

基于截面极限承载力曲线的衬砌厚度减薄研究

孙明社¹ 韩贺庚² 吴旭¹ 夏勇³ 孙作强¹

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 蒙西华中铁路股份有限公司, 北京 100073; 3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

摘要: 复合式衬砌结构的优化设计是隧道工程技术的重要研究课题之一。衬砌厚度过大、配筋过密, 不仅造成经济浪费, 还可能导致衬砌容易开裂。依托蒙华铁路隧道工程, 通过现场试验和理论分析的方法, 研究衬砌厚度减薄的可行性。首先, 基于衬砌截面极限承载力曲线的概念, 提出以抗弯安全系数评价衬砌安全性的方法。其次, 根据现场试验得到的衬砌截面内力监测值, 揭示了衬砌厚度减薄前、后, 截面内力的变化特征, 得到减薄衬砌厚度, 衬砌截面的抗弯安全系数增大, 抗弯安全性有所提高。最后, 通过有限元数值计算, 验证了现场监测得到的主要结果, 即初期支护加强、衬砌减薄的复合式衬砌结构优化设计是可行的。研究表明, 在隧道衬砌设计时, 厚度设计过大会使其截面刚度过大, 抗弯安全系数反而会减小, 衬砌容易发生开裂破坏, 适当减薄衬砌厚度, 有利于保证其抗弯安全性。研究成果对复合式衬砌结构的设计具有一定的参考意义。

关键词: 复合式衬砌; 厚度减薄; 衬砌安全性; 极限承载力曲线; 抗弯安全系数

中图分类号: U459 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)S1-0325-08

Lining thickness thinning based on section ultimate bearing capacity curve

Sun Mingshe¹ Han Hegeng² Wu Xu¹ Xia Yong³ Sun Zuoqiang¹

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Mengxi-Huazhong Railway Co., Ltd., Beijing 100073, China; 3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

Abstract: Optimum design of composite lining structure is one of the important research topics in tunnel engineering. Too thick lining and too dense reinforcement not only cause economic waste but also may cause lining to crack easily. This research relies on the Zhengzhuang Tunnel of Menghua Railway, to study the lining thickness thinning through in-situ test and theoretical analysis method. Firstly, according to the concept of ultimate bearing capacity curve of lining section, a method of evaluating lining safety by bending safety factor is proposed. Secondly, based on the monitoring internal force of lining section obtained from in-situ test, the variation characteristics of section internal force before and after lining thinning are obtained. After lining thickness thinning, the bending safety factor of lining section increases and the bending safety is improved. Finally, the in-situ monitoring results are verified through finite element calculation, that is the optimum design of composite lining structure with initial support strengthening and lining thickness thinning is feasible. The research results show that in the design of tunnel lining, if lining thickness is too large, the bending safety factor will decrease and lining is prone to crack due to too large section stiffness. So optimizing lining thickness properly is good for ensuring its bending safety. The research results have certain reference significance for the design of composite lining structure.

Keywords: composite lining structure; thickness optimization; lining safety; ultimate bearing capacity curve; bending safety factor

E-mail: sunmingshe2012@126.com

引 言

我国现行山岭隧道的主要结构形式是复合式衬砌, 它一般由初期支护、防水层和模筑混凝土衬砌组成。目前, 国内山岭隧道衬砌的设计一般是先根

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738002)

作者简介: 孙明社, 博士研究生

收稿日期: 2020-06-15

据地形、围岩等级等初步拟定结构断面,然后按静力学方法计算衬砌内力和截面安全系数。若安全系数不足则增加衬砌厚度;当安全系数满足要求时,根据工程经验往往也采用较厚的衬砌。这样的设计与新奥法充分发挥围岩自承能力的设计理念存在一定差距^[1],衬砌厚度过大不仅会造成经济浪费,而且会导致衬砌截面刚度过大,容易发生弯曲开裂破坏。因而,从衬砌受力的实际情况出发,优化衬砌厚度具有重要的工程意义。

确定衬砌合理厚度的前提是需要明确衬砌结构的受力特性,有针对性地保障其安全。赵占厂^[2]、房倩^[3]、李鹏飞^[4]等基于现场监测对衬砌结构的受力特性进行研究,得到Ⅲ~Ⅴ级围岩中衬砌在初期支护变形稳定后施作的条件下,衬砌背后压力大致在同等水平,最大值小于0.2MPa。笔者^[5]结合蒙华铁路隧道工程,研究了复合式衬砌中衬砌承担围岩压力的比例,得出衬砌分担围岩压力比例约为13%~16%。这些研究成果表明衬砌结构受力较小,安全储备足够大,存在适当减薄的可行性。

