

# 浅埋暗挖地铁隧道衬砌的力学行为分析

王立宏,张电吉

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:**为了了解软弱围岩下的浅埋暗挖隧道的衬砌的力学行为,利用大型的商业有限元程序 ANSYS,分析在既有设计方案及支护条件下地方的衬砌的力学行为。本文在建立荷载—结构模型中的主动荷载加被动荷载模型基础上,给出衬砌的内力并验算其承载能力,并为同类地质条件下的隧道设计与计算提供一个可行的参考。

**关键词:**浅埋暗挖隧道;软弱围岩;衬砌;ANSYS;结构—荷载模型

中图分类号:TU921

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.014

## 0 引言

地铁隧道的修建技术有很多种,并且日趋成熟。北京地铁首次采用浅埋暗挖法设计,建成了复兴门车站折返线工程。由于取得了很大的经济效益和社会效益,于1987年8月25日由北京市科委、铁道部科技司共同组织了国家级成果鉴定,与会专家和各级领导对该法进行了认真的讨论,最后否定了“软弱地层新奥法”、“中国特色新奥法”、“北京地铁浅埋暗挖法”等名称,确定采用“浅埋暗挖法”这个名称<sup>[1]</sup>。浅埋暗挖隧道一般修建于第四纪土层中,其地应力及其支护结构的受力特征不同于深埋隧道,也不同于硬岩隧道。本文采用弹性杆系有限元的方法,以武汉市轨道交通二号线某区间为例,比较系统的分析了在地应力作用下衬砌结构的变形以及受力特性。

## 1 工程简介

武汉市轨道交通二号线某区间穿越的地貌单元为长江三级阶地,地表为第四系土层所覆盖。根据区域地质资料,结合初步勘察,拟建场地地层岩性为:第四系近代人工填土层( $Q_{ml}$ )、第四系中更新统冲积层( $Q_{2al}$ )、冲、洪积层( $Q_{2al+pl}$ )、第四系残坡积层( $Q_{4cl+dl}$ )及洞穴堆积物;下伏基岩主要为:三叠系下统大冶组( $T_{1d}$ )、二叠系上统龙潭组( $P_{2l}$ )、二叠系下统栖霞组( $P_{1q}$ )、二叠系下统马鞍山组( $P_{1m}$ )。经过综合勘察与分析,确定为V类围岩<sup>[2]</sup>。

区间全长为1 272.359 m。线路开始以12.0 m

线间距沿着原有城市道路前行,线间距逐渐增大至13.0 m。线路两侧建筑物的楼层普遍比较低,少量高于5层的楼房,距离隧道均大于10 m,为天然基础,符合安全的要求。

该区间为地下区间,线路纵坡设计为人字型坡。最小竖曲线半径 $R=5\ 000$  m。区间最大埋深为11.5 m,最小埋深为6.3 m,此次计算取平均埋深8.9 m。

由于隧道主要敷设于强风化泥岩中,拟采用复合式衬砌。超前支护采用直径 $\Phi 42$  mm,长3.5 m的小导管注浆。小导管以 $15^\circ$ 仰角打入岩土体中,布置范围为拱顶 $150^\circ$ 范围内,环向间距30 cm,纵向间距1.5 m。初期支护采用喷锚构筑法,锚杆材料选用直径 $\Phi 22$  mm II级钢筋,长度采用3 m,间排距均为 $1\times 1$  m,间隔梅花形布置,设置范围为边墙及顶拱。潮喷混凝土标号为C25, S6,厚度为30 cm。采用格栅钢架支撑形式。钢筋网采用直径8 mm的I级钢筋,网格间距 $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ 。二次衬砌采用的混凝土标号为C30,防渗等级S8,厚度30 cm,双层布筋。

## 2 结构模型及荷载计算

对喷射混凝土支护结构,理论上按“连续介质模型”进行“地层—支护结构”体系的数值计算更精确,也更能模拟地下结构的实际工作状态,但实际上由于不能对围岩物理力学性能准确取值,因此,一般“地层—支护结构”体系的数值计算仅能作为辅助分析,而对土质地层条件下的浅埋结构

收稿日期:2009-11-13

作者简介:王立宏(1985-),男,湖北荆州人,硕士研究生,研究方向:隧道设计与施工理论。

指导老师:张电吉,男,教授,博士,博士生导师,研究方向:岩土工程稳定性分析。

应用“荷载—结构”模型进行支护结构分析,倒是能比较符合地下结构的实际情况.因为土层中的浅埋暗挖隧道其荷载相对而言比较明显,同时混凝土初期支护(不包括二衬),由于其设计的厚度较大,还有钢格栅与其共同作用,因此初期支护的刚度较大,不再是柔性支护.再加上土质地层与混凝土之间存在材料性能上的巨大差异,用“连续介质模型”很难体现土体与支护的相互作用<sup>[3]</sup>.

