

文章编号:1671-8879(2007)01-0045-05

黄土公路隧道衬砌开裂分析

来弘鹏¹, 杨晓华¹, 林永贵²

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 广州市市政工程设计研究院, 广东 广州 510060)

摘要:衬砌开裂是黄土公路隧道普遍存在的病害。为了预防和处治衬砌开裂,保证黄土隧道结构的长期稳定性,针对甘肃省榆中县新庄岭黄土公路隧道衬砌开裂的病害特征,运用数值仿真、实测等手段分析了病害产生的机理和原因。结果表明,黄土浸水导致土体强度降低、变形增大,从而增大了围岩塑性区范围和变形压力,恶化了衬砌结构受力状况,使衬砌结构拱顶内侧及拱脚外侧被拉裂,进而使拱脚内侧被压裂。根据隧道病害状况,提出了采用环氧树脂嵌补及凿槽嵌入钢拱架法处治衬砌开裂的建议,为分析和处治黄土公路隧道衬砌开裂提供了依据。

关键词:隧道工程;黄土;公路隧道;衬砌开裂;处治措施

中图分类号:U456.31

文献标志码:A

Analysis on lining cracks of highway tunnel in loess area

LAI Hong-peng¹, YANG Xiao-hua¹, LIN Yong-gui²

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, Guangdong, China)

Abstract: The lining cracks are widespread diseases of highway tunnel in the loess. In order to prevent the lining cracks and ensure the safety of highway tunnels, based on the disease characteristic of lining cracks on Xinzhuangling highway tunnel in loess, the developing mechanism and reason of lining cracks are analyzed through numerical simulation and field observation. The results demonstrate that water infiltration can lead to the decrease of soil strength and the increase of soil deformation, so the rock plastic area and deformation pressure are increased, the mechanical characteristic on lining is deteriorated, the cracks occur on inside of arch top and outside of arch foot by over tension, the cracks occur on inside of arch foot by over pressure. Considering the actual disease of the tunnel, the lining cracks should be maintained by resin and lattice girder implanting. The results provide a theory basis for treating these diseases in loess highway tunnel. 3 tabs, 10 figs, 10 refs.

Key words: tunnel engineering; loess; highway tunnel; lining cracks; treating measurement

0 引言

随着西部大开发战略的实施,黄土地区交通建

设迅速发展,黄土地区公路隧道不断增加。而黄土形成时代相对较晚,其物理力学性质相对较差,加之黄土地区的地形地貌、水文地质、气候等条件比较复

杂,导致黄土地区隧道修筑与运营过程中病害较多,部分隧道甚至使用几年就出现了比较严重的隧道病害,如衬砌裂损、隧道渗漏水、基底下沉和底鼓等。对部分黄土公路隧道病害的调查表明,70%的隧道要发生衬砌裂损病害,占整个隧道病害的40%左右。隧道衬砌裂损造成的危害较多,如衬砌结构失稳破坏、安全可靠性降低、净空变小而侵限、危及行车安全等。这些病害既影响了隧道作为快速安全交通通道的功能,又会花费大量的维修资金,这显然是与建设隧道的初衷相违背^[1-7]。为了预防和处治黄土隧道衬砌开裂,保证黄土隧道结构的长期稳定性,本文通过对甘肃省榆中县新庄岭黄土公路隧道衬砌开裂病害调查和理论分析,探讨了病害产生机理,并给出了处治措施建议。

1 工程概况

新庄岭隧道分上下行线。上行线桩号 K60+800~K62+255,全长 1 455 m;下行线桩号 K60+818~K62+240,全长 1 422 m。隧道地处黄土山梁,地表被厚层黄土所覆盖,地层岩性单一,工程地质、水文地质条件简单。根据勘探资料,隧道位置分布的地层岩性从上至下可分为两层,上层为第四系上更新统新黄土(Q_3^{col}),浅黄色,土质较均匀、疏松、大孔隙,垂直节理发育,层厚 4.6~40 m,山顶较厚,隧道进出口及中间沟底较薄;下层为第四系中更新统老黄土(Q_2^{al-pl}),与上伏黄土呈不整合接触,灰黄、褐黄、红褐色,土质较均匀,结构较致密,局部较疏松。山顶为水浇地,隧道洞身土体含水量较大,结构稳定性较差。

