

围岩弹性抗力对隧道结构受力的影响分析

宋克志¹, 王梦恕²

(1. 鲁东大学岩土工程重点实验室, 山东 烟台 264025;

2. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044)

摘要: 运用荷载结构模型及有限元分析手段, 以新建 200km 时速城际铁路隧道衬砌为研究对象, 分析了围岩弹性抗力对二衬结构受力的影响。随着围岩弹性抗力的增大, 拱顶弯矩及拱肩弯矩绝对值、拱顶竖向位移变小, 而拱顶轴力及安全系数变大。说明, 围岩越坚硬, 衬砌结构受力越有利。随着二衬厚度的增大, 拱顶弯矩及拱肩弯矩绝对值变大, 而拱顶轴力、拱顶竖向位移及安全系数变小。随着混凝土强度等级的提高, 拱顶弯矩、拱肩弯矩及安全系数变大, 拱顶轴力和拱顶竖向位移变小, 但这些量值的变化幅度较小, 说明混凝土弹性模量对二衬受力影响很小。

关键词: 隧道; 二衬; 围岩弹性抗力; 内力

中图分类号: U456.3⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2013)01-0079-04

目前, 隧道结构一般参照《公路隧道设计规范》(JTG D70 - 2004) [1] 进行设计。规范中 9.2.1 和 9.2.2 条文明确提出了隧道衬砌设计的方法: “深埋隧道中的整体式衬砌、浅埋隧道中的整体或复合式衬砌及明洞衬砌等应采用荷载结构法计算。深埋隧道中复合式衬砌的二次衬砌也可采用荷载结构法计算”; “采用荷载结构法计算隧道衬砌的内力和变形时, 应通过考虑弹性抗力等体现围岩对衬砌变形的约束作用。”

围岩弹性抗力系数是指使围岩产生单位长度的径向位移(向围岩内方向)所需单位面积上的径向压力。岩石完整性及坚硬程度越高, 弹性抗力系数越大, 因此, 围岩弹性抗力系数与围岩级别关系较为密切。另外, 新奥法施工原理中有一个重要理念就是适时支护。即支护越早, 衬砌承受的围岩变形压力就越大, 围岩对衬砌产生的弹性抗力就越大, 反之亦然。同时, 围岩越差, 在相同的支护时机条件下, 其作用在衬砌上的围岩压力自然就大, 弹性抗力也就大。因此, 围岩弹性抗力的大小不仅仅与围岩级别有关, 还与支护施作时机(施工工艺)有关, 规范中将围岩级别与弹性抗力一一对应是有先决条件的。围

岩弹性抗力的存在对衬砌结构的受力有着较大影响, 有利于改善衬砌的内力分布。路美丽 [2] 分析了单线铁路隧道围岩弹性抗力系数对安全系数和控制弯矩的影响; 李鹏飞、张顶立、赵勇等 [3] 分析了双线铁路隧道围岩弹性抗力系数对拱顶及拱底轴力、拱顶及拱肩弯矩的影响; 赵占厂等 [4] 通过对浅埋黄土公路隧道衬砌受力现场测试, 研究了隧道衬砌围岩压力、钢拱轴力和二次衬砌混凝土应变随时间变化以及不同位置分布情况; 陈建勋等 [5] 对公路隧道复合式衬砌的内力、安全系数及洞周位移、拱顶下沉、围岩塑性区的分布等进行了分析, 评价了衬砌结构的安全性; 徐林生 [6] 也针对高速公路隧道复合式衬砌结构各施工阶段的受力特性进行跟踪监测, 详细分析了锚杆轴力、围岩压力、钢拱架内力、二次衬砌混凝土结构的受力状况。上述研究均得出了许多有益的结论, 对隧道设计及施工具有重要的指导意义。本文针对城际铁路双线大断面隧道二衬结构设计, 进一步细化分析围岩弹性抗力系数对二衬结构受力的影响。

1 工程概况

青荣(青岛 - 荣成)城际铁路秦山隧道全长 5510.0m, 位于山东省烟台市境内。地层岩性从上到下主要为: (1) 粉质粘土, 细砂、中砂; (2) 片岩及变粒岩, 含石墨黑云变粒岩、含石墨透闪岩及黑云片岩; (3) 片麻状细粒黑云二长花岗岩, 伟晶花岗岩。围岩级别 III ~ V 级。暗挖段隧道采用复合式衬砌。