根据铁路隧道设计规范 TB10003-2005<sup>[4]</sup>,浅埋暗挖法施工的隧道,围岩压力按松弛荷载考虑,其计算模型为图1所示.围岩的计算高度:

$$h_q = 0.45 \times 2^S \times \omega \quad (1)$$

$$H_p = (2 \sim 2.5) \times h \quad (2)$$

式(1)(2)中: $h_q$ 为荷载的等效高度; $S$ 为围岩级别; $\omega$ 为宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B-5)$ , $B$ 为坑道的宽度(m); $i$ 为 $B$ 每增减1 m时的围岩压力增减率;当 $B < 5$  m时,取 $i = 0.2$ ;  $B > 5$  m时,取 $i = 0.1$ ;  $H_p$ 为深浅埋隧道临界埋深.

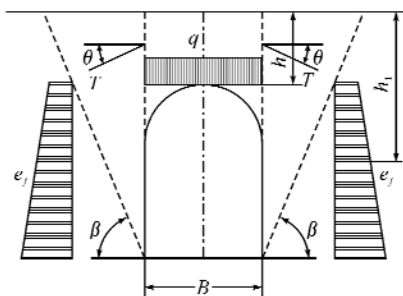


图1 浅埋隧道荷载计算模型

Fig. 1 Load calculation model of shallow-buried tunnel

$$q = \gamma h \left( 1 - \frac{\gamma h \tan \theta}{B} \right) \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta]} \quad (4)$$

$$\tan \beta = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1) \tan \varphi_c}{\tan \varphi_c - \tan \theta}} \quad (5)$$

式(3)~(5)中: $\theta$ 为顶板土柱两侧摩擦角( $^\circ$ ),为经验数值; $\lambda$ 为侧压力系数; $h$ 为洞顶地面高度(m); $\varphi_c$ 为围岩计算摩擦角( $^\circ$ ); $\beta$ 为产生最大推力时的破裂角( $^\circ$ ).

水平压力可以按式(6)计算

$$e_i = \gamma h_i \lambda \quad (6)$$

$h_i$ 为内外侧任一点至地面的距离(m).

把本工程的相关参数代入: $B = 6.52$  m,  $S = 5$ ,  $\omega = 1 + 0.1(6.52 - 5) = 1.152$ .由公式(1)可得荷载的等效高度为8.3 m,从而由(2)可得深浅埋的临界埋深为16.59~20.74 m.而本工程隧道的平均埋深为8.9 m,介于超浅埋与浅埋之间.所以由公式(3)可以算出竖向均布荷载 $q = 145.319$

N/m<sup>3</sup>.根据相关规范经验,选取围岩的计算摩擦角 $\varphi_c = 36^\circ$ ,顶板土柱两侧的摩擦角 $\theta = 18^\circ$ ,那么由公式(5),可以求的 $\tan \beta = 2.389$ ,将结果代入公式(4)可得围岩的侧压力系数 $\lambda = 0.317$ .

### 3 有限元计算及结果分析

本文的分析计算采用荷载结构模型中的主动荷载加被动荷载模型,此模型认为围岩不仅对支护结构施加主动荷载,而求由于围岩与支护的相互作用,还会对支护结构施加约束反力<sup>[5]</sup>.

弹性地基梁法根据温克尔假定认为地层的弹性抗力与结构的变位成正比.据此采用弹簧来模拟围岩和衬砌结构的相互作用,弹性地基梁法在一定程度上反映了地层抗力的作用<sup>[6]</sup>.