隧道断面轮廓设计采用单心圆方法,一次模筑混凝土衬砌和二次模筑混凝土衬砌均为 C25 混凝土。一次衬砌拱顶厚 45 cm,在起拱线处厚 65 cm;二次衬砌厚 35 cm,仰拱采用 C20 混凝土,厚 45 cm。仰拱与路面填充层采用 15# 片石混凝土,拱圈、边墙衬砌及仰拱内设格栅拱架支撑作为永久性支撑,格栅拱架每 2 m 设一榀。

2 裂缝特征

自 2002 年 8 月 18 日隧道交验以前,隧道结构各部位未发现裂缝。从 2003 年 5 月份起(正值地表农田灌溉以及雨水较多季节)开始在隧道内发现裂缝,裂缝主要出现在拱顶、墙部。超声波探伤检测结果表明,二衬裂缝深度超过 25 cm 的有 18 处,占 66.7%,小于 25 cm 的有 9 处,占 33.3%,且均大于

10 cm。裂缝统计结果见图 1~图 2。

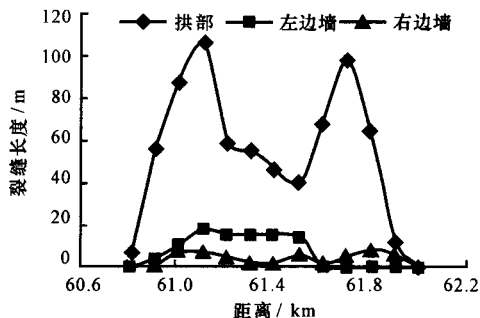


图 1 上行线洞内裂缝长度(每 100 m 累计)

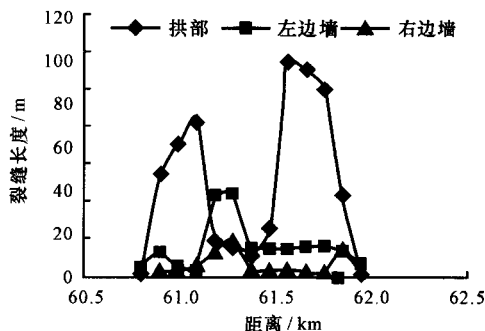


图 2 下行线洞内裂缝长度(每 100 m 累计)

3 裂缝原因仿真分析

3.1 计算模型

3.1.1 本构模型

本文采用商业软件 ANSYS 程序对典型断面进行了仿真计算。数值分析中,采用 8 节点三维实体单元(SOLID45)模拟围岩,围岩材料特性按均质弹塑性体考虑,材料力学特性假定遵循 Drucker-Prager 屈服准则。当材料进入塑性状态后,其应力应变关系由塑性理论中的增量法求解。采用 8 节点三维实体单元(SOLID65)模拟混凝土衬砌。该单元中引入一些混凝土基本特征,如:拉应力超过抗拉强度后会开裂、压应力超过抗压强度后会压碎等。而且,该模型能处理材料非线性问题,可以在 3 个正交方向上开裂,还具有压碎、塑性变形和蠕变等性质。考虑到混凝土材料的非线性,裂缝模拟采用混凝土(CONCRETE)材料,屈服准则仍使用 Drucker-Prager 准则来判定。混凝土材料模型主要是用来模拟衬砌裂损,它的屈服准则可以表示为

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0$$

式中: F 为基本应力状态下($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)的应力函数, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向上的基本应力; S 为由基本应力和 5 个输入参数 $f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2$ 确定的屈服面; f_c 为材料单轴抗压强度; f_t 为材料单轴抗

拉强度; f_{cb} 为双轴抗压强度; f_1 、 f_2 为 f_c 的相关参数; $f_{cb}=1.2f_c$, $f_1=1.45f_c$, $f_2=1.725f_c$ 。

在结构分析中,上式不满足,则材料就不会出现拉裂和压碎情况;如果上式满足,当结构中主应力只有拉应力时,则材料将被拉裂;反之,当主应力都为压应力时,材料将被压碎。

3.1.2 几何模型与计算工况说明

在有限元计算中,边界约束条件对计算结果影响较大。因此,为尽量减少边界约束条件对计算结果产生的不利影响,计算模型的边界范围按照以下原则进行了确定,即有限元计算模型所取的地层范围是:水平方向均取距隧道两边 35 m 为限,底部边界为距隧道底 35 m,而隧道上方按实际埋深取值,隧道纵向取 30 m 计算。