关于衬砌厚度对隧道结构安全性的影响,国内学者通过现场监测、模型试验和数值计算等方法进行了很多研究。周心培^[6]通过计算探讨了衬砌安全系数与其厚度的关系,结果表明衬砌安全系数并非简单地随厚度的增加而增大,在较差围岩中不宜采用太厚的衬砌。赵占厂^[7]通过数值模拟研究了黄土公路隧道衬砌厚度对围岩及隧道结构的影响,认为存在经济合理的衬砌厚度,盲目增加衬砌厚度以求提高结构安全度,并不一定取得明显效果。宋战平^[8]通过有限元计算研究了某公路隧道在Ⅳ级围岩条件下衬砌安全系数随厚度增加的变化,得出衬砌厚度超过40cm后,增加厚度对衬砌安全系数提高不明显的结论。陈建勋^[9]采用现场监测和数值计算的方法分析了某公路隧道不同类型复合式衬砌结构的受力,结果表明衬砌内力较小、安全系数较大,适当减薄衬砌厚度,隧道结构是安全的。孙毅^[10]通过现场监测和数值计算研究了高速铁路隧道在Ⅴ级围岩条件下,衬砌的变形与承载能力特性,得出衬砌背后压力远小于其极限承载力,可进行适当优化减薄的结论。李明^[11]采用模型试验研究了直墙式隧道衬砌厚度与其极限承载力的关系,得到随厚度的减薄,衬砌承载力逐渐降低,分为缓慢退化、快速退化和退化完成阶段的结论。这些研究成果对复合式衬砌结构的设计具有重要的指导意义,但是对厚度减薄后衬砌截面极限承载力和安全性的变化等问题

的研究还不充分,缺乏减薄衬砌厚度实际可行的依据。

本文基于混凝土和钢筋的应力-应变关系,依据衬砌截面的受力状态计算截面极限承载力,进而得到衬砌截面极限承载力曲线,提出以抗弯安全系数评价衬砌安全性的方法。依托蒙华铁路郑庄隧道工程,通过现场试验和有限元计算对不同厚度的钢筋混凝土衬砌进行研究,分析厚度减薄后衬砌截面内力和极限承载力的变化特征,评价衬砌结构的安全性。

1 衬砌截面安全性的评价方法

隧道衬砌作为一种多次超静定结构,由于围岩压力特性以及结构与围岩共同作用的复杂性,使得其极限状态非常复杂。从安全角度考虑,一般采用衬砌单个截面的安全性进行评价,即衬砌最危险截面发生破坏则认为结构整体破坏^[12]。《铁路隧道设计规范》中按破损阶段法计算衬砌截面的安全系数,评价其安全性^[13]。本文给出以极限承载力曲线评价衬砌安全性的方法,简便实用,下面对该方法作以说明。

1.1 衬砌截面的极限承载力曲线

衬砌截面混凝土受压压溃或受拉开裂即认为达到其极限状态,此时截面的承载力为极限承载力。衬砌截面极限状态由纯弯过渡至轴压过程中,截面形心处应变逐渐增大至极限压应变。利用Excel编写程序,通过改变衬砌截面形心处应变值确定截面上的应变分布,进而根据混凝土和钢筋的应力-应变关系^[14-15]得到截面上的应力分布,积分计算截面极限承载力 (M_u, N_u) ,得到截面的极限承载力曲线^[16-17]。按照上述方法得到截面未开裂时,40cm、50cm厚衬砌截面的极限承载力曲线,如图1所示。假设衬砌材料的设计参数取值如下:混凝土抗压极限强度 $f_c = 32.5\text{MPa}$,抗拉极限强度 $f_t = 2.4\text{MPa}$,极限压应变 $\varepsilon_{cu} = 0.0035$,屈服应变 $\varepsilon_0 = 0.002$,极限拉应变 $\varepsilon_t = 0.0001$;每延米单侧钢筋面积为 1570mm^2 ,保护层厚度为5.8cm,钢筋屈服强度 $f_y = 400\text{MPa}$,弹性模量 $E_s = 200\text{GPa}$ 。

从图1可以看出,衬砌截面极限承载力曲线细分为3部分:AO段表示混凝土抗拉极限强度控制截面安全,混凝土受拉侧应变达到极限拉应变 ε_t ,受压侧应变逐渐增大至屈服应变 ε_0 ;随着轴力的增加,抗弯承载力增大。OP段表示混凝土抗拉极限强度控制截面安全,混凝土受拉侧应变达到极限拉应变 ε_t ,

受压侧应变持续增大至极限压应变 ϵ_{cu} ；轴力持续增加，抗弯承载力增加至极值后逐渐降低。 PB 段表示混凝土抗压极限强度控制截面安全，混凝土受压侧应变达到极限压应变 ϵ_{cu} ，另一侧由拉应变逐渐变为压应变并增大至极限压应变 ϵ_{cu} ；轴力持续增加，抗弯承载力逐渐降低。

