

黄土公路隧道受力特性测试

来弘鹏, 谢永利, 杨晓华

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:为了解黄土公路隧道围岩压力及衬砌受力的特性,通过对青土峁隧道的现场测试,研究了一次衬砌和仰拱围岩压力、格栅拱架钢筋轴力、一次衬砌和二次衬砌接触压力以及仰拱和二次衬砌混凝土的应力应变随时间变化规律及分布特性。结果表明,围岩与一次衬砌接触压力分布不均匀,边墙底部表现出了较大压力,格栅拱架钢筋轴力稳定较快且全部受压,二次衬砌和仰拱承受较小的荷载。

关键词:隧道工程;公路隧道;黄土;围岩压力;现场测试;衬砌

中图分类号:U451.2 **文献标识码:**A

Mechanical characteristic of highway tunnel in loess

LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua

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

Abstract: In order to know the surrounding rock pressure and the lining mechanical characteristic of highway tunnel in loess, with a case study in field of Qingtuxian tunnel, the changing regulations of the surrounding rock pressure are presented, which acts on the first lining and invert, axial force of lattice girder, contact stress between the first and second lining, and strain of the second lining. The results show the contact stress between surrounding rock and the first lining is not symmetrical, the pressure of side wall is relatively large, axial force of the lattice girder become steady in a short time, lattice girder is all at pressure and the bearing functions of the second lining and invert are not obvious. 2 tabs, 11 figs, 8 refs.

Key words: tunnel engineering; highway tunnel; loess; surrounding rock pressure; field measure; lining

0 引言

围岩压力一直是隧道与地下工程重要的研究课题,按荷载结构模型进行地下洞室衬砌设计时,围岩压力的确定是关键。20 世纪 20 年代以前,主要是古典的压力理论阶段,这类理论认为作用在支护结构上的压力是其上覆岩土层的质量。随着开挖深度

的增加,越来越多地发现古典压力理论不符合实际情况,于是又出现了散体压力理论,可以作为代表的有太沙基公式和普氏理论及谢家杰公式。长期以来,中国的地下洞室围岩压力计算大多采用了这些理论,大量工程实践表明,依此计算的围岩压力与实测值有较大的差距^[1]。随着西部大开发战略决策的实施,促进了西部地区高等级公路的迅猛发展,穿越

黄土地区的公路隧道也越来越多。由于黄土强度较低,开挖扰动后变形大等特点,以往的围岩压力公式是否依然适用?黄土公路隧道较多采用的两层锚筑混凝土衬砌这一传统的强支护方法中每个组成部分的荷载特性如何?这一系列的问题都值得工程技术人员研究与思考。本文结合实际工程对围岩压力和衬砌受力特性进行现场实测研究,以期提高黄土公路隧道的设计水平。

1 工程概况与测试方案

1.1 工程概况

青土峁隧道位于陕西黄土高原西端与祁连山东延部分交接地带,上覆 5~20 m 风成黄土,下卧砂岩,中夹泥岩、粉砂岩,地形属黄土梁峁。隧道范围主要出露白恶系地层与第四系地层。围岩类别全部为 II 类围岩。青土峁隧道地质剖面力学参数见表 1。

表 1 地质剖面力学参数

隧道名称	地层岩性	天然容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	天然含水量/%	液限/%	塑限/%	凝聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	饱和度/%
青土峁新近堆积黄土		15	9.6	24.43	16.57	13	25	26.76

该隧道为上、下行分离的 2 座独立隧道,长 430 m,内设 -2.657% 的单向坡。隧道按单圆断面型式衬砌,内弧半径 5.55 m,拱顶净高为 7.19 m,拱圈、边墙、仰拱均为 C25 混凝土,路面为 25 cm 厚 C35 混凝土,仰拱填充为 C15 片石混凝土。

隧道衬砌结构分为深、浅埋两种形式:深埋衬砌为变截面,拱顶衬砌厚度为 75 cm,仰拱厚度为 45 cm,复合式衬砌由 40 cm 一次衬砌及 35 cm 二次衬砌组成,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 1 m 设一榀;浅埋衬砌结构也为变截面,拱顶衬砌厚度为 80 cm,仰拱厚度为 50 cm,复合式衬砌由 45 cm 一次衬砌及 35 cm 二次衬砌组成,拱圈、边墙衬砌内设格栅拱架支撑作为永久性支撑,格栅拱架每 1 m 设一榀,仰拱内设钢筋格栅作为永久性支撑,钢支撑每 1 m 设一榀。

施工方法采用微台阶先拱后墙法,严格按照“管(杆)超前、少扰动、短进尺、强支护、留核心、勤量测、早封闭”的施工原则进行施工。

1.2 测试目的与方案

1.2.1 测试目的

现场量测的目的是掌握围岩稳定与支护受力、变形的动态和信息,并以此判断设计、施工的安全与经济。以前隧道的设计完全依赖于经验,但随着理

论分析手段的迅速发展,其分析结果越来越被人们所重视,也提出了更高的要求,理论研究结果须经实测数据检验。因此系统地组织现场测试,研究岩体和结构的力学性态,对于发展隧道理论具有重要意义。