新庄岭隧道衬砌开裂是由于隧道施工完成后,季节性降水、农田灌溉用水入渗(即黄土浸水)造成的。为近似了解浸水后隧道周围土体和衬砌结构受力及变形特性,将浸水范围确定为隧道上部土体全部浸水的极端情况。计算中采用 3 种工况对这一过程进行了模拟:①采用隧道施工时的参数模拟隧道及周围土体刚施工完的受力变形性状;②隧道施工完成以后,通过改变土体参数模拟土体浸水但还未饱和时隧道及周围土体的受力变形性状;③隧道施工完成以后,采用土体饱和参数模拟土体浸水饱和时隧道及周围土体的受力变形性状。

3.1.3 计算参数选取

土体计算参数参考文献[1-2]选取,黄土计算参数见表 1;衬砌结构参数见表 2。

表 1 黄土计算参数					
工 况	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 C / kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
工况 1	120	0.33	18	150	23.0
工况 2	60	0.33	18	54	22.8
工况 3	20	0.33	18	18	22.0

表 2 衬砌结构参数					
弹性模量/ MPa	泊松比	粘聚力 C / MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	单轴抗拉 强度/MPa	单轴抗压 强度/MPa
30 000	0.167	4	55	1.7	15.5

3.2 计算结果分析

3.2.1 衬砌结构应力与变形分析

图 3、图 4 分别为工况 3 衬砌结构裂缝出现时应力图及裂缝分布图。表 3 为不同工况衬砌结构典型位置应力与变形。

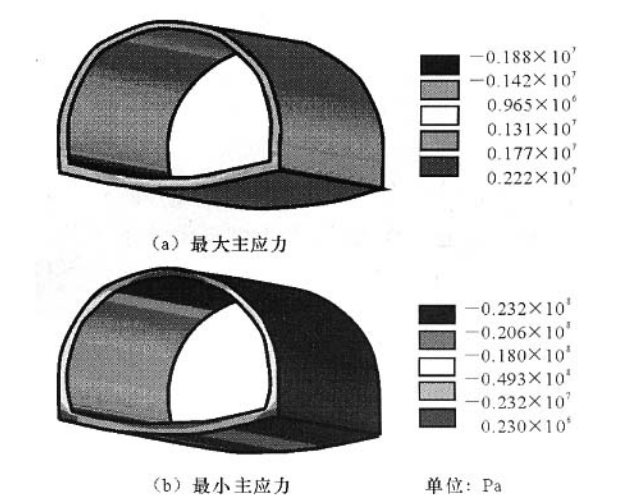


图 3 工况 3 衬砌结构裂缝出现时最大、最小主应力

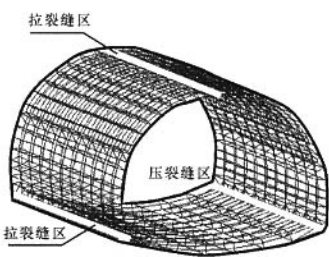


图 4 工况 3 衬砌结构裂缝分布

表 3 不同工况衬砌结构典型位置应力与变形

参 数	工况 1	工况 2	工况 3
最大拉应力/MPa	1.41(拱脚外侧)	1.63(拱脚外侧)	2.22(拱脚外侧、拱顶)
最大压应力/MPa	12.6(拱脚内侧)	14.8(拱脚内侧)	18.3(拱脚内侧)
最大竖向变形/mm	17.2(拱顶)	24.1(拱顶)	33.4(拱顶)
最大水平变形/mm	0.69(边墙)	1.25(边墙)	1.94(边墙)

由图 3、图 4 和表 3 可知,随着土体含水量的增加,衬砌结构最大应力明显增加。工况 3 衬砌结构拱顶内侧及拱脚外侧最大主应力值已经超过了混凝土的极限抗拉强度,故衬砌结构被拉裂;而拱脚内侧最大压应力值也超过了混凝土的极限抗压强度,故衬砌结构被压裂。另外,由表 3 可知,随着土体含水量的增加,衬砌结构变形明显增大,尤其是拱顶处竖向位移,工况 1 在该处位移 17.2 mm;工况 2 在该处位移 24.1 mm;工况 3 在该处位移增为 33.4 mm。这是由于随着土体浸水量的增加,土体的强度降低,变形增大,而土体要完成这部分增大的位移,势必要对衬砌产生挤压,形成形变压力。随着围岩变形的进一步发展,衬砌所受形变压力逐渐增大,衬砌所承担的支护力逐渐增大,变形也增大。