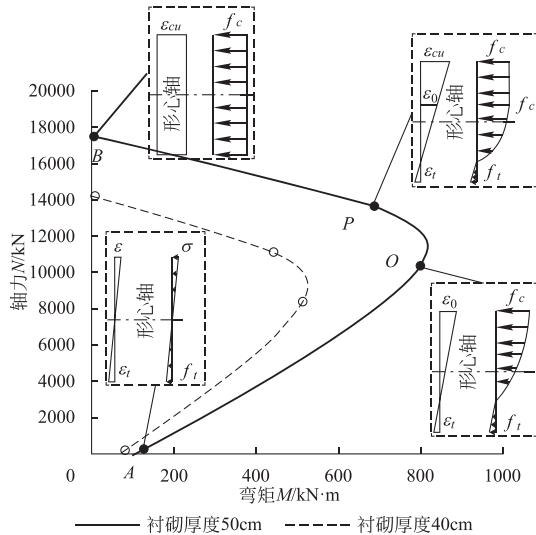


图 1 衬砌截面的极限承载力曲线

Fig. 1 Ultimate bearing capacity curves of lining section

1.2 衬砌截面的抗弯安全系数

衬砌截面的安全与截面内力 (M, N) 的大小密切相关。如图 2 所示，当衬砌截面的内力位于极限承载力曲线内侧 (C 点) 时，说明截面在该轴力 N 和弯矩 M 作用下未达到极限状态，衬砌截面安全；当截面内力位于极限承载力曲线外侧 (D 点) 时，说明截面在该轴力和弯矩作用下超过其极限承载力而发生破坏。因而依据截面极限承载力曲线，当已知截面内力时可简便有效地判断衬砌截面是否安全。

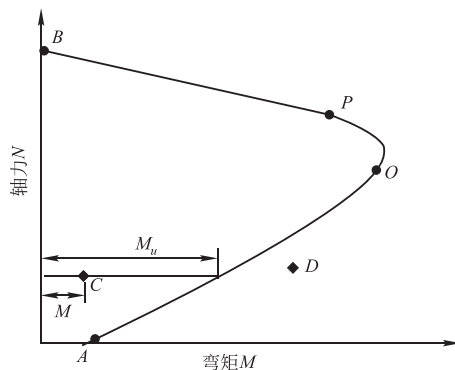


图 2 抗弯安全系数示意图

Fig. 2 Sketch of bending safety factor

衬砌作为偏心受压结构，在弯矩作用下混凝土材料容易发生开裂破坏。因而，应进一步为定量评价衬砌的安全性，定义抗弯安全系数作为衬砌截面安全性的评价指标，按照式(1)进行计算。

$$K_M = \frac{M_u}{M} \quad (1)$$

式中： K_M 为截面的抗弯安全系数； M 为衬砌截面弯矩值； M_u 为与衬砌截面轴力对应的极限弯矩值。

2 工程应用

2.1 现场试验

为了掌握衬砌结构的受力，研究其厚度减薄的可行性，选取豪华铁路郑庄隧道里程 DK373+070~DK373+150 的 80m 区间进行现场试验。依托工程为单洞双线黄土隧道，主要地层为砂质、黏质新黄土，砂质、黏质老黄土，围岩等级为 V 级，设 2 种型式的复合式衬砌。监测断面的围岩条件和埋深基本相同，且衬砌是在初期支护变形稳定后施作。监测断面的里程和复合式衬砌参数，见表 1。

表 1 监测断面和复合式衬砌参数

Table1 Test sections and composite lining parameters

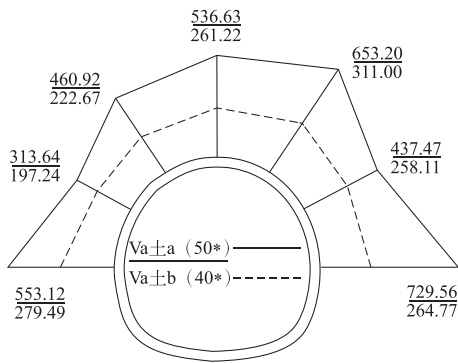
| 工况 | 断面里程 | 埋深 (m) | 初期支护参数 | 衬砌参数 |
|--------------------------------------|-----------|--------|-------------------------|----------------|
| $V_{a \pm a}$ 钢筋混 凝土 (50cm) | DK373+070 | 60 | C25 喷混凝土： 全环 25 cm | 拱墙： 50 * cm |
| | DK373+076 | 57 | 格栅钢架： 全环 H180@0.75 m | 仰拱： 50 * cm |
| | DK373+082 | 55 | | |
| $V_{a \pm b}$ 钢筋混 凝土 (40cm) | DK373+132 | 48 | C25 喷混凝土： 全环 30 cm | 拱墙： 40 * cm |
| | DK373+138 | 49 | 格栅钢架： 全环 H230@0.75 m | 仰拱： 50 * cm |
| | DK373+144 | 48 | | |

注：“H180”表示格栅钢架型号；“*”表示钢筋混凝土。

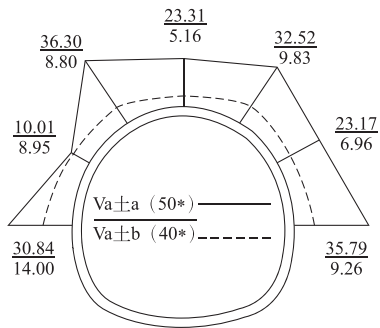
2.2 现场监测结果的分析

2.2.1 衬砌减薄前后截面内力的变化

根据现场监测得到的主筋和混凝土的应力值，以及衬砌截面的几何参数，可以计算出单位长度衬砌的截面内力值(主筋和混凝土的内力之和)，分别取减薄前(50cm)3个监测断面的平均值和减薄后(40cm)3个监测断面的平均值，作为它们内力的代表值。整理得到衬砌减薄前后，截面内力沿衬砌环向的分布，如图 3 所示。



