

# 隧道衬砌厚度不足对衬砌结构承载力影响

于 玲,白士杰,刘晓雪,陈 录,包龙生

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 对某城市隧道检测,探究隧道是否会因衬砌厚度不足或衬砌减薄而对结构安全及承载力造成影响.方法 通过模拟实验,选取典型的衬砌断面为研究对象,用层次分析法衡量安全因素权重值,建立模型对不同程度的衬砌厚度不足情况进行承载力和变形分析.结果 当实际衬砌与设计厚度比值从0.9降到0.5时,最大竖向变形值从18 mm增加到45 mm;当其比值小于0.7时,其承载力安全系数显著减小,结构安全系数降低;当比值大于0.7时,结构安全.结论 衬砌厚度在不同工况下,结构承载力和安全性随着衬砌厚度与实际厚度的比值减小而减小.隧道衬砌厚度达不到设计要求会削弱结构的承载能力且影响其正常使用.

**关键词** 隧道衬砌;厚度不足;承载力;安全

中图分类号 TU93

文献标志码 A

## Study on the Influence of Tunnel Lining Thickness on Bearing Capacity of Lining

YU Ling, BAI Shijie, LIU Xiaoxue, CHEN Lu, BAO Longsheng

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The purpose of this paper is to explore the structure safety and bearing capacity of a certain city tunnel, and to explore whether the tunnel will be affected by the thickness of the lining or lining thinning. Through the simulation experiment, select the typical lining section as the research object, measure of safety factors weights by AHP, the model of bearing capacity and deformation analysis of the lining thickness insufficient in different degrees. When the actual results and design of lining thickness ratio decreased from 0.9 to 0.5, the deformation value increased from 18 mm to 45 mm. when the ratio is less than 0.7 when the maximum vertical bearing capacity, the safety coefficient decreases obviously, reduce the safety factor; when the ratio is more than 0.7, the structure is safety.

**Key words:** tunnel lining; insufficient thickness; bearing capacity; security

收稿日期:2016-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51078242);辽宁省自然科学基金项目(201602602);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K2-012);沈阳市科学技术基金项目(F16-095-1-00)

作者简介:于玲(1970—),女,副教授,主要从事道路桥梁工程结构方面研究.

我国土地的板式为西部高,东部低.自东向西顺次增加,陆地中的67%为山地高原等地形<sup>[1]</sup>.山地面积较大,增加了交通运输建造的难度.随着近些年我国经济水平的快速提升,隧道作为基础建设的重要组成部分发展势头迅猛.随着经济的快速发展,隧道作为交通运输的必不可少的一部分也需要相应的发展,交通的发展与经济的发展彼此促进.随着隧道的飞速发展和建设条件愈加严格,隧道建设的技术也越来越规范化.在这样的发展背景下,我国变为世界上拥有最多数量隧道和发展最快的国家之一<sup>[2]</sup>.但是,越来越多的隧道出现了不同类型的质量问题,隧道衬砌裂损和隧道渗漏水是其中较为严重的缺陷,同时隧道衬砌厚度不足对结构的承载力和安全区有较大的影响.原因是因为我国的土地广袤,地形环境差别大,自然环境变化大,早期隧道受修建时期的设计、材料以及施工方法的限制.当然人为的主观因素,建成后的维修管理也是导致病害发生的因素.

隧道施工上,因为浇筑混凝土不满足厚度,导致隧道衬砌厚度偏薄使得衬砌达不到设计承载能力的要求.在我国城市道路隧道中,因为施工全程中的施工技术、工艺、材料以及施工管理方面的因素,导致隧道衬砌厚度不足的缺陷会对隧道的正常使用产生或多或少的影响<sup>[3-5]</sup>.当隧道出现衬砌厚度不足时,可能会诱发隧道衬砌出现其他病害<sup>[6-7]</sup>(包括渗水、冻害、裂损等),于是减弱衬砌结构的承载力可能会发生衬砌塌落、断裂等重大事故<sup>[8]</sup>.尤其当隧道处在地下水丰富的区域,衬砌背后地下水会对衬砌产生水压力,有时地下水还包含其他腐蚀性成分,因此衬砌厚度不足会对隧道正常使用产生很大影响.基于此,笔者通过建立模型模拟分析衬砌厚度不足对隧道承载力的影响,得出当衬砌厚度不足时,会造成隧道最大竖向变形过大.此成果可以检测现有隧道的衬砌厚度是否满足结构稳定的要求,同时也可以为设计隧道衬

砌厚度大小提供合理经济的数据.