3.2.2 围岩塑性区分析

由塑性区分布图 5~图 7 可知,工况 1 仅在边

墙外侧及仰拱靠近边墙的底部出现小部分塑性区;工况 2 不仅使工况 1 原有塑性区范围增大,而且拱腰处出现了类似猫耳朵的塑性区;工况 3 则在前两种工况原有塑性区显著增大的同时,还在拱顶处出现了大范围的塑性区。这说明,随着土体浸水量的增加,由于黄土的水敏性,即天然低湿度下明显高强度和低压缩性的黄土,一旦浸水会发生强度大幅度降低和变形突增的特性,致使土体强度明显降低,围岩塑性区显著扩大。尤其是工况 3,隧道拱顶上方大范围塑性区的形成,使围岩出现了松动塌落,降低了围岩的自承能力,致使土体中原来由围岩承担的地层压力,转嫁到衬砌结构上,严重恶化了衬砌结构受力性状。这一计算结果正好验证了新庄岭隧道衬砌开裂的现象。

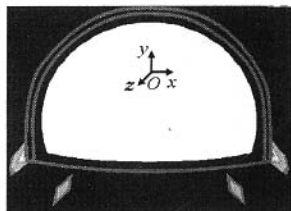


图 5 工况 1 围岩塑性区

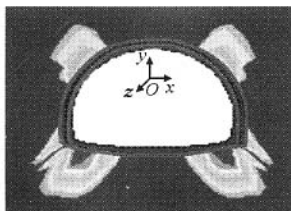


图 6 工况 2 围岩塑性区

4 实测分析

新庄岭隧道现场测试元件是在隧道修筑时埋入的,测试内容包括:拱圈围岩压力、边墙围岩压力、仰拱围岩压力、二衬和一衬接触压力、一衬边墙底部压力和二衬边墙底部压力、二衬混凝土应变和格栅拱钢筋轴力。这里仅列出拱圈围岩压力、二衬和一衬接触压力进行分析^{[1]:99,102}。测试压力盒布置见图 8,测试压力与时间的变化见图 9、图 10。

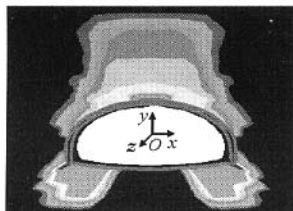


图 7 工况 3 围岩塑性区

实测结果表明,出现拱部围岩压力、二衬压力突

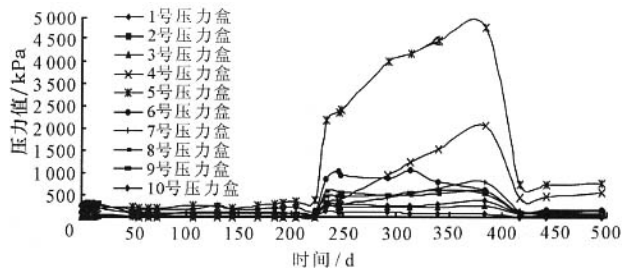


图 9 拱部围岩压力与时间的变化曲线

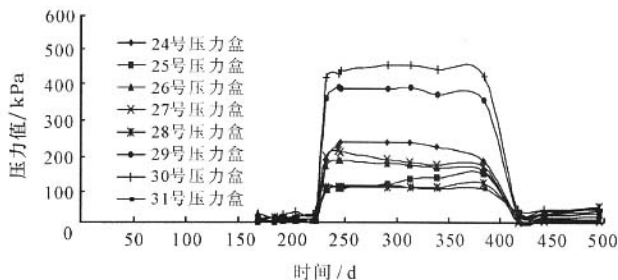


图 10 二衬压力与时间的变化曲线

然增大现象时,正是地表农田灌溉以及雨水较多季节,隧道周围土体有水浸入。上面的计算结果及分析基本解释了这一变化现象^[8-10]。

5 建议处治措施

衬砌开裂是在围岩压力作用下,衬砌因变形而发生的一种破坏。衬砌开裂病害处治应从两方面进行:一是提高围岩自身的力学性能,增强自承能力,减小围岩压力;二是增加支护体的刚度和强度。由于新庄岭隧道衬砌开裂是运营期间发生的,所以实施增强围岩自承能力方案比较困难。本文建议增加支护体的刚度和强度。具体措施为:

(1)衬砌裂缝的处治。衬砌裂缝 $<5\text{ mm}$ 时,采用环氧树脂嵌补。

(2)嵌补钢拱架加固。衬砌裂缝 $\geq 5\text{ mm}$ 时,二次衬砌凿槽嵌入全封闭 I16 型钢钢架,凿槽尺寸为 $20\text{ cm}\times 25\text{ cm}$,型钢钢架间距为 1 榀/m,并用膨胀水泥嵌补,使钢架与衬砌形成整体。

