道设计规范》的要求。

关键词:隧道工程;裂缝;加固设计;刚度验算

中图分类号:U451.4 **文献标志码:**A

Stiffness checking and reinforcement of tunnel lining with cracks

WANG Hua-lao^{1,2}, LI Ning¹

(1. School of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. The First Highway Survey and Design

Institute of China Co Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In a tunnel, the cracks soon appeared on the linings after its operation. The cracks were investigated, the basic parameters of the cracks were gotten, and the safety level of cracks was evaluated. The concrete stiffness reduction formula of the theory of stiffness degradation was used in checking the safe factor of the lining structure with cracks. The safety of the structure was analyzed, the sets arch structure was utilized to reinforce the tunnel lining, the safe factor of the reinforcement structure was calculated. The results show that the safe factor of the lining reinforced structure is 2.69, it can meet demand of Chinese standard *Design Code of Highway Tunnel*. 9 tabs, 6 figs, 11 refs.

Key words: tunnel engineering; crack; reinforcement design; stiffness checking

0 引 言

目前,中国已建的各种公路、铁路和地铁隧道均不同程度地出现衬砌裂缝、变形以及渗漏水等病害。根据对 5 000 座铁路隧道调查的统计资料,有 1/3

的隧道存在着衬砌结构裂缝和渗漏水等病害。据对公路隧道的初步调查,有相当多的隧道在竣工和运行后,即有裂缝和渗漏水现象产生,有的隧道甚至在施工过程中即产生衬砌开裂,造成支护结构安全系数不能满足规范^[1]要求,从而影响到隧道的正常使

收稿日期:2008-02-12

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2003 318 490 18)

作者简介:王华牢(1961-),男,陕西蒲城人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司教授级高级工程师,西安理工大学工学博士研究生,
E-mail: wanghl@ccroad.com.cn。

用。隧道衬砌裂缝病害一直是隧道研究的重点,目前国内外对隧道裂缝的理论计算及成因分析,做的研究工作较多。荣耀^[2]等基于弹性地基梁法,建立了隧道衬砌裂缝间距和宽度的计算方法;蒲春平^[3]等研究了温度应力引起的裂缝间距和宽度计算公式,探讨了由温度应力引起的裂缝的开展规律;在裂缝量测方面,潘洪科^[4]等采用钢弦式频率震动测缝计和千分表对裂缝的宽度变化进行了监测。然而,在裂缝对隧道衬砌结构的刚度验算方面,所查的文献均未见论述。同时,随着工程检测技术的进展,隧道裂缝相关参数的量测技术也较以往有较大进步,但介绍较多地只是单一技术的应用^[5]。在隧道的加固技术研究方面,粘钢、碳纤维和扩大断面法等技术也不断得到应用^[6]。虽然粘钢和碳纤维技术在处理隧道的一般性裂缝时有较好的效果,也有较好的经济效益,但在断面刚度不足时,采用粘钢和碳纤维就有一定的局限性。为此,本文采用裂缝测宽仪、超声波仪和振弦式测缝计,对某隧道裂缝进行了详细调查,基于裂缝调查结果,进行了衬砌结构安全性校核,并提出完整的加固方案,从而为类似工程加固设计提供参考。

1 工程概况

某直线形隧道,长度为 287 m。隧道穿越的地层主要为第四系全新统冲积层、第四系残坡积碎石土和中元古界双桥山粉砂岩夹粉砂质板岩。隧道开挖宽度约为 13 m,开挖高度约为 10.4 m。

隧道运营后出现多处裂缝和渗漏水,局部裂缝过大,已影响隧道的正常使用。因此,对该隧道进行裂缝调查,基于裂缝调查结果,对隧道安全性进行评价,并进行衬砌结构验算,制定加固方案。

2 裂缝调查

2.1 裂缝调查技术

(1)裂缝宽度量测。采用 DJCK-2 智能裂缝测宽仪进行隧道裂缝测量。在测量时,程序自动扫描捕获裂缝,并在显示屏上实时显示裂缝的宽度数值(图 1),测量精度为 0.01 mm。