秦山隧道建筑限界采用《新建时速 200 ~ 250 公

收稿日期: 2012-05-08; 修订日期: 2012-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278237); 山东省科技发展计划项目(2011YD05004)

作者简介: 宋克志(1970-), 男, 博士后, 教授, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究。

E-mail: tytskz@126.com

里客运专线铁路设计暂行规定》(铁建设[2005]140号)中的“客运专线铁路建筑限界”。轨面以上净空横断面面积采用 81.37m^2 。其标准横断面如图 1 所示。

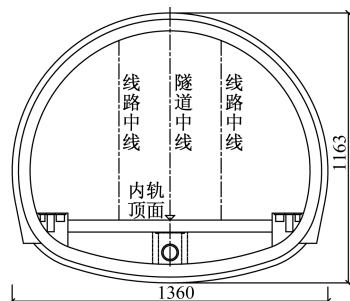


图 1 蒙山隧道标准横断面

Fig. 1 Standard cross section of the Zhenshan tunnel

2 结构计算

规定计算深埋隧道荷载工况:围岩压力按松散压力考虑,其垂直围岩压力及水平围岩压力根据规范^[7]中“4.3.3 条”相关公式进行计算。

基于荷载结构模型,采用 MIDAS/GTS 有限元程序进行不同工况下的二衬内力及变形计算。计算模型如图 2 所示。

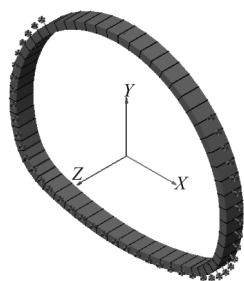


图 2 基于 MIDAS/GTS 的荷载结构模型

Fig. 2 Load structure model based on MIDAS/GTS

二次衬砌采用梁单元模拟,衬砌结构外侧用弹簧单元模拟地层反力,仅考虑弹簧受压而不考虑其受拉作用。径向弹簧采用具有非线性功能的单向弹簧单元进行模拟,该单元可以较好地模拟围岩与衬砌结构间的受力关系。

安全系数根据规范^[7]中公式(11.2.1)和式(11.2.2)计算。

为分析围岩弹性抗力对二衬结构受力的影响,对各种工况进行了数值计算,计算工况见表 1。围岩弹性抗力系数根据规范^[7]建议取值范围确定。二衬厚度及混凝土弹性模量均根据工程常用情况确定。

表 1 二衬结构计算工况表

Table 1 Calculation cases of secondary lining

围岩弹性抗力系数 (10^3 kN/m^3)	10、30、50、100、200、300、400、500、 600、700、800、900、1000			
二衬厚度(m)	0.35	0.4	0.45	0.5
混凝土弹性强度等级	C25	C30	C40	C50
混凝土弹性模量(10^5 kN/m^2)	295	310	335	355

3 结果分析

二衬厚度 0.45m、C30 混凝土、围岩弹性抗力系数 $300 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 工况下,计算荷载作用下的二衬弯矩和轴力如图 3 所示。

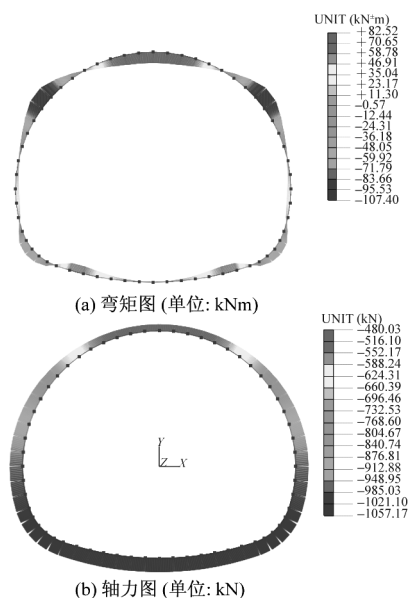


图 3 计算荷载作用下二衬内力图

Fig. 3 Internal force diagrams of secondary lining under calculation loads

由图 3 可知,计算荷载作用下二次衬砌所受的最大正、负弯矩出现在拱顶和拱肩,分别为 82.52 kNm 和 -107.40 kNm ,同时拱底两侧及墙脚也出现了较大的正、负弯矩,但一般不起控制作用;二次衬砌所受的轴力均为压力,且由拱顶到拱底逐渐增大。计算荷载作用下二衬拱顶截面由于弯矩较大而轴力较小,截面处于偏心受压状态,安全系数较小。