(a) 轴力 (单位: kN)



(b) 弯矩 (单位: kN·m)

图 3 衬砌截面内力的分布 (现场监测)
Fig. 3 Internal force distribution of lining section (In-situ test)

从图 3 可以看出, 初期支护加强、衬砌厚度由 50cm 减薄为 40cm 后, 衬砌截面上的轴力和弯矩均有所减小。虽然减薄后衬砌主筋和混凝土的应力略有增加, 但是衬砌截面面积 A 和惯性矩 I 的减小更为明显, 所以衬砌的截面内力没有增加反而减小。

为了进一步说明衬砌减薄前后截面内力的变化, 按照式(2)计算衬砌减薄后截面内力的变化率, 结果见表 2。衬砌截面轴力和弯矩变化率的比较, 如图 4 所示。

$$\begin{cases} \delta_N = (N_{50^*} - N_{40^*}) / N_{50^*} \times 100\% \\ \delta_M = (M_{50^*} - M_{40^*}) / M_{50^*} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

式中: δ_N 、 δ_M 为截面轴力和弯矩的变化率; N_{50^*} 、 M_{50^*} 为 50cm 厚衬砌的截面轴力、弯矩; N_{40^*} 、 M_{40^*} 为 40cm 厚衬砌的截面轴力、弯矩。

从表 2 和图 4 的现场监测结果可以看出, 初期支护加强、衬砌厚度由 50cm 减薄为 40cm 后, 除拱腰 (4#/5#) 外, 其他 3 个监测位置的弯矩减小比率都大于轴力减小比率; 拱顶处最为明显, 减薄后衬砌截

面弯矩减小约 78%。

表 2 衬砌减薄后截面内力的变化率 (现场监测)
Table 2 Change rate of internal force after lining thinning (In-situ test)

| 衬砌位置 | 衬砌厚度 50 * cm → 40 * cm | |
|--------------|------------------------|-----------------|
| | $\delta_N / \%$ | $\delta_M / \%$ |
| 拱顶 (1#) | 51.3 | 77.8 |
| 拱肩 (2# / 3#) | 52.0 | 72.8 |
| 拱腰 (4# / 5#) | 39.1 | 40.3 |
| 侧墙 (6# / 7#) | 56.6 | 64.4 |

注: 衬砌同一位置, 取两测点内力的平均值进行计算。

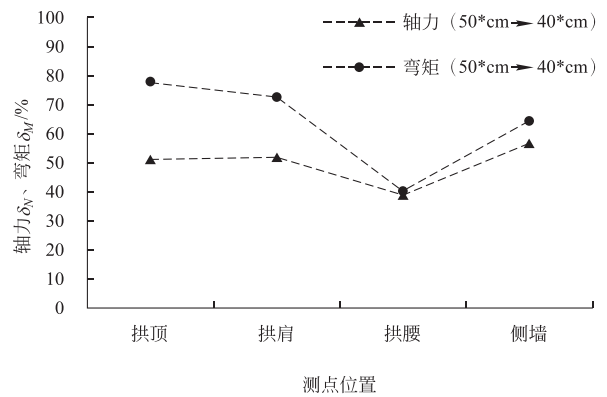


图 4 衬砌减薄后截面内力变化率的比较 (现场监测)
Fig. 4 Comparison of internal force change rate after lining thinning (In-situ test)

2. 2. 2 衬砌减薄前后截面抗弯安全系数的变化

按照第 1 节提出的衬砌截面安全性评价方法, 即根据衬砌截面内力和截面极限承载力曲线的相对关系计算抗弯安全系数, 评价试验段衬砌截面的安全性。根据减薄前后衬砌截面的设计参数 (衬砌厚度、混凝土强度、配筋, 同 1. 1 节), 分别计算得到 50cm 和 40cm 厚衬砌截面的极限承载力曲线, 并与现场监测的截面内力值 (衬砌同一位置, 两测点内力的平均值) 绘于同一 $M-N$ 坐标系内, 如图 5 所示。图 5 中衬砌截面极限承载力曲线和截面内力的关系表明: 衬砌减薄前后, 截面都处于安全状态, 相比于截面的极限承载力, 现场监测的截面内力值较小, 位于截面极限承载力曲线的内侧, 邻近混凝土抗拉极限强度控制段。

进一步, 根据衬砌截面极限承载力曲线与现场监测的截面内力值, 按照式(1)计算求出衬砌各监测位置的抗弯安全系数 K_M , 结果见表 3。衬砌减薄前后, 各监测位置截面抗弯安全系数的比较, 如图 6 所示。