## 1 工程概况

笔者依托工程为城市道路隧道,其地处于辽宁省鞍山市,玉佛山隧道如图1所示.该隧道是市中心通往高新技术产业开发区及千山国家风景名胜区的必经之地.隧道南北洞为分离式隧道,两洞宽度均为7 m.1983年隧道的南洞建成,长度为443.25 m;隧道北洞于1993年建成,全长为471.48 m,纵坡为由西向东2%的单坡,基础采用26 cm厚C35混凝土.两个隧道长度一共914.73 m,两洞之间净距为23~24 m.2005年隧道改造,改造后的隧道净高为5.5 m,净宽为12 m<sup>[9]</sup>.



图1 玉佛山隧道实景图

Fig. 1 Picture of the Yufoshan tunnel

该工程所处地层主要由花岗岩混合岩组成,岩体夹有闪长岩(或角闪岩)包裹体,局部有伟晶石英脉贯穿.山体表面植被发育,植被下有较薄一层坡积粉质黏土层.各层自上而下依次为厚度在0.5~2.50 m的粉质黏土,钻探75 m深度范围内的花岗混合岩以及花岗混合岩中的斜长角闪岩包裹体<sup>[10-12]</sup>.本区域一直处于鼓起上升剥蚀状态.即工程所在区域内是地处于铁架山肿瘤状隆起向北延伸的部分.场地内无大的断裂带通过,只有四条小的断裂构造通过<sup>[13]</sup>,但由于其规模小,影响宽度不大,对隧道无影响.

隧道依据新奥法的基本原理对其进行设计和施工,采用管棚支护,挂网喷锚+模板灌注混凝土的复合式衬砌。考虑到该隧道的地形条件,工程地质条件及工程水文地质条件,在保障安全性,经济性和工序转换不复杂前提下,采用了SM明洞、S3衬砌、S4衬砌、S4'衬砌<sup>[14]</sup>。衬砌的断面型式均相同,只是具体参数形式不同。

运营使用期间,相关部门在日常检查中对隧道的基本病害进行记录,发现隧道目前病害<sup>[15-17]</sup>:隧道水害严重,隧道衬砌拱顶混凝土产生裂缝、混凝土脱落,防水层不同程度破坏,对交通安全已经构成了不小的问题。为探究验证破损和病害的详细情况,掌握破坏面积位置或病害的详细资料,为决策部门是否实施处治以及采取何种处治措施等提供依据及技术支持,2014-10-10~2014-10-13对该道路隧道衬砌进行了实体质量及外观检测。通过对隧道检测发现,在隧道(南洞)38片板中,有9片板单元厚度达不到设计要求,隧道(北洞)40片板中,有35片板单元厚度并未达到设计要求<sup>[18]</sup>,其余板厚度平均值大体满足设计要求。该隧道一半以上的板单元厚度均不满足设计要求,厚度不足的问题比较严重,因此掌握衬砌厚度对隧道衬砌承载力的影响程度尤为重要。

## 2 衬砌厚度不足成因以及危害

隧道衬砌厚度不达标有多种类型,工程中常见的主要有两种情况:整体衬砌厚度不达标和局部衬砌厚度不达标。衬砌的厚度不达标会削弱隧道整体刚度,导致结构承载力变低并使变形增加。这会影响隧道安全、正常的运营,因此对衬砌厚度不达标的成因及危害进行探究是不容忽视的问题。

### 2.1 衬砌厚度不足成因

(1)施工方面:施工时由于开挖方法的不当,导致开挖隧道成型比较差,开挖面欠挖现象比较严重;施工单位的管理不善,盲目的

追求经济效益和施工进度从而忽略了对施工质量的控制;往模板灌注混凝土时放线的不精确;施工的技术诸多限制,未对隧道进行施工监控,完全根据经验进行施工指导。这些都是造成衬砌厚度不达标潜在原因。

(2)设计方面:勘探设计时,对围岩的类别划分不准确,当某段围岩勘探设计时判定为较好的围岩,而在现实中开工时围岩质量较差。则设计的衬砌厚度肯定不符合实际围岩的要求,则衬砌将会产生厚度不足的问题。