此工程采用大型商业有限元软件 ANSYS 分析,将初期支护与二次衬砌组成的隧道主体结构置于弹性地基上,初期支护在使用阶段与二衬结合在一起,起到永久支护的作用<sup>[7]</sup>.用 BEAM3 单元模拟衬砌,其中梁的厚度为0.6 m.用 COMBIN14 弹簧单元模拟围岩与衬砌的相互作用,根据《铁路隧道设计规范》,取围岩的弹性抗力系数为150 MPa/m.将整个衬砌划分为36个单元,并施加30个弹簧单元,衬砌有限元模型如图2所示.

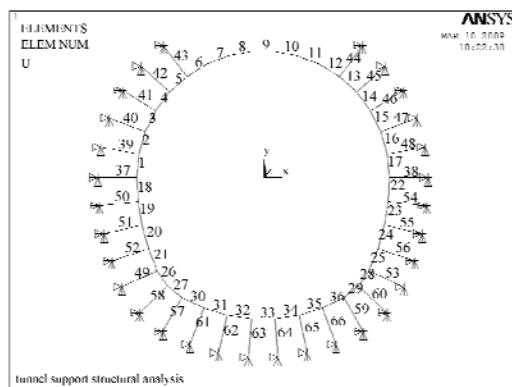


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

施加在衬砌的荷载主要有围岩压力和衬砌的自重.围岩压力通过上面的计算已得,然后通过 acel 施加重力荷载,最后通过弹簧施加衬砌与围岩的相互作用.由于施工前做好了降水处理,此处不考虑地下水压力.

通过计算,并查看衬砌的变形图,删除受拉的弹簧.经过分析计算,删掉弹簧结构40~47,最后计算得出衬砌的内力结果.

由于结构与荷载均对称,得出的内力也基本对称.由衬砌弯矩分布图(图3)可知,最大弯矩出现仰拱的中央,这一结果与现场实测基本一直.拱

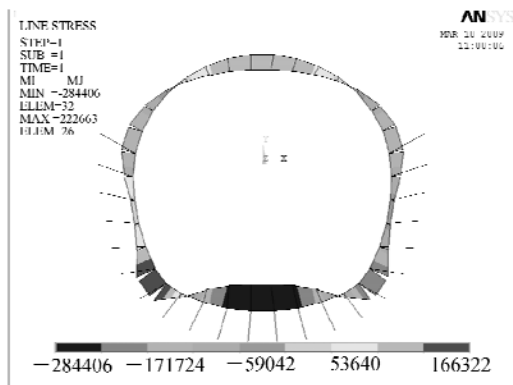


图 3 弯矩分布图

Fig. 3 Contour of bending moment distribution

顶由于受到垂直应力的作用,也呈现出一定的弯矩集中。结果显示,最大负弯矩为 284 406 N·m,最大正弯矩为 22 663 N·m。通过对钢筋混凝土截面的抗弯能力验算表明,衬砌可以正常的工作。

由衬砌轴力分布图(图 4)可知,各弹簧均处于受压状态,这拟围岩与支护间的相互作用。最大轴力出现在仰拱处,为 2 290 000 N,这是由于衬砌埋深越大,其水平应力也越大,同时在上部竖直压力的作用下,仰拱处受到了极大的压力。根据钢筋混凝土构建承压能力验算,衬砌在最大压应力作用下可以正常工作。这基本能真实模拟衬砌的承载情况。

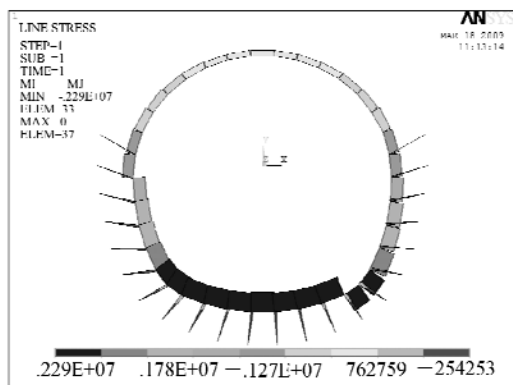


图 4 轴力分布图

Fig. 4 Contour of axial force distribution

从衬砌的剪力图(图 5)可以看出,衬砌剪力的最大值出现在衬砌仰拱与边墙相交的地方,为 355 931 N。由于仰拱起拱处,要承受较大的水平压力以及垂直压力,所以剪力也相应的较大。同时可以看出整个剪力分布基本对称。经验算,衬砌满足其抗剪要求。