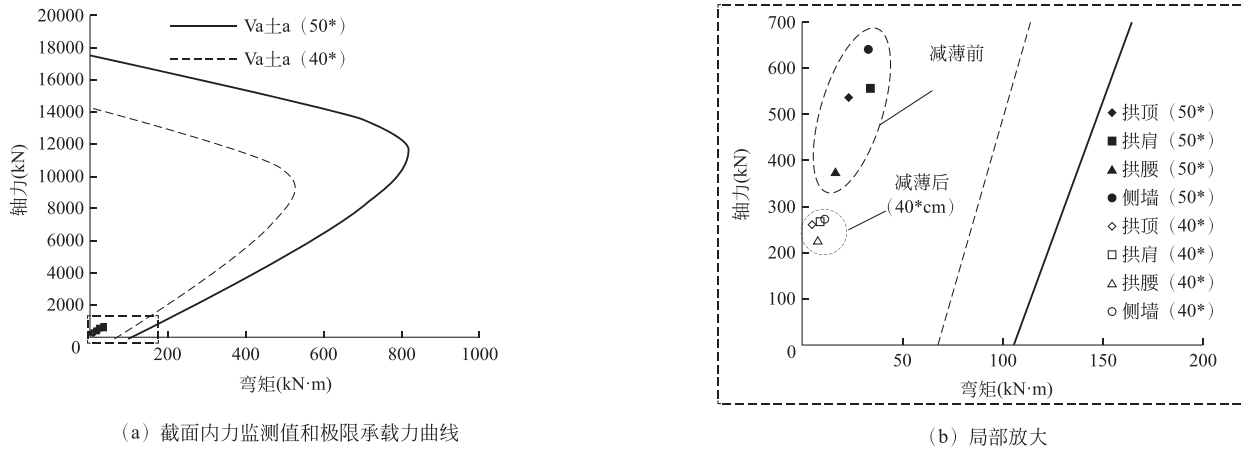


图 5 衬砌截面内力监测值和截面极限承载力的比较

Fig. 5 Comparison of monitoring internal force and ultimate bearing capacity

表 3 衬砌截面内力监测值和抗弯安全系数

Table3 Monitoring internal forces and bending safety factors of lining section

| 位置 项目 | 拱顶(1#) | | 拱肩(2# / 3#) | | 拱腰(4# / 5#) | | 侧墙(6# / 7#) | |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | $V_{a\pm a}(50^*)$ | $V_{a\pm b}(40^*)$ | $V_{a\pm a}(50^*)$ | $V_{a\pm b}(40^*)$ | $V_{a\pm a}(50^*)$ | $V_{a\pm b}(40^*)$ | $V_{a\pm a}(50^*)$ | $V_{a\pm b}(40^*)$ |
| 轴力 N (kN) | 536.63 | 261.22 | 557.06 | 266.84 | 375.56 | 227.68 | 641.34 | 272.13 |
| 弯矩 M (kN·m) | 23.31 | 5.16 | 34.41 | 9.32 | 16.59 | 7.95 | 33.31 | 11.63 |
| 极限弯矩 M_u (kN·m) | 150.26 | 85.06 | 151.94 | 85.43 | 136.99 | 82.86 | 158.89 | 85.77 |
| 抗弯安全系数 K_M | 6.5 | 16.5 | 4.4 | 9.2 | 8.3 | 10.4 | 4.8 | 7.4 |

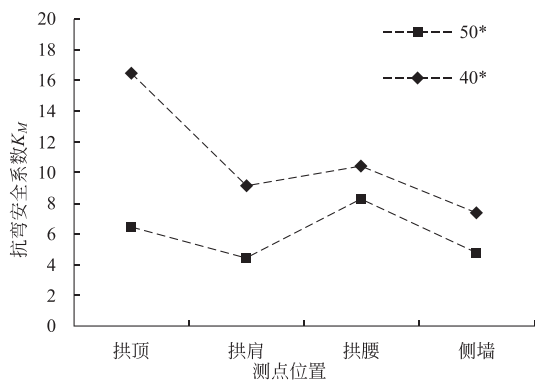


图 6 衬砌减薄前后截面抗弯安全系数的比较(现场监测)

Fig. 6 Comparison of bending safety factor before and after lining thinning(In-situ test)

从表 3 和图 6 的现场监测结果可以看出, 初期支护加强、衬砌厚度由 50cm 减薄为 40cm 后, 从拱顶到侧墙衬砌截面的抗弯安全系数都有所增大, 且拱顶处抗弯安全系数由 6.5 增大为 16.5, 增加最为明显。结果表明, 虽然衬砌减薄后截面的极限承载力有所降低, 但是截面内力同样减小, 截面的抗弯安

全系数有所增大, 抗弯安全性有所提高。

2.3 有限元计算和结果分析

2.3.1 计算模型和条件

郑庄隧道的平面应变有限元计算模型, 如图 7 所示。模型尺寸为 100 m×100 m, 边界条件为四周固定。通过控制围岩的应力释放进行模拟, 计算衬砌结构的受力, 经试算选取应力释放系数为 0.15。