(3)其他方面:由于运营阶段的养护不足和使用不当导致衬砌混凝土出现破损、掉块等现象,然后进一步发展成衬砌厚度不足。

### 2.2 衬砌厚度不足的危害

(1)衬砌厚度不足会致使衬砌结构刚度和受力状况发生改变,从而削弱衬砌承载力。

(2)衬砌厚度不足会直接影响衬砌截面的刚度,导致其安全系数进而随之降低。

(3)衬砌厚度不足会诱发其他病害的产生,比如裂损、掉块和侵限等问题,当厚度严重不足时还可能会诱发坍塌、断裂等危险性的现象。

## 3 衬砌厚度不足承载力分析

笔者依托有限元软件 Midas GTS,基于荷载-结构法对隧道进行建模分析。根据荷载-结构法将支护和围岩两种结构分开考虑,将开挖隧道的衬砌结构作为主要承载部分,地层是在对支护结构的变形及荷载起到约束作用的。一般通过设计规范已知公式或者实测值确定地层的压力,然后按照弹性地基上的结构物计算分析方法得出衬砌结构的内力,最后进行结构截面的安全评定分析。

### 3.1 衬砌承载力安全极限状态验算方法

根据《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)原则。对一般隧道整体衬砌或者洞门结构均采用极限状态法设计进行截面验算。除了对偏心受压隧道衬砌进行验算外,还需要保证隧道轴力的偏心距离小于  $0.45 h$  ( $h$

为截面厚度)。笔者主要介绍处于临界状态下承载力极限状态的验算步骤。

对结构承载力极限状态验算,不仅要考虑永久和变荷载作用的组合外,还考虑荷载效应的必要性,同时考虑荷载效应的计算公式如下:

$$\gamma_{sc}N_k\leq\varphi\alpha bhf_{ck}/\gamma_{Rc}.$$

(1)

式中: $N_k$ 为轴向力,MN,由各类荷载标准值组合效应计算得; $\gamma_{sc}$ 为隧道混凝土构件抗压验算的荷载效应分项系数,取值见表1; $\gamma_{Rc}$ 为隧道混凝土构件抗压验算的抗力分项系数,取值见表1; $\varphi$ 为混凝土及砌体结构的纵向弯曲系数,当隧道为紧贴式衬砌、明挖法部位的拱部衬砌以及回填密实的边墙时,取 $\varphi=1$ ;而其他的构件根据 $H/h$ 取值见表2; $f_{ck}$ 为混凝土轴心抗压强度标准值,MPa; $h_0$ 为截面有效高度, $h$ 为截面的厚度; $b$ 为截面宽度; $\alpha$ 为轴向受力偏心影响系数,取值见表3。

表1 单线隧道混凝土结构抗压验算的各类分项系数

Table 1 Various types of stress checking calculation of single track tunnel concrete structure

混凝土结构	$\gamma_{sc}$	$\gamma_{Rc}$
深埋隧道衬砌结构	3.95	1.85
偏压隧道衬砌结构	1.60	1.83
隧道明洞衬砌	2.67	1.35

注:上表偏压情况下分项系数只适用于Ⅳ、Ⅴ类围岩。

表2 混凝土以及砌体结构的纵向弯曲系数

Table 2 Longitudinal bending coefficient of concrete and masonry structure

$H/h$	纵向弯曲系数	$H/h$	纵向弯曲系数
<4	1.00	18	0.68
4	0.98	20	0.63
6	0.96	22	0.59
8	0.91	24	0.55
10	0.86	26	0.51
12	0.82	28	0.47
14	0.77	30	0.44
16	0.72	—	—

注: $H$ 为结构的高度, $h$ 为构件截面的短边长;当长细比为表中其他数值时,纵向弯曲系数可用内插法计算。

表3 轴力偏心影响系数

Table 3 Coefficient of axial force eccentricity influence

$e_0/h$	$\alpha$	$e_0/h$	$\alpha$	$e_0/h$	$\alpha$
0.00	1.000	0.18	0.799	0.36	0.324
0.02	1.000	0.20	0.750	0.38	0.278
0.04	1.000	0.22	0.698	0.40	0.236
0.06	0.996	0.24	0.645	0.42	0.199
0.08	0.979	0.26	0.590	0.44	0.170
0.10	0.954	0.28	0.535	0.46	0.142
0.12	0.923	0.30	0.480	0.48	0.123
0.14	0.886	0.32	0.426	—	—
0.16	0.845	0.34	0.374	—	—