3.1 不同二衬厚度下的计算结果

提取各工况下的拱顶弯矩、拱顶轴力、拱肩弯矩及拱顶竖向位移并计算衬砌结构安全系数,计算结果如图 4 所示。

计算表明:(1)随着围岩弹性抗力系数的增大,拱顶和拱肩弯矩绝对值、拱顶竖向位移均呈现减小的趋

势。当弹性抗力系数在 100 kN/m^3 以下时,减小趋势明显。(2)围岩弹性抗力系数越大,拱顶轴力越大,弹性抗力系数在 100 kN/m^3 以下时,增大趋势明显。(3)围岩弹性抗力系数越大,安全系数越大。这说明在同样围岩压力作用下,围岩越软弱,衬砌结构受力越为不利。然而,当围岩弹性抗力系数超过 400 kN/m^3 以

后,二衬内力及位移变化不再明显。(4)二衬厚度越大,拱顶弯矩及拱肩弯矩绝对值越大,而拱顶轴力越小,拱顶竖向位移越小,安全系数越小。

3.2 不同混凝土弹性模量下的计算结果

根据工程上常用的混凝土强度等级,不同围岩弹性抗力系数情况下的计算结果如图5所示。

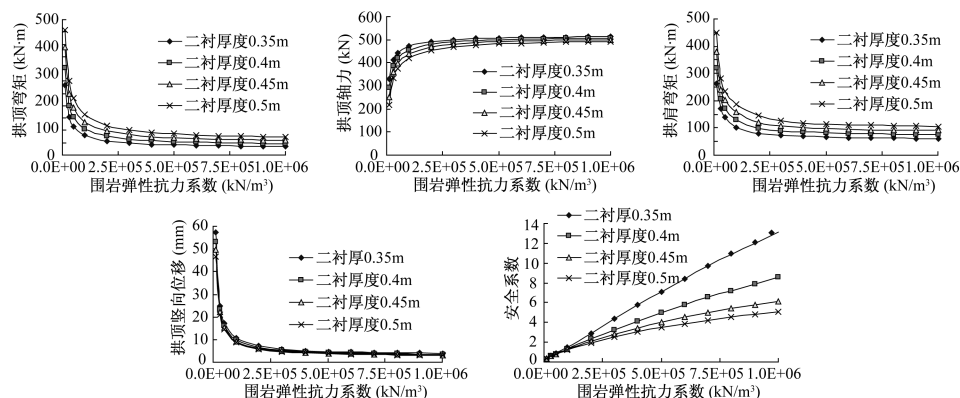


图4 常用的二衬厚度、不同围岩弹性抗力系数情况下的计算结果

Fig. 4 Calculation of general second lining thickness and different rock elastic resistance coefficients

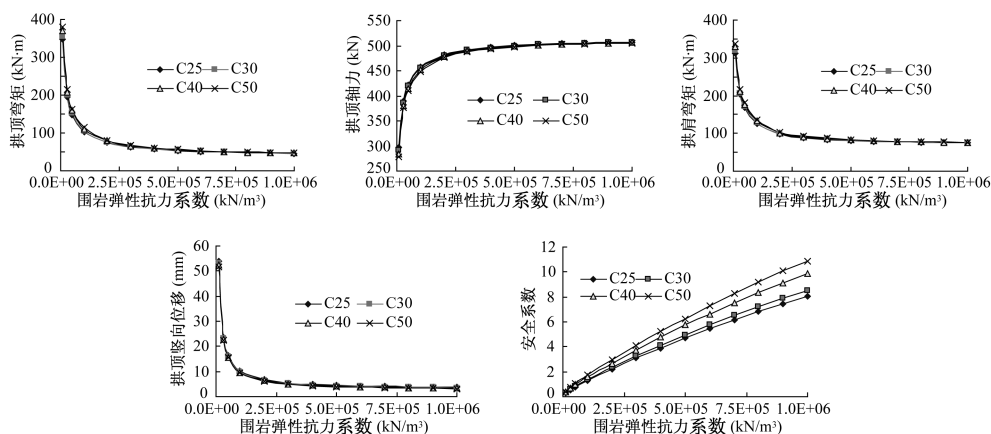


图5 常用的混凝土强度等级、不同围岩弹性抗力系数情况下的计算结果

Fig. 5 Calculation of concrete strength grade and different rock elastic resistance coefficients