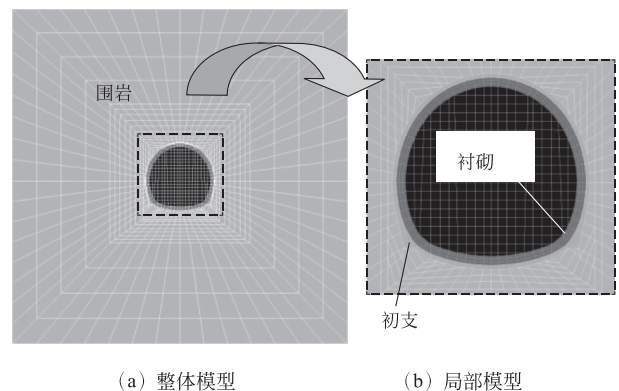


图 7 有限元计算模型

Fig. 7 Finite element calculation model

围岩及支护材料的力学参数，根据地勘报告和规范^[13]选取，初期支护和钢筋混凝土衬砌的弹性模量通过等效抗弯刚度进行换算得到。有限元计算参数，见表4。

表 4 有限元计算参数

Table4 Parameters of finite element calculation

| 工况 | 弹性模量 E (GPa) | | | 泊松比 μ | | | 荷载施加 |
|--------------|----------------|-------|-------|-----------|------|------|-------------------------|
| | 围岩 | 初支 | 衬砌 | 围岩 | 初支 | 衬砌 | |
| $V_{a\pm a}$ | 0.20 | 5.42 | 33.50 | 0.35 | 0.25 | 0.25 | 应力释放 0.15; 侧压力系数 0.5 |
| $V_{a\pm b}$ | 5.42 | 34.50 | | | | | |

注：围岩初始竖向地应力为 0.9MPa。

2.3.2 衬砌减薄前后截面内力的变化

前述 2.2 节分析了现场试验的监测结果，虽然监测结果的离散性较大，但大体上得到初期支护加强、衬砌减薄后，衬砌截面抗弯安全性能有所改善的结论。这里，进一步根据有限元计算结果，分析衬砌减薄前后截面的受力特征。衬砌减薄前后，有限元计算得到的截面内力沿衬砌环向的分布，如图 8 所示。

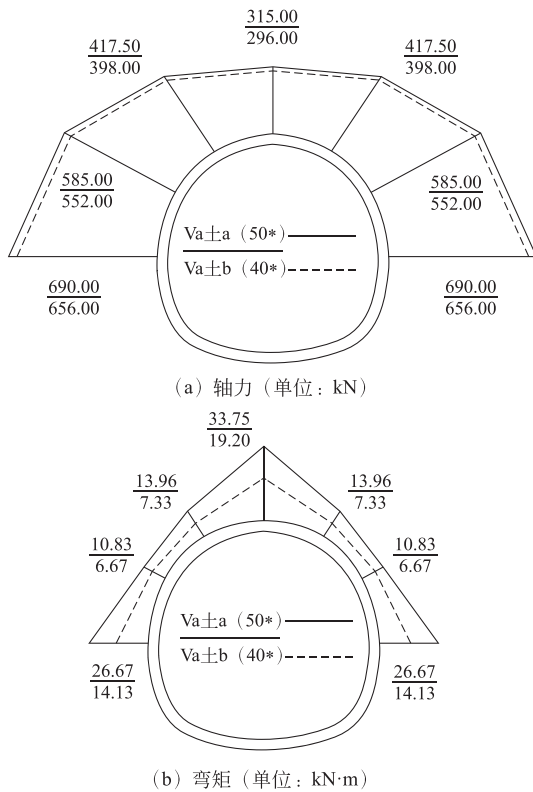


图 8 衬砌截面内力的分布 (有限元计算)
Fig. 8 Internal force distribution of lining section (Finite element calculation)

从图 8 可以看出，衬砌截面轴力从拱顶到侧墙逐渐增大，最大值分别为 690kN (50cm) 和 656kN (40cm)，位于侧墙处；弯矩从拱顶到侧墙先减小后

增大，最大值分别为 33.75kN·m (50cm) 和 19.20kN·m (40cm)，位于拱顶处。初期支护加强、衬砌减薄后，衬砌截面上的轴力和弯矩都有所减小。

进一步，按照式(2)计算衬砌减薄后截面内力的变化率。衬砌截面轴力和弯矩变化率的比较，如图 9 所示。

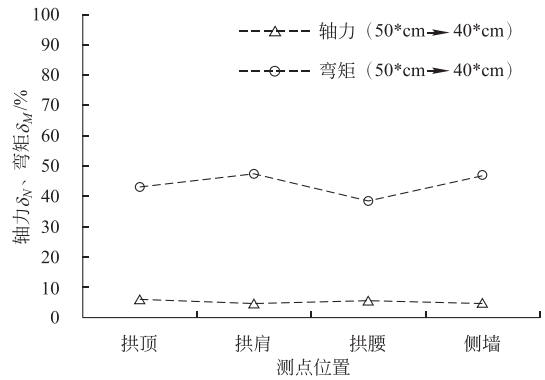


图 9 衬砌减薄后截面内力变化的比较 (有限元计算)
Fig. 9 Comparison of internal force change after lining thinning (Finite element calculation)