注: $e_0$ 表示偏心距。

式(1)主要表示在考虑各种相关概率影响下计算得到的截面极限压力应当大于在相同条件下的各类荷载作用效应。

### 3.2 问题简化及计算分析基本假定

地下工程分析主要是为了了解围岩以及 与围岩接触的衬砌结构在荷载下的反应。参考《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004),以下因素会对地下分析的准确度造成影响:围岩本身特点、隧道的工程地质、水产生的波动性。分析见表4所示。

表4 隧道围岩释放荷载比例

Table 4 Ratio of surrounding rock to release load

围岩类别	承载比例/%	
	围岩和初支	二衬
Ⅳ	60~80	20~40
Ⅴ	20~40	60~80

由于围岩地质构造复杂,因此完全准确地对围岩材料的刚度和强度特性模拟是比较困难和不经济的。在知晓研究类型的情况下,有必要对模型进行简化。另外应当对需要分析的部分选择相应的单元,并且确定其有限元模型的范围。在模型分析结果中如果主要看重的是变形,则应该将单元的尺寸稍微增大;若关心的是衬砌结构的内力或应力,则可



以将模型单元划分的稍小. 在探讨结构的安全性问题时, 由于需要分析的材料为非线性的, 所以一般将模型单元稍微建的小一点或者利用曲面弹簧来模拟外部的边界条件会更加准确.

- 根据相关情况, 计算分析基本假定如下:
- (1) 取隧道纵向长度为 1 m 的宽板建立模型, 假设其长度范围内地质条件和围岩类型不变;
  - (2) 二次衬砌运用梁单元模拟, 与围岩、初期支护相互的作用使用弹性支撑实现;
  - (3) 视衬砌为一个整体进行建模, 忽视各部结构施工影响;
  - (4) 将衬砌结构钢筋与混凝土之间的粘结考虑为刚性粘结, 两种材料的刚度都应该考虑;
  - (5) 若隧道为深埋隧道时, 将隧道上部的围岩都通过有限元模型进行划分网格是不经济的, 可以通过将上部围岩作为荷载直接输入即可;
  - (6) 对弹性支撑的末端位移全约束;
  - (7) 围岩主动荷载和弹性抗力运用传统结构力学来计算;
  - (8) 该隧道支护结构处围岩主要为 V 级加强, 衬砌承受荷载比例在 60% ~ 80% (取 70%), 荷载添加时乘以折减系数 0.7;
  - (9) 当衬砌结构出现裂缝时, 结构压力传递值为 95%, 剪力传递值为 35%, 不能传递拉力. 因此, 隧道模型建立时, 直接忽略衬砌的抗拉作用. 可以直接将裂缝处混凝土假设不承受荷载, 仅钢筋单独承受荷载;
  - (10) 应当充分了解模型中对应的线单元(桁架单元、梁单元等)截面特性值对结构分析结果的影响. 如果衬砌结构表面有腐蚀和磨损等缺陷时, 也应将其作用反应到截面特性中;
  - (11) 空洞处衬砌认为不承受荷载和弹性抗力, 因此模型中不考虑主动荷载和弹性抗力在空洞处的作用;

(12) 衬砌厚度不足的情况下, 通过对衬砌截面材料强度进行折减设置;

(13) 该隧道南北洞之间净距为 23 ~ 24 m, 因此忽略南北洞之间的相互影响, 南北洞模型可以单独进行分析.

3.3 计算工况设置

笔者在数值分析时, 把厚度不足的情况假定为全断面的衬砌厚度不足, 对于隧道衬砌厚度不足的不同程度情况设置如下计算工况(见表 5). 建立隧道计算模型时, 选取 S4 型衬砌(占隧道总长比例最大)断面为分析对象. 其拱圈和仰拱设计厚度均为 80 cm.

表 5 不同程度厚度不足情况下的计算工况

Table 5 Calculation conditions of different degree of thickness under different conditions	
平均厚度/设计厚度	工况
0.9	一
0.8	二
0.7	三
0.6	四
0.5	五

3.4 计算结果分析

根据隧道初步调研资料可知, 该隧道为分离式隧道, 所处地层为花岗岩混合岩. 根据隧道模型得出隧道截面的参数图. 对于 5 个工况分别建立同一截面不同衬砌厚度的计算模型, 根据各工况模型的后处理结果得到各工况下截面的轴力图 and 变形图.