(2)裂缝深度测试。采用同济大学声学所研制的 U-SONIC 超声波仪进行测试。根据超声波在衬砌混凝土中的传播速度,得出行程时间曲线;然后,将超声波发射器位置固定,使接收器沿衬砌某一方方向移动,根据裂缝位置处超声波传播时间的变化,如延迟时间等,即可计算出裂缝深度^[7]。

(3)裂缝变化量监测。采用 CJ-301 型振弦式测缝计对裂缝的发展情况进行观测。测缝计垂直于裂缝布设,如图 2 所示。

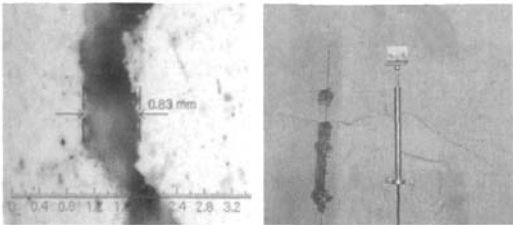


图 1 裂缝宽度的测量



图 2 测缝计的布设

2.2 衬砌裂缝诊断指标的判定标准

衬砌裂缝的判定标准:衬砌裂缝定性判定标准;裂缝长度和宽度的判定标准;裂缝深度的判定标准。

衬砌裂缝的定性判定按表 1 执行;衬砌裂缝长度和宽度的判定标准按表 2、表 3 执行;衬砌裂缝深度的判定按表 4 执行。

表 1 衬砌裂缝的定性判定标准

判定等级	裂缝状态	安全程度
AAA	裂缝密集,出现剪切裂缝,并且发展速度快	不安全
AA	裂缝较密集,有一定发展趋势	偏不安全
A	存在裂缝,有一定发展趋势	较安全
B	存在裂缝,无发展趋势	安全

表 2 有发展性的衬砌裂缝的判定标准

裂缝宽度 b/mm	裂缝长度 L/m	
	>5	≤ 5
>3	AAA, AA	AA, A
≤ 3	A	A

表 3 不能确定有无发展性的衬砌裂缝的判定标准

裂缝宽度 b/mm	裂缝长度 L/m		
	>10	$10 \geq L > 5$	≤ 5
>5	AAA, AA	AA, A	AA, A
$5 \geq b > 3$	AA	AA, A	A
≤ 3	A, B	A, B	A, B

表 4 衬砌裂缝深度的判定标准

判定等级	裂缝深度 h/cm
AAA	$h > H$
AA	$H \geq h > 0.8H$
A	$0.8H \geq h > 0.6H$
B	$0.6H \geq h > 0$

注: H 为隧道衬砌最小保护层厚度 (cm)。

衬砌裂缝的指标层包括长度、宽度和深度。长度和宽度综合为一个指标,其权重用 ω_{c1} 表示;深度的权重用 ω_{c2} 表示。2 个指标的权重分别为

$$\omega_{c1} = 0.575, \omega_{c2} = 0.425$$

2.3 裂缝调查成果整理

检测时间为 2007 年 8 月至 9 月。从现场裂缝调查的结果可看出,裂缝主要发生在施工质量不良段(表 5)。拱顶纵向裂缝深度达到 20 cm,其他纵向主裂缝深度普遍为 2~10 cm。

表 5 裂缝参数

里程桩号	长度/m	宽度/mm	宽度总变化量/mm	深度/cm	部位
K0+116	6.3	0.4	0.110	2.24	边墙上 1.7 m
K0+130	1.2	0.2	0.180	1.87	左拱腰
K0+157	3.5	0.6	0.026	5.46	拱顶偏右 0.7 m
K0+224	35.5	1.8	0.020	18.44	边墙上 2.0 m
K0+231	6.0	1.2	0.090	8.87	拱顶
K0+235	5.5	2.5	0.450	20.75	拱顶
K0+270	4.3	1.4	0.220	10.20	拱顶
K0+280	12.5	1.6	0.080	20.48	拱顶

综合监测,检测计算结果,该隧道安全等级评定多为 A 和 AA(表 6),偏于不安全。因此,该隧道需要进行加固。

表 6 带裂缝隧道衬砌安全等级评定

里程桩号	定性判定等级	定量判定等级		
		宽度和长度	深度	综合判定
K0+116	A	A、B	B	0.64
K0+130	A	A、B	B	0.64
K0+157	A	A、B	AAA	1.71
K0+224	A	A、B	AAA	1.71
K0+231	AA	A、B	AAA	1.71
K0+235	AA	A、B	AAA	1.71
K0+270	AA	A	AAA	1.85
K0+280	AA	A	AAA	1.85