青土峁隧道现场测试的主要目的是:了解围岩与一次衬砌、一次衬砌与二次衬砌之间的接触压力;了解格栅拱架的应力应变及对整个支护结构的作用;验证二次衬砌的设计效果,提供优化设计的依据;全面了解整个衬砌的受力特性,为合理衬砌结构型式的设计提供依据。

1.2.2 测试方案

现场测试内容包括:一次衬砌和围岩的接触压力;二次衬砌和一次衬砌之间的接触压力;格栅拱架钢筋的轴力;二次衬砌和仰拱的混凝土应变。测试元件全部采用振弦式元件,以满足长期稳定的要求^[1]。其中钢筋计在花拱架内外两侧各布置一支。测试元件布置见图 1。

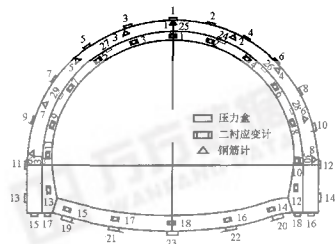


图 1 测试元件布置图

2 测试结果分析

青土峁隧道测试断面边墙施工距拱部衬砌施工为 69 d,仰拱施工距边墙施工为 28 d,二衬施工距仰拱施工为 18 d,现场测试从 2002 年 7 月开始。测试元件基本完好,因受隧道施工影响,青土峁隧道测试数据收集较晚。考虑到施工可能对引线及测试元件造成的损坏,故测试元件布设较多。通过近一年的现场观测,获得了大量宝贵数据。

2.1 围岩压力

由图 2 拱部围岩压力时间变化曲线可知,8 号压力盒位置压力值较大,是由于这侧土体强度较低,土体发生局部坍塌,压力盒埋设过程中已发现这一点。衬砌拱腰位置以上压力随时间略有增长,但幅度较小,拱腰位置以下位置压力变化不大。4 号和 5 号位置压力值相对较大,围岩压力“猫耳朵”分布形状较为明显。

由图3墙部压力时间变化曲线可知,一次衬砌底部15号和16号压力盒压力值较大,这是由于这2个位置承受了大部分隧道衬砌所受的垂直压力所致,设置这2个压力盒的目的是想综合二次衬砌底部(17号和18号)压力值和仰拱压力值,近似计算出隧道衬砌所受的垂直土压力,也可近似计算出二次衬砌所承担的垂直土压力的比例。一次衬砌边墙底部压力值随时间逐渐增大,这一点与拱腰以上衬砌压力也略有增大是对应的,左侧墙底压力较右侧要大,与拱部衬砌压力大小分布情况是一致的。边墙侧向压力和拱腰以下衬砌压力一样随时间变化不大。

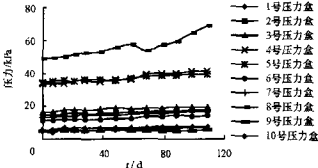


图2 拱部围岩压力-时间变化曲线

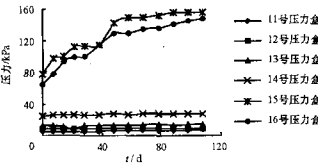


图3 墙部压力-时间变化曲线

由图4可知,二衬砌底部压力和仰拱压力在测试前10 d内增加较大,而后幅度略有减小,这一点与一衬砌拱部和墙底压力是对应的。左侧二衬砌底部压力大于右侧二衬砌底部压力,仰拱压力两端大中间略小。由表2可以看出,青土岷隧道按实测值推算结果要小于按太沙基公式、谢家德公式和《公路隧道设计规范》计算结果^[2,3],这一规律同土家湾隧道^[4]一样,进一步说明了现有计算方法在计算埋深较浅隧道围岩压力时存在的问题。

由图5围岩压力分布图可进一步看出,接触压

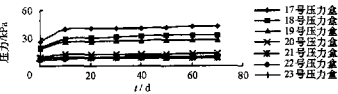


图4 仰拱及二衬底部压力-时间变化曲线

表2 不同方法计算隧道衬砌垂直土压力

方法	太沙基公式	谢家德公式	文献[2]	实测值推算结果
压力/kPa	126.6	142.3	168.0	96.6

力分布不均匀,两侧不对称,说明压力在洞周分布的不均匀性是比较明显的,这主要是由土体的不均匀性造成的。拱部衬砌围岩压力呈“猫耳朵”分布形状。拱部衬砌右侧压力较大,与此相对应,左侧一衬砌底部、二衬砌底部和仰拱压力较右侧要大。起拱线处压力较小,边墙侧向压力越往下越大^[5]。