3.4.1 承载力分析

图 2 ~ 图 6 为不同工况下的衬砌截面轴力图. 根据式 (1) 对不同厚度的衬砌进行承载力分析, 分别得出不同工况下的结构截面抗压能力与相应的作用效应分项系数比值为 994.26 kN、877.56 kN、767.87 kN、685.17 kN、548.48 kN. 由此表明, 衬砌厚度的改变, 截面内力有明显的改变. 随着厚度不足的比例增大, 衬砌相应的极限抗力逐渐降低.

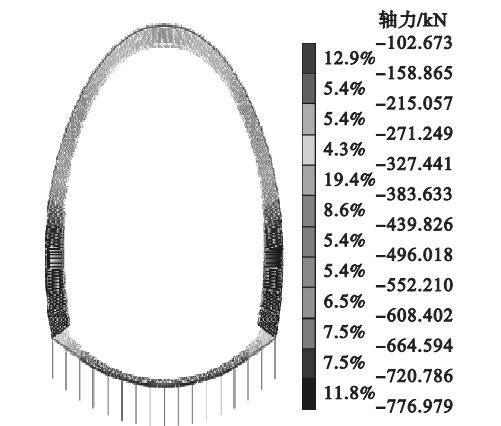


图 2 工况一截面计算轴力图

Fig. 2 The working conditions of a section calculation of axial force

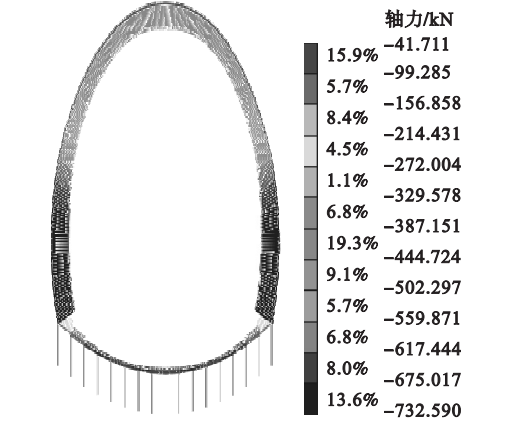


图 5 工况四截面计算轴力图

Fig. 5 Five working conditions of a section of the calculation of axial force

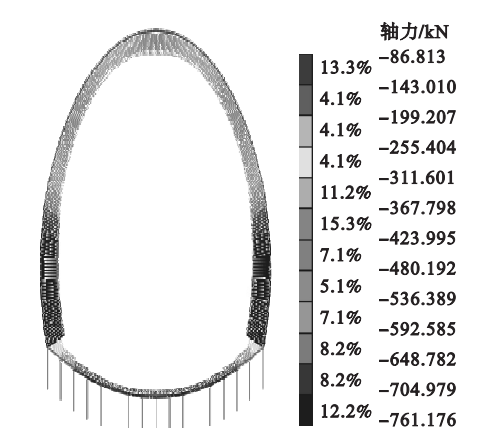


图 3 工况二截面计算轴力图

Fig. 3 Two working conditions of a section of the calculation of axial force

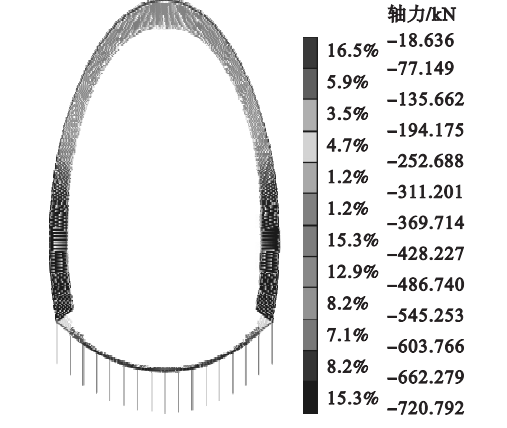


图 6 工况五截面计算轴力图

Fig. 6 Six working conditions of a section of the calculation of axial force

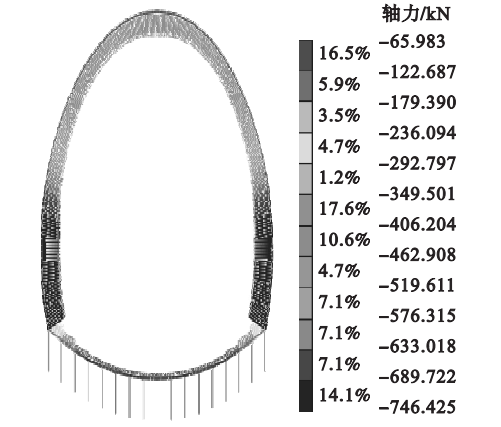


图 4 工况三截面计算轴力图