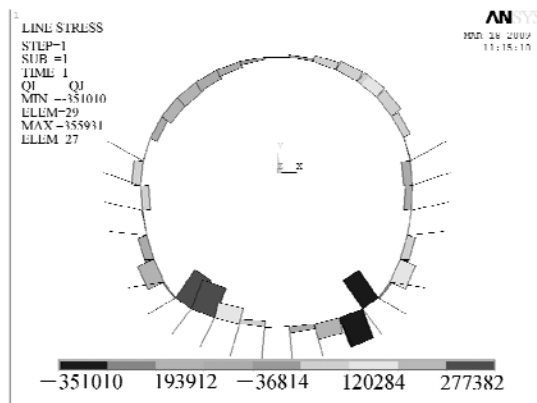


图 5 剪力分布图

Fig. 5 Contour of shearing force distribution

## 4 结 语

本文对衬砌施加主动的围岩应力,并利用弹簧模拟围岩与衬砌的相互作用。通过计算,可以看出在软弱围岩中修建地铁隧道,不同于修建山岭隧道。初期支护必须加大刚度和强度,防止围岩由形变压力迅速转为松散压力。通过计算可知,仰拱与曲墙连接部分受力较大,而仰拱中央部也承受很大弯矩。所以必须考虑对拱腰及拱腰以下仰拱部位重新配筋。由于地铁工程的防水要求高,一般应提高结构的自防水能力,同时应进行裂缝验算。有鉴于此,建议可以将仰拱处的衬砌加厚,做成变截面,以更好的满足衬砌整体的承载能力。

## 参考文献:

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社,2004:8.
- [2] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 武汉市轨道交通二号线一期工程初步设计说明[R]. 武汉:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院,2007:23-25.
- [3] 张中安,罗富荣. 土质地层浅埋地下结构设计中的土压力计算[J]. 铁道建筑,2001(3):15-20.
- [4] 中华人民共和国铁道部. TB 10003 2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [5] 赖永标,胡仁喜,黄书珍,等. 土木工程有限元分析典型范例[M]. 北京:电子工业出版社,2007:68.
- [6] 赵尚毅,郑颖人,宋雅坤,等. 地下隧道衬砌结构内力计算方法探讨[J]. 后勤工程学院学报,2007,23(4):23-27.
- [7] 陈文艳,谢承栋. 重庆市轨道交通地下工程结构设计探讨[J]. 地下工程与隧道,2008,12(4):43-47.

(下转第 61 页)

## Study on health assessment of large-scale bridge based on static and dynamic testing

**SONG Jin-qiang<sup>1</sup>, ZHU Hong-ping<sup>1</sup>, HUANG Min-shui<sup>1,2</sup>**

(1. Huazhong University of Science and Technology, a) School of Civil Engineering  
and Mechanics, b) Hubei Key Laboratory of Control Structure, Wuhan 430074, China;

2. Transportation Research Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The mechanical characteristic and performance index of a highway bridge over a railroad are acquired after the field static and dynamic testing are carried through, then the finite element model of the bridge is set up based on ANSYS and static analysis is performed. Through the comparative analysis between the analytical and theoretical values, it can be seen that the bearing capacity and dynamic performance debased for a certain degree, its safety cannot meet the need of operation. It needs to be completely repaired. The research method can be used in many applications of bridge structures like damage identification, health monitoring, structural control, structural evaluation and assessment.

**Key words:** health assessment; static testing; dynamic testing; large-scale bridge

本文编辑:龚晓宁



(上接第56页)

## Analysis on mechanical behavior of lining of shallow-buried and hidden excavated metro tunnel

**WANG Li-hong, ZHANG Dian-ji**

(School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to know of the mechanical behavior of the lining of the shallow buried and hidden excavated metro tunnel, ANSYS, a major commercial software, is used to analyze the internal force and deformation mechanism of lining under the designed case and supportive conditions. This paper, based on the active load and passive load among load-structure model, calculates the internal force of the lining and checks its bearing capacity, and provides a feasible reference for the design and calculation of the tunnel in the same geological conditions.

**Key words:** shallow-buried and hidden excavated tunnel; soft surrounding rock; lining; ANSYS; load-structure model

本文编辑:龚晓宁