3 带裂缝衬砌结构的刚度计算

钢筋混凝土构件经历一段使用期后,构件的受拉区出现裂缝,对构件的截面刚度产生影响。对钢筋混凝土超静定结构,截面刚度的变化不仅影响结构的变形性能,还会影响到构件间的内力分布。因此,对构件开裂后截面刚度退化规律的研究,将有助于既有结构或构件的安全性和使用性的评定^[8]。

钢筋混凝土梁从拉区混凝土开裂到钢筋屈服,其截面抗弯刚度与初始抗弯刚度之比的上下限可按表 7 取值。在实测中,如发现钢筋混凝土构件开裂(由弯曲引起的垂直裂缝),可按表 7 的结果对开裂截面抗弯刚度进行适当调整。根据裂缝的开展情况,按下列原则确定合适的刚度比:当裂缝宽度为 0.5 mm 时,取 B_1/B_0 ;当裂缝宽度为 3.0 mm 时,取 B_2/B_0 ;裂缝宽度为 0.5~3.0 mm 时,按线性插值确

表 7 裂缝结构刚度与初始刚度的比值关系式

混凝土强度等级	函数关系式			
	$B_1/B_0=1/(a_1+b_1/\rho)$ (上限)		$B_2/B_0=1/(a_2+b_2/\rho)$ (下限)	
	a_1	b_1	a_2	b_2
C20	0.65	0.49	1.27	0.65
C25	0.63	0.56	1.15	0.77
C30	0.61	0.65	1.10	0.88
C50	0.59	0.84	1.06	1.15

注: B_1/B_0 为开裂后割线刚度与初始刚度之比; B_2/B_0 为钢筋屈服时割线刚度与初始刚度之比; ρ 为截面受拉钢筋的配筋率(%); a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 均为计算参数。

定。同时应注意:当 $B_1/B_0>1$ 时,取 $B_1/B_0=1$;当 $B_2/B_0>0.6$ 时,取 $B_2/B_0=0.6$ 。

取断面 K0+235 裂缝进行校核。裂缝宽度为 2.5 mm,按线性插值确定关系式进行计算。原隧道设计参数为:C25 模筑混凝土 80 cm,配筋率 $\rho=0.49\%$,从而计算得出 $B_2/B_0=0.38$ 。可见,由于裂缝的存在,极大降低了支护结构的承载能力。

4 加固方案设计

4.1 加固设计原则

(1)由于拱顶及两边墙二衬均出现裂缝,且部分衬砌渗水现象严重,因此,加固方案以不破坏现有二次衬砌为原则,以免发生施工危险。

(2)尽可能不破坏现有衬砌的防水结构,建议以排为主。

(3)由于明洞段的施工特殊性,不宜对二衬开槽,因此,采用在现有衬砌中加套拱的办法。同时,考虑到过水断面加固处理的难度,拟定在右侧过水断面与左侧路面等高处设置混凝土支墩,用于支撑套拱拱脚。

(4)根据计算结果,暗洞段采用素混凝土支护的设计安全系数满足规范要求。因此,对相应区段的裂缝处理可以采用灰浆抹面的方式;对渗漏水处采用开槽加排水管和喷射混凝土的处理方式。

(5)由于施工因素,在暗洞段,设计本应采用钢筋混凝土的区段,以及虽然采用钢筋混凝土衬砌,但是钢筋量不满足设计要求的区段,造成衬砌结构安全系数不足。由于安全系数降低过多(比如 1 号暗洞断面 K0+117 安全系数只有 0.48),同时,由于该区段多位于洞口,受力较为复杂,因此,对该区段也采用钢拱架进行加固。