6 结 语

(1)根据新庄岭隧道具体情况,指出隧道衬砌开裂是由于隧道施工完成后,季节性降水、农田灌溉用水入渗(即黄土浸水)造成的。

(2)通过仿真分析得出黄土浸水导致土体强度降低,变形增大,从而增大了围岩塑性区范围和变形压力,恶化了衬砌结构受力状况,使衬砌结构拱顶内侧及拱脚外侧衬砌结构被拉裂,而拱脚内侧衬砌结构被压裂。

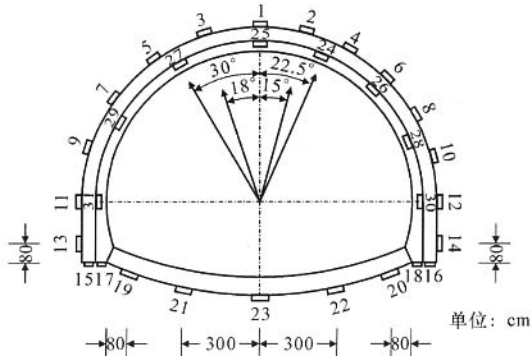


图 8 压力盒布置

(3)针对该隧道的病害特征,建议采用环氧树脂嵌补及凿槽嵌入钢拱架法处治衬砌开裂。

参考文献:

References:

- [1] 赵占厂. 黄土公路隧道结构工程性状研究[D]. 西安:长安大学,2004.
 - [2] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报,2001,32(7):79-83.
DANG Jin-qian, LI Jing. The structural strength and shear strength of unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(7): 79-83.
 - [3] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):3-12.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-12.
 - [4] 赵占厂,谢永利,杨晓华,等. 黄土公路隧道衬砌受力特性测试研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):66-69.
ZHAO Zhan-chang, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua, et al. Observation research on the mechanical characteristic of highway tunnel lining in loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 66-69.
 - [5] 杨新安,黄宏伟. 隧道病害与防治[M]. 上海:同济大学出版社,2003.
 - [6] 杨晓华,谢永利. 公路隧道坍方综合处治技术[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):61-64.
YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Synthetical treatment technique for highway tunnel collapse[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 61-64.
 - [7] 来弘鹏,谢永利,杨晓华. 黄土公路隧道受力特性测试[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):53-56.
LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Mechanical characteristic of highway tunnel in loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 53-56.
 - [8] 夏才初,李永盛. 地下工程测试理论与监测技术[M]. 上海:同济大学出版社,1999.
 - [9] JTJ 026-90,公路隧道设计规范[S].
 - [10] 景宏君,张斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2):14-18.
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess subgrade strength law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 14-18.
-
- (上接第26页)
- LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Rainfall erode mechanism on loess road shoulder and tope of side-slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Sciences Edition, 2004, 24(2): 27-29.
 - [3] 丁云峰,李占斌. 土壤抗蚀性的动态研究[J]. 水土保持科技情报,2001,(1):36-39.
DING Yun-feng, LI Zhan-bin. Soil corrosion resistant dynamic research[J]. Conservation of Water and Soil Scientific and Technical Information, 2001, (1): 36-39.
 - [4] 李家春,郭平,周怀治. 黄土地区公路排水沟渠出口破坏机理及工程防治[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(4):26-30.
LI Jia-chun, GUO Ping, ZHOU Huai-zhi. Damage mechanism and protection of highway ditch exit at loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 26-30.
 - [5] 汪益敏,王秉纲. 公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J]. 中国公路学报,2005,18(1):24-29.
WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy evaluation method of scouring stability on soil subgrade slop[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 24-29.
 - [6] 李家春. 黄土山区高等级公路排水技术研究[D]. 西安:长安大学,2000.
 - [7] 唐大雄,孙隽文. 工程岩土学[M]. 北京:地质出版社,1987.
 - [8] 苗英豪,胡长顺. 土工格栅加筋陡边坡路堤位移特性的试验研究[J]. 中国公路学报,2006,19(1):47-52.
MIAO Ying-hao, HU Chang-shun. Research on displacement characteristics of geogrid reinforced embankment with steep slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 47-52.
 - [9] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
 - [10] 石刚,王晋国,支喜兰,等. 黄土地区公路工程地基承载力仓区计算方法[J]. 交通运输工程学报,2005,5(4):48-52.
SHI Gang, WANG Jin-guo, ZHI Xi-lan, et al. Calculation method of foundation bearing capacity based on division in loess area for highway engineering[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 48-52.