从图 9 的有限元计算结果可以看出，初期支护加强、衬砌厚度由 50cm 减薄为 40cm 后，衬砌截面的轴力减小约 5%，弯矩减小 40% ~ 48%；各监测位置的弯矩减小比率都大于轴力减小比率。衬砌减薄后，拱肩处弯矩减小最为明显，约 48%。

2.3.3 衬砌减薄前后截面抗弯安全系数的变化

根据上述有限元计算的截面内力和 2.2.2 节得到的衬砌截面极限承载力曲线，按照式(1)计算衬砌各监测位置的抗弯安全系数 K_M 。衬砌减薄前后，各监测位置截面抗弯安全系数的比较，如图 10 所示。

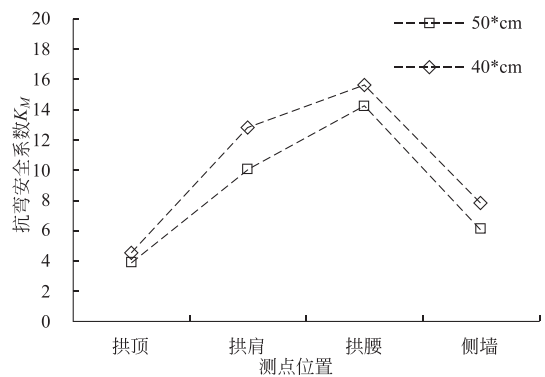


图 10 衬砌减薄前后截面抗弯安全系数比较 (有限元计算)
Fig. 10 Comparison of bending safety factor before and after lining thinning (Finite element calculation)

从图 10 的有限元计算结果可以看出，从拱顶到侧墙衬砌截面的抗弯安全系数先增大后减小，最小

值分别为 3.9 (50cm) 和 4.5 (40cm), 位于拱顶处。初期支护加强、衬砌减薄后, 衬砌各监测位置截面的抗弯安全系数都有所增大, 且拱肩处抗弯安全系数由 10.1 增大为 12.8, 增加显著。结果表明, 衬砌减薄后, 截面抗弯安全系数增大, 抗弯安全性有所提高。

综上所述, 现场试验监测和有限元计算结果都表明: 初期支护加强、衬砌减薄后, 衬砌截面轴力和弯矩都有所减小, 且弯矩的减小比率大于轴力的减小比率; 衬砌截面的抗弯安全系数增大, 抗弯安全性有所提高。因而, 在隧道衬砌设计时, 厚度设计过大会导致截面刚度过大, 抗弯安全系数反而会减小, 衬砌容易发生开裂破坏, 适当减薄衬砌厚度, 有利于保证其抗弯安全性。

3 结 论

本文依托蒙华铁路郑庄隧道工程, 进行了衬砌厚度减薄的现场试验研究, 基于截面极限承载力曲线评价了衬砌减薄前后截面的安全性, 主要研究结论如下:

(1) 根据混凝土和钢筋的应力-应变关系, 计算得到衬砌截面极限承载力曲线, 提出以截面抗弯安全系数为评价指标的衬砌安全性评价方法。

(2) 衬砌截面极限承载力曲线分为 3 部分, 截面安全分别由混凝土抗拉和抗压极限强度控制。在抗拉极限强度控制段, 随着轴力的增大, 截面抗弯承载力增大至极值后逐渐降低; 在抗压极限强度控制段, 随着轴力的增大, 截面抗弯承载力逐渐降低。

(3) 郑庄隧道衬砌的现场监测结果表明, 衬砌减薄前后, 截面均处于安全状态, 相比于截面的极限承载力, 现场监测的截面内力值较小, 位于截面极限承载力曲线的内侧, 邻近混凝土抗拉极限强度控制段。

(4) 初期支护加强、衬砌减薄后, 衬砌截面轴力和弯矩均有所减小, 且弯矩的减小比率大于轴力的减小比率; 衬砌截面的抗弯安全系数增大, 抗弯安全性有所提高。在隧道衬砌设计时, 厚度设计过大会导致截面刚度过大, 抗弯安全系数反而会减小, 衬砌容易发生开裂破坏, 适当减薄衬砌厚度, 有利于保证其抗弯安全性。

参 考 文 献

[1] 王建宇.对隧道衬砌结构计算问题的思考[J].现代隧道技术, 2014, 51(2): 1-4 (Wang Jianyu. On calculation of tunnel lining structure[J]. Modern Tunnelling Technology,