4.2 加固设计

加固设计见图 3;施工过程如下所述。

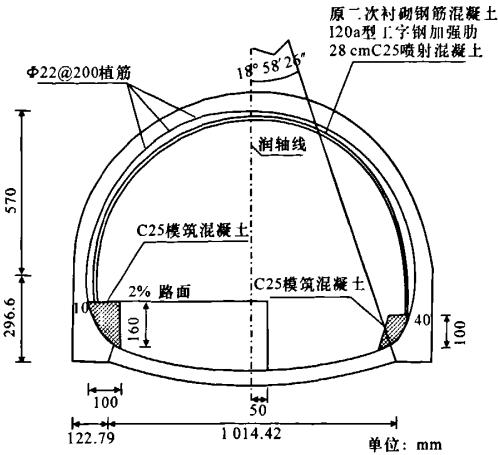


图 3 加固设计

(1) 在左侧设置顶宽 100 cm 的 C25 混凝土支墩, 右侧过水断面设置顶宽 80 cm 的 C25 混凝土支墩; 考虑到右侧水流对支墩的影响, 右侧支墩进行 4 : 1 放坡处理, 并进行植筋以提高支墩的稳定性。

(2) 在二次衬砌内纵向每隔 0.55 m 设置一个 I20a 型工字钢拱架。

(3) 沿设置钢拱架的位置, 按照设计图, 钻设植筋锚固孔, 孔深 40 cm; 采用环氧树脂将植筋通过锚固孔与二衬混凝土粘结, 植筋采用 Φ22 螺纹钢并弯折成“L”型与钢拱架焊接为一体; 钢拱架外翼缘板焊接 Φ8 钢筋网片 (150 mm×150 mm); 采用 C25 喷射混凝土充填加固, 喷射混凝土厚度为 28 cm。

(4) 为保证修补层与原二次衬砌混凝土之间的粘结力, 从而形成一个有机整体, 应将二次衬砌表面冲洗干净, 喷涂一层混凝土粘结用胶粘剂。

(5) 严格控制喷射混凝土质量, 喷射混凝土施工质量应符合《公路隧道施工技术规范》的规定; 要求喷射混凝土表面圆顺, 断面符合设计要求, 不得产生超限。

(6) 为了保证喷射混凝土补强层内表面美观, 进行喷漆处理; 在喷漆前需要保证一定的平整度, 喷漆之后确保加固后衬砌表面平整美观。

4.3 加固方案验算

加固后结构安全系数计算参照文献[1]和文献[9]进行; 加固后的具体计算参数见表 8。计算参数可根据现场地质条件, 参照文献[1]荷载计算中围岩压力的计算方法进行计算。同时, 加固段为明挖回填, 只有钢筋混凝土衬砌一层衬砌结构, 因此, 荷载全部作用在所加固的衬砌上。

表 8 计算参数

围岩级别	围岩重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	二次衬砌重度 γ' / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	弹性抗力系数 k / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	上部围岩压力 Q /kPa	拱顶水平侧压力 q_s /kPa	拱底水平侧压力 q_x /kPa
V	20	25	200	536	145	197

采用同济大学曙光软件进行计算, 建模及计算结果见图 4~图 6^[10]。由计算结果可知, 最不利截面位于拱顶, 内力统计及安全系数见表 9^[11]。

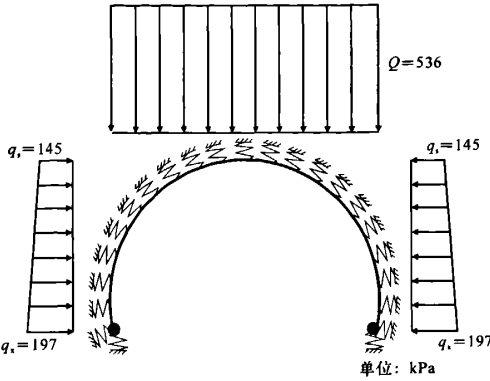


图 4 计算模型及荷载分布

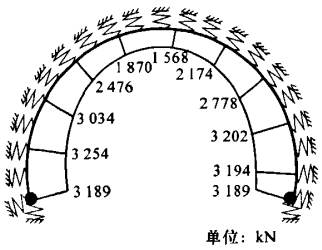


图 5 节点轴力

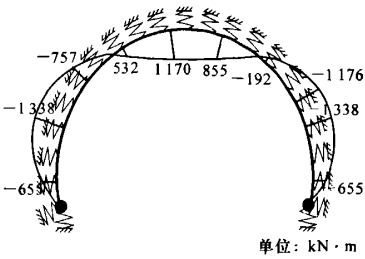


图 6 节点弯矩

表 9 计算结果

最不利截面内力		安全系数	位置
弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	轴力/kN		
1 265	1 688	2.69	拱顶