Fig. 4 Four working conditions of a section of the calculation of axial force

由图 2 可知,对于工况一,当平均厚度与设计厚度比值为 0.9 时,截面上部拱圈两侧轴力分布占整体结构比例最大,达到 19.4%,仰拱和曲墙底部的轴力分布比例次之.曲墙轴力值从上到下出现增大趋势,受力作用下不同处的轴力都大大小于结构抗力,结构几何参数几乎不发生变化,并且富余量很大,因此结构承载力不受影响.

由图 3 可知,对于工况二,当平均厚度与设计厚度比值为 0.8 时,截面上部拱圈轴力比例仍然是最大,整体结构的轴力分布情况与工况一相似.相对于工况一,仰拱轴力值有所减小,曲墙及拱圈轴力值有所下降.各种作用效应下的轴力值小于结构抗力,结构抗力起到承

载作用,结构几何参数几乎不发生变化.并且富余量较大,因此结构承载力也不受影响.

由图4可知,对于工况三,当平均厚度与设计厚度比值为0.7时,截面上部拱圈轴力比例最大,为17.6%.整体结构的轴力分布情况与工况一相似,相比工况二,结构轴力值有所减小.各种作用效应下的轴力值稍微小于结构抗力,结构所受轴力跟结构抗力接近临界,结构将近达到承载极限状态,结构存在潜在危险状态.

由图5可知,对于工况四,当平均厚度与设计厚度比值为0.6时,截面上部拱圈轴力比例最大,为19.3%.相对于工况三,整体结构轴力值在依然在减小.各种作用效应下的轴力值稍微大于结构抗力,结构已经达到了承载极限状态,隧道处于不安全状态.

由图6可知,对于工况五,当平均厚度与设计厚度比值为0.5时,截面仰拱轴力比例最大,为16.5%.相对于工况三,整体结构的轴力值继续在减小.各种作用效应下的轴力值远大于结构抗力,结构几何参数发生巨大变化.结构已达承载力极限状态,隧道存在很大危险性.

3.4.2 变形分析

图7~图11分别为各工况下的衬砌结构截面竖向变形图.