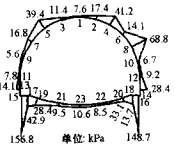


图5 2002年11月16日
围岩压力分布

2.2 格栅拱钢筋轴力

由图6格栅拱钢筋轴力时间变化曲线可知,格栅拱钢筋轴力在测试阶段基本稳定,但围岩压力值是略有增长的,是由于格栅拱柔性较大,围岩压力增长由混凝土来承担,格栅拱在混凝土强度尚未完全形成时发挥重要作用。格栅拱在拱顶和拱腰处受力较大,起拱线处受力较小。格栅拱钢筋轴力全部受压,并表现出较强的规律性^[5]。

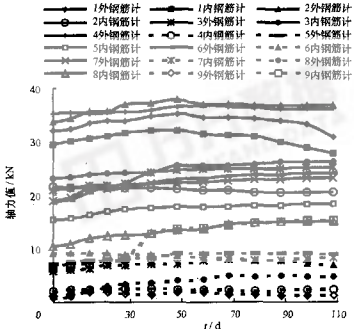


图6 格栅拱钢筋轴力-时间变化曲线

2.3 二衬砌受力和仰拱应变

由图7二衬砌压力-时间变化曲线和图8二衬砌应变-时间变化曲线可以看出,二衬砌压力和应变值基本上随时间增长,且右侧压力较左侧大,这一性状与围岩压力分布状况是一致的。二衬砌边墙部位应变较小,且左侧应变较右侧要小,二衬砌拱部应变较大,右侧应变较左侧要大,与二衬砌压力分布状况对应。青土岷隧道二衬砌垂直方向荷载分担比例为8.5%。由图9仰拱应变时间变化曲线可知,仰拱应变随时间变化规律不明显,呈中间大两端小,但量值不大。从整个测试结果来看,二衬砌的承载作用并不明显,但其对隧道内设备的支撑、防止隧道腐蚀、防水、增加隧道内美观和照明效果、通风流畅都起了

重要作用。二衬砌压力分布见图10,二衬砌与仰拱应变分布见图11^[7,8]。

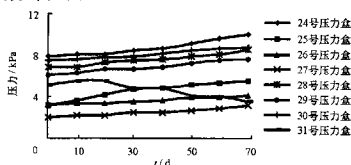


图7 二衬砌压力-时间变化曲线

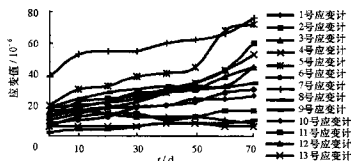


图8 二衬砌应变-时间变化曲线

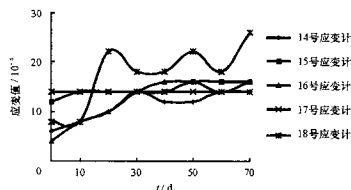


图9 仰拱应变-时间变化曲线

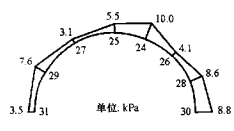


图10 二衬砌压力分布

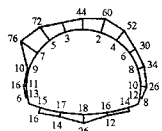


图11 二衬砌与仰拱应变分布(10⁻⁶)

3 结语

(1)围岩与一次衬砌接触压力分布不均匀,两侧不对称。接触压力最大之处并不在拱顶而是在拱腰处,说明拱腰处是最危险部位。围岩压力“猫耳朵”分布形状较为明显。

(2)边墙底部表现出了较大的压力,仰拱靠近边墙处压力较大,仰拱所受的压力较小,但是仰拱对于抵制边墙位移、提高隧道衬砌结构的刚度和承载能力仍有不可替代的作用。

(3)格栅拱架在拱顶和拱腰处的受力较大,格栅拱架钢筋轴力稳定较快,格栅拱架全部受压。

(4)总体来看二次衬砌混凝土的应变随时间在不断增大,但其承载作用并不明显。

参考文献:

References:

- [1] 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.
XIA Cai-chu, LI Yong-sheng. Test theory and measurement technology of the underground engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1999.
- [2] JTG D70-2004.公路隧道设计规范[S].
JTG D70-2004. Code for design of road tunnel[S].
- [3] TB10003-99.铁路隧道设计规范[S].
TB10003-99. Code for design of railway tunnel[S].
- [4] 赵占厂,谢永利,杨晓华,等.黄土公路隧道衬砌受力和特性测试研究[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] 杨晓华,谢永利.公路隧道塌方综合处治技术[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.
- [6] 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.
- [7] 杨晓华,俞永华.水泥-水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J].中国公路学报,2004,17(2):68-72.
YANG Xiao-hua, YU Yong-hua. Application of cement-silicate double solution grouting in loess tunnel construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 68-72.
- [8] 王兵.双车道公路隧道复合衬砌应用研究[J].中国公路学报,1997,10(4):64-69.
WANG Bing. A study of composite lining of the double-lane road tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(4): 64-69.