由表 9 可知, 安全系数为 2.69, 满足文献[1]的要求 (不小于 2.4), 故加固方案可行。

4.4 加固注意事项

(1) 在原二次衬砌变形缝两侧, 均需设置加强工

字钢拱架。

(2)根据原二次衬砌变形缝的位置设置变形缝,当原二次衬砌在很长距离没有设置变形缝时,补强层也应根据裂缝开裂情况,每隔 20~30 m 设置一处变形缝。

(3)由于目前隧道裂缝发育较快,在施工过程中应注意加强安全措施,防止出现二衬掉块,以免危及施工人员的安全。

(4)由于部分衬砌出现渗水现象,因此,在进行补强时,宜采用开槽埋管的排水法处置,并注意以下事项:①水管的位置、间距应根据涌水量的大小和位置等情况确定;②水管不得堵塞,管道材料应具有抗老化性和足够强度;③当采用开槽埋管法时,衬砌表面可用氯丁橡胶等材料覆盖。

(5)施工中采用的胶粘剂与混凝土界面剂的质量参数,均应符合文献[9]的规定。

5 结 语

(1)采用综合方法,对隧道裂缝进行详细调查,获得了裂缝的控制性参数,并采用裂缝判断标准对衬砌安全性进行了评价。

(2)基于刚度退化理论,对带裂缝隧道衬砌结构的安全性进行了计算,为隧道进行加固处理提供了理论依据。

(3)采用增大截面法对隧道进行加固处理,经验证,计算后的衬砌结构满足安全系数的要求。

(4)中国目前还没有专门针对隧道加固的设计规范及相关标准,隧道的加固设计具有一定的盲目性,因此,制定专门的隧道加固设计规范势在必行。

(5)为了使加固设计更具有针对性,应该建立一套完善的隧道健康诊断系统,亟需在后续的研究中进一步完善。

参考文献:

References:

- [1] JTGD70 2004,公路隧道设计规范[S].
- [2] 荣 耀,许锡宾,蔡晓鸿.基于弹性地基梁法的隧道衬砌裂缝间距和宽度的计算[J].重庆建筑大学学报,2006,28(5):23-26.
RONG Yao, XU Xi-bing, CAI Xiao-hong. Calculation of crack space and crack width of tunnel lining based on elastic foundation carved beam model[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5): 23-26.
- [3] 蒲春平,夏才初,李永盛,等.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,2000,13(2):76-79.
PU Chun-ping, XIA Cai-chu, LI Yong-sheng, et al. Study of thermo-stress of highway tunnel and the law of line-fissure development caused by the thermo-stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 76-79.
- [4] 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 Hong-ke, YANG Lin-de, 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.
- [5] 吴新璇.混凝土无损检测技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [6] 罗立娜.碳纤维补强条件下公路隧道衬砌计算方法的研究[D].上海:同济大学,2006.
- [7] 胡仁东,赵志伟.公路裂缝探测方法[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(1):31-34.
HU Ren-dong, ZHAO Zhi-wei. Detecting method of highway fractures[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(1): 31-34.
- [8] 顾祥林,许 勇,张伟平.钢筋混凝土梁开裂后刚度退化研究[J].结构工程师,2005,21(5):20-23.
GU Xiang-lin, XU Yong, ZHANG Wei-ping. Study on stiffness deterioration of RC beams after cracking[J]. Structural Engineers, 2005, 21(5): 20-23.
- [9] GB 50367—2006,混凝土结构加固设计规范[S].
- [10] 黄志义,王金昌,朱向荣.含裂缝沥青混凝土路面的粘弹性断裂分析[J].中国公路学报,2006,19(2):18-23.
HUANG Zhi-yi, WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong. Viscoelastic fracture analysis of asphalt concrete pavement with cracks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 18-23.
- [11] 陈建勋,李建安.公路隧道二次衬砌厚度的优化[J].交通运输工程学报,2006,6(3):68-72.
CHEN Jian-xun, LI Jian-an. Secondary lining thickness optimization of road tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 68-72.