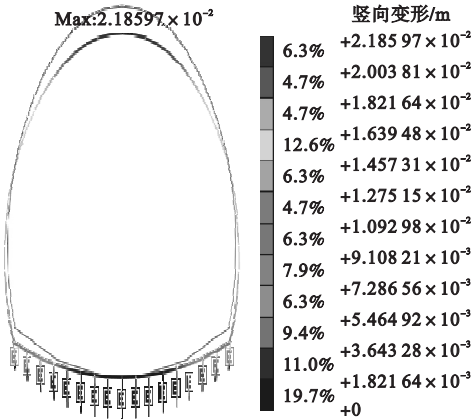


图8 工况二衬砌竖向变形图

Fig. 8 Deformation diagram of vertical lining of condition two

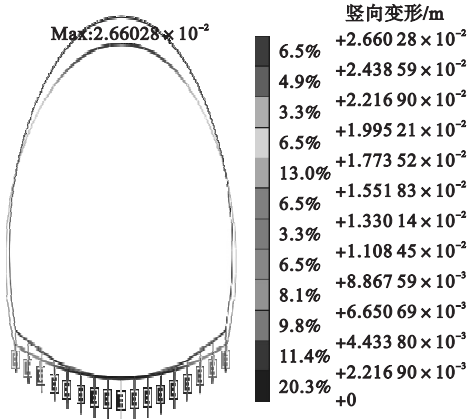


图9 工况三衬砌竖向变形图

Fig. 9 Deformation diagram of vertical lining of Condition three

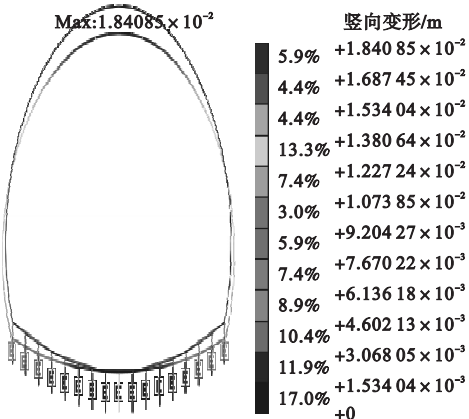


图7 工况一衬砌竖向变形图

Fig. 7 Deformation diagram of vertical lining of condition one

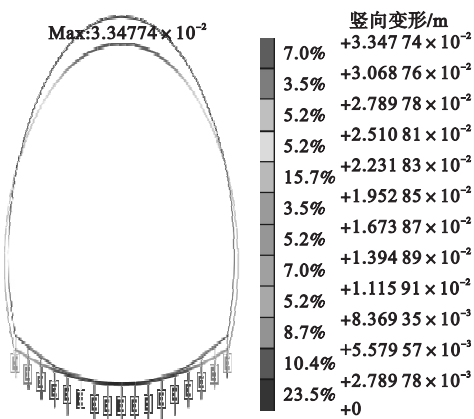


图10 工况四衬砌竖向变形图

Fig. 10 Deformation diagram of vertical lining of condition four

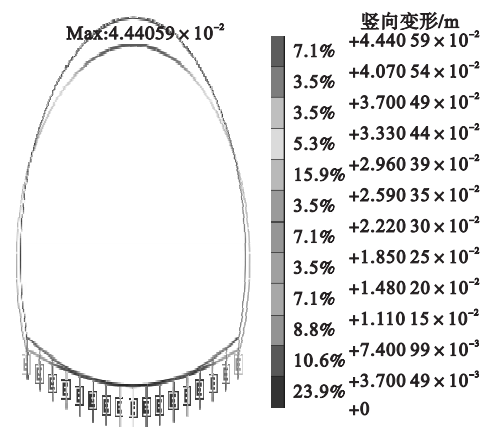


图 11 工况五衬砌竖向变形图

Fig. 11 Deformation diagram of vertical lining of condition five

由图 7 ~ 图 11 可知,隧道各部分结构都受拉力,仰拱位移变形比例最大,曲墙其次.隧道衬砌厚度不大标准的情况下,衬砌的最大变形均发生在拱顶处,变形的方向都是竖向向下.随着衬砌厚度减少,结构几何参数越来越不稳定,竖向变形在增大(见图 12).

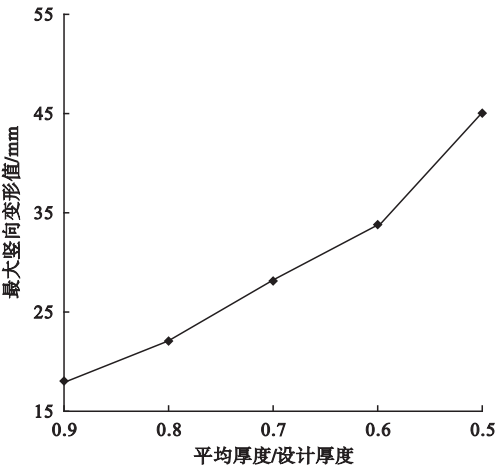


图 12 衬砌厚度不足与竖向变形之间的关系

Fig. 12 The relationship between the thickness of the lining and the vertical deformation

4 结 论

(1)衬砌厚度不足时,当平均厚度与设计厚度的比值大于 0.7 时,结构抗力还远大于所承受的轴力,衬砌结构的安全系数较为平稳,几何参数并没有发生变化,对隧道衬砌的承载力影响不大;而当该值小于 0.7 时,结构抗力不在大于所受轴力.衬砌结构的安全

系数显著减小,严重影响衬砌的承载能力.

(2)衬砌厚度不足时,随着厚度的减少,最大竖向变形逐渐增大,当平均厚度与设计厚度的比值小于 0.7 时,竖向变形增大的较快.

(3)通过对该隧道衬砌厚度不足进行承载力分析,发现该隧道衬砌多处存在安全隐患,需要对其加强观察和检查,条件允许时可以采取远程监控量测.