由图5可知:(1)拱顶弯矩、拱顶轴力、拱肩弯矩、拱顶竖向位移及安全系数随围岩弹性抗力系数的变化而变化的规律与3.1节相同。(2)随着混凝土强度等级的提高,相应的弹性模量增大,拱顶和拱肩弯矩逐渐增大,拱顶轴力和拱顶竖向位移减小,安全系数增大,但这些量值的变化幅度较小,说明混凝土弹性模量对二衬受力影响较小(相对二衬厚度的影响)。

4 结论

(1)二衬所受的最大正、负弯矩出现在拱顶和拱肩;二衬所受的轴力均为压力,且由拱顶到拱底逐渐增

大。计算荷载作用下二衬拱顶截面由于弯矩较大而轴力较小,截面处于偏心受压状态,安全系数较小。

(2)随着围岩弹性抗力系数的增大,拱顶和拱肩弯矩绝对值、拱顶竖向位移均减小,拱顶轴力和安全系数增大。弹性抗力系数小于 100 kN/m^3 时,内力及位移变化趋势明显,而围岩弹性抗力系数超过 400 kN/m^3 以后,内力及位移变化不再明显。

(3)随着二衬厚度的增大,拱顶和拱肩弯矩绝对值变大,而拱顶轴力、拱顶竖向位移及安全系数变小。

(4)随着混凝土强度等级的提高,拱顶弯矩、拱肩弯矩及安全系数变大,拱顶轴力和拱顶竖向位移变小。

但这些量值的变化幅度较小,说明混凝土弹性模量对二衬受力影响很小(相对二衬厚度的影响)。

参考文献:

- [1] 重庆交通科研设计院. JTG D70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. [Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd. JTG D70-2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese)]
- [2] 路美丽. 影响铁路隧道衬砌结构内力的因素分析[J]. 隧道建设, 2009, 29(1): 33-37. [LU M L. Analysis on influencing factors for internal force of railway tunnel lining [J]. Tunnel Construction, 2009, 29(1): 33-37. (in Chinese)]
- [3] 李鹏飞, 张顶立, 赵勇, 等. 大断面黄土隧道二次衬砌受力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1690-1696. [LI P F, ZHANG D L, ZHAO Y, *et al.* Study of mechanical characteristics of secondary lining of large-section loess tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1690-1696. (in Chinese)]
- [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 Z C, XIE Y L, YANG X H, *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. (in Chinese)]
- [5] 陈建勋, 欧阳院平, 王明年. 公路隧道复合式衬砌结构数值计算及分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 74-79. [CHEN J X, OUYANG Y P, WANG M N. Numerical computing and analysis of highway tunnel composite lining structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 74-79. (in Chinese)]
- [6] 徐林生. 大断面高速公路隧道复合式衬砌结构受力监测分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(3): 528-530. [XU L S. Monitoring and analysis of composite lining structure of highway tunnel with large cross-section [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(3): 528-530. (in Chinese)]
- [7] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10003-2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005. [The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10003-2005 Code for design on tunnel of railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese)]

Influence of elastic resistance of wall rock on tunnel lining internal forces

SONG Ke-zhi¹, WANG Meng-shu²

- (1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;
2. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Using load structure model and FEM, influence of elastic resistance of wall rock on second lining internal forces is analyzed on the basis of tunnel lining of new intercity railway. With the increasing wall rock elastic resistance, vault bending moment, spandrel bending moment and vault vertical displacement decrease gradually, and vault axial force and safety factor increase. The results show that the harder the rock, the better the tunnel lining mechanics state. With the lining becoming thicker, vault bending moment, spandrel bending moment increase, and vault axial force, vault vertical displacement and safety factor decrease. When the strength grade of concrete increases, vault bending moment, spandrel bending moment and safety factor increase, and vault axial force, vault vertical displacement decrease. However, changes of these values are very smaller. The results show that elastic modulus of concrete has small influence on second lining.

Key words: tunnel; second lining; elastic resistance of wall rock; internal forces

责任编辑: 张明霞