- 2014, 51(2): 1-4 (in Chinese))
- [2] 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 Zhanchang, Xie Yongli, Yang Xiaohua, 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))
- [3] 房倩, 张顶立, 王毅远, 等.高速铁路隧道初支、二衬间接触压力研究[J].岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3377-3385 (Fang Qian, Zhang Dingli, Wang Yiyuan, et al. Study of contact pressure between primary lining and secondary lining for tunnels of passenger dedicated lines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3377-3385 (in Chinese))
- [4] 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 Pengfei, Zhang Dingli, Zhao Yong, 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))
- [5] 孙明社, 马涛, 申志军, 等.复合式衬砌结构中衬砌分担围岩压力比例的研究[J].岩土力学, 2018, 39(增1): 437-445 (Sun Mingshe, Ma Tao, Shen Zhijun, et al. Study of lining sharing surrounding rock pressure in composite lining structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S1): 437-445 (in Chinese))
- [6] 周心培.隧道衬砌厚度与安全系数等关系的分析[J].铁道标准设计通讯, 1982(11): 19-22
- [7] 赵占厂, 谢永利.黄土公路隧道衬砌参数影响性状分析[J].岩土工程学报, 2005, 27(11): 1291-1295 (Zhao Zhanchang, Xie Yongli. Performance analysis of loess highway tunnel affected by lining parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1291-1295 (in Chinese))
- [8] 宋战平, 荆敏, 韩日美, 等.基于强度安全系数概念的隧道衬砌结构优选设计[J].西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(4): 499-503, 508 (Song Zhanping Jing Min, Han Rimei, et al. Optimization design of tunnel lining structure and its application [J]. Journal Of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(4): 499-503, 508 (in Chinese))
- [9] 陈建勋, 李建安.公路隧道二次衬砌厚度的优化[J].交通运输工程学报, 2006, 6(3): 68-72 (Chen Jianxun, Li Jianan. Secondary lining thickness optimization of road tunnel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 68-72 (in Chinese))
- [10] 孙毅, 张顶立, 于富才, 等.高速铁路隧道二次衬砌的变形特性与极限承载能力[J].中国铁道科学, 2016, 37(1): 60-70 (Sun Yi, Zhang Dingli, Yu Fucui, et al. Deformation characteristics and ultimate bearing capacity of secondary lining for high speed railway tunnel [J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 60-70 (in Chinese))

- 译.北京:高等教育出版社,2006
- [7] 梁波,蔡英.不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J].铁道学报,1999,21(2):84-88(Liang Bo, Cai Ying. Dynamic analysis on subgrade of high speed railways in geometric irregular condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 84-88 (in Chinese))
- [8] 黄宁.大型结构件的疲劳寿命预测方法研究[D].长沙:中南大学,2012(Huang Ning. Research on fatigue life prediction methods for large-scale components [D]. Changsha: Central South University, 2012 (in Chinese))
- [9] 王旭亮.不确定性疲劳寿命预测方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2009(Wang Xuliang. Research on uncertain methods for fatigue life prediction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009 (in Chinese))
- [10] TB10003—2016 铁路隧道设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2017(TB10003—2016 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017 (in Chinese))

高立平(1989—),男,博士研究生。主要从事铁路隧道病害机理及安全性评价方面的研究。

骆建军(1971—),男,博士,副教授。主要从事高速铁路隧道空气动力学方面的研究。

王 磊(1987—),男,博士,博士研究生。主要从事高速铁路隧道空气动力学方面的研究。

(上接第 331 页)

- [11] 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,2011,32(增1):570-577(Li Ming, Chen Hongkai. Experimental research on tunnel health criterion of deficiency in lining thickness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 570-577 (in Chinese))
- [12] 杨成永,刘维宁,张弥.隧道素砼衬砌结构的极限状态[J].北方交通大学学报,1999,23(4):53-55(Yang Chengyong, Liu Weining, Zhang Mi. On limit states of tunnel concrete lining structures [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1999, 23(4): 53-55 (in Chinese))
- [13] TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2017(TB 10003—2016 Code for design of railway tunnel [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017 (in Chinese))
- [14] 过镇海.钢筋混凝土原理[M].第3版.北京:清华大学出版社,2013
- [15] 程文灏,颜德姮,王铁成.混凝土结构上册 混凝土结构设计原理[M].第四版.北京:中国建筑工业出版社,2008
- [16] 松岡 茂,益田 彰久,松尾 庄二,など.ひび割れを考慮したトネル覆工解析に関する研究[C]//土木学会論文集 No.554.東京:土木学会,1996(Matsuoka S, Masuda A, Matsuo S, et al. A study on simulation of tunnel lining which involves crack [C]//Proceedings of 554 Civil Society in Japanese. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1996 (in Japanese))
- [17] 吴旭,孙明社,夏勇,等.基于截面极限承载力曲线的衬砌结构安全性评价方法研究[J].中国公路学报,2020,33(3):160-169(Wu Xu, Sun Mingshe, Xia Yong, et al. Research on evaluation method of lining safety based on ultimate bearing capacity curve of lining section [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 160-169 (in Chinese))

孙明社(1989—),男,博士研究生。主要从事隧道及地下工程方面的研究。

韩贺庚(1962—),男,本科,高级工程师。主要从事铁路工程建设技术管理方面的工作。

吴 旭(1962—),男,博士,教授。主要从事隧道及地下工程方面的研究。

夏 勇(1980—),男,硕士,高级工程师。主要从事隧道及地下工程方面的研究。

孙作强(1993—),男,硕士研究生。主要从事隧道及地下工程方面的研究。