参考文献

[ 1 ] 关宝树.隧道地下工程维修管理要点集[M].北京:人民交通出版社,2004.  
(GUAN Baoshu. Key points of maintenance management for tunnel underground[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. )  
[ 2 ] 徐学深.公路隧道二次衬砌厚度偏差值统计分析[J].中国水运,2012(2):208-210.  
(XU Xuesheng. Statistical analysis on the deviation value of two times lining thickness of highway tunnel [J]. China water transport, 2012(2):208-210. )  
[ 3 ] 胡庆安,夏永旭,王文正,等.双连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(1):48-50.  
(HU Qingan, XIA Yongxu, WANG Wenzheng, et al. Three dimensional numerical simulation of the construction process of double arch tunnel[J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2005, 25(1):48-50. )  
[ 4 ] 陈建勋,李建安.公路隧道二次衬砌厚度的优化[J].交通运输工程报,2006,6(3):68-72.  
(CHEN Jianxun, LI Jiansong. Optimization of lining thickness of highway tunnel two times [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2006, 6(3):68-72. )  
[ 5 ] 李明,陈洪凯.隧道衬砌厚度不足的健康判据试验研究[J].岩土力学,2011(增刊1):570-577.  
(LI Ming, CHEN Hongkai. Experimental study on health criterion of insufficient thickness of tunnel lining[J]. Rock mechanics, 2011(S1):570-577. )  
[ 6 ] 重庆交通科研设计院,浙江省交通规划设计研究院.公路隧道设计规范:JTG D70—2004[S].重庆:重庆交通科研设计院,2004.  
(Chongqing Communications Research and



- Design Institute, Zhejiang Transportation Planning and Design Institute. Code for design of highway tunnel: JTG D70—2004 [S]. Chongqing: Chongqing Communications Research and Design Institute, 2004. )
- [ 7 ] 余健. 高速公路隧道长期安全性评价及维护加固对策研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
( SHE Jian. Long term safety evaluation and maintenance and reinforcement measures of highway tunnel [D]. Chendu: Southwest Jiaotong University, 2005. )
- [ 8 ] 李鹏. 运营隧道的典型病害及其处治技术研究 [J]. 北方交通, 2013, 4: 127 – 130.  
( LI Peng. Study on the typical diseases and treatment technology of tunnel operation [J]. Traffic in the north, 2013, 4: 127 – 130. )
- [ 9 ] 夏永旭, 王永东. 隧道结构力学计算 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
( XIA Yongxun, WANG Yongdong. Mechanical calculation of tunnel structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2003. )
- [ 10 ] 施成华, 雷明锋, 彭立敏. 隧道衬砌结构体系可靠度研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 4(12): 41 – 45.  
( SHI Chenghua, LEI Mingfeng, PENG Limin. Study on reliability of tunnel lining structure system [J]. Journal of railway science and engineering, 2010, 4(12): 41 – 45. )
- [ 11 ] SCHROEDER F C, POTTS D M, ADDENBROOKE T L. The Influence of pile group loading on existing tunnels [J]. Geotechnique, 2004, 54(6): 351 – 362.
- [ 12 ] CHANG Mingfang, ZHU Hong. Construction effect on load transfer along bored piles [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2004, 130(4): 426 – 437.
- [ 13 ] KWON S, LEE C S, CHO S J, et al. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel [J]. Tunnelling and underground space technology, 2009, 24(1): 1 – 13.
- [ 14 ] BOLDINI D, LACKNER R, HERBERT A. Ground-shotcrete interaction of NATM tunnels with high overburden [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2005, 131, (7): 886 – 897.
- [ 15 ] ZHONG X, ZHU W, HUANG Z, et al. Effect of joint structure on joint stiffness for Shield tunnel lining [J]. Tunnelling and underground space technology, 2006, 21(3): 407 – 408.
- [ 16 ] ZHAO Y, LI P, TIAN S. Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2013, 5(6): 468 – 477.
- [ 17 ] HUANG Ziping, BROCH E. Cavern roof stability-mechanism of arching and stabilization by rock bolting [J]. Tunnelling and underground space technology, 2002 (17): 249 – 261.
- [ 18 ] LMAJIDA V H, KAISERA P K, MARTIN C D. Modeling brittle failure of rock [J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2002(39): 731 – 741.