

# 围岩与初期支护间缓冲层的大变形控制效果及合理厚度研究

张瑞<sup>1</sup>, 林萍<sup>2</sup>, 刘成禹<sup>2</sup>

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广西 南宁 533307;

2. 福州大学, 福建 福州 350116)

**摘要:** 以丽江至香格里拉铁路中义隧道为依托, 采用数值计算的方法, 结合试验段的现场监测资料, 对在围岩和初期支护间设置缓冲层控制初期支护变形的效果及不同地应力侧压力系数下缓冲层的合理厚度进行了研究。研究表明: 在围岩与初期支护间的边墙段设置合理厚度的高密度泡沫板(EPS)可显著提高初期支护的稳定性, 并使初期支护最大水平收敛、拱顶下沉减少10%左右; 中义隧道埋深在800 m附近、发生严重大变形的区段, 地应力侧压力系数小于0.9时, 可不铺设缓冲层; 地应力侧压力系数为1.0~1.3、1.3~1.5、1.5~1.7时, 缓冲层的合理厚度分别为100 mm、150 mm、200 mm。

**关键词:** 大变形隧道; 地应力; 侧压力系数; 缓冲层; 合理厚度

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2021)01-0176-06

## Large Deformation Control Effects and Reasonable Thickness of Buffer Layer Set Between Surrounding Rock and Initial Support

ZHANG Rui<sup>1</sup>, LIN Ping<sup>2</sup>, LIU Chengyu<sup>2</sup>

(1. Construction Co., Ltd China Railway Tunnel Group, Nanning, Guangxi 533307, China;

2. Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

**Abstract:** In order to control the initial support deformation, this paper took Zhongyi tunnel of Lijiang to Shangri-La railway as an example, to analyze the large deformation control effects and reasonable thickness of buffer layer set between surrounding rock and initial support. The research results are as follows. High-density foam board (EPS) with reasonable thickness which set between surrounding rock and initial support can significantly improve the initial support stability, and make the maximum level converge of initial support and vault crown settlement decreased by about 10%. The buffer layer is not necessary in the section of Zhongyi tunnel with severely large deformation where the buried depth is near 800 m, and the lateral pressure coefficient of geostress is less than 0.9. When the lateral pressure coefficient of geostress is 1.0~1.3, 1.3~1.5, 1.5~1.7, the reasonable thickness of buffer layer is 100 mm, 150 mm, 200 mm, respectively.

**Keywords:** large deformation tunnel; geostress; lateral pressure coefficient; buffer layer; reasonable thickness

随着我国铁路、公路建设的深入推进,在地质构造发育、地应力高、围岩破碎地区建设长大隧道已不可避免。围岩大变形控制是此类地区地下工程建设面临的重大技术难题<sup>[1-2]</sup>。

高地应力软岩大变形隧道施工中,经常发生初

期支护变形侵限、钢拱架扭曲、喷射混凝土开裂等现象<sup>[3-5]</sup>,严重威胁施工人员安全,影响施工进度。初期支护是控制围岩变形的关键结构,其变形及稳定情况直接反映了围岩变形的控制效果。因此,对高地应力大变形隧道控制初期支护变形,提高其稳定

性的方法和技术进行研究具有重要意义。

基于放抗结合理念的多层支护结构在高地应力大变形隧道中得到广泛使用,并取得较好的变形控制效果<sup>[2,6-9]</sup>。近年来,已有学者对缓冲层在地下工程支护中的应用进行了研究。何一韬等<sup>[10]</sup>的研究表明,将缓冲层铺设在盾构隧道衬砌与二次衬砌之间,可改善衬砌结构的受力条件,防止外衬破坏。陈卫忠等<sup>[11]</sup>对具有蠕变特性的围岩研究表明,在隧道二次衬砌与初期支护间设置具有较高变形能力的预留变形层,能够改善支护结构受力,保证衬砌结构的长期稳定。吴顺川等<sup>[12]</sup>对膨胀性围岩的研究表明,在隧道二次衬砌与初期支护间设置缓冲层可有效减小二次衬砌变形,提高其稳定性。田云等<sup>[13]</sup>的研究表明,在二次衬砌与初期支护间设置能够吸收围岩流变变形的缓冲层,可提高软弱围岩隧道的长期稳定性。

目前,对缓冲层在隧道工程中的应用研究,针对的都是缓冲层设置在初期支护与二次衬砌间的情况,主要目的是改善二次衬砌的受力条件,减少其变形和开裂。对大多数高地应力大变形隧道而言,围岩和支护结构的破坏主要发生在二次衬砌施作前<sup>[2,6-7,14]</sup>。因此,针对高地应力大变形隧道,对在围岩与初期支护间设置缓冲层的作用和效果,以及不同工程条件下缓冲层的设置厚度等进行深入研究具有重要的现实意义。

本文以丽香铁路中义隧道为依托,在现场监测和缓冲层材料室内试验的基础上,对围岩与初期支护间设置缓冲层的效果及不同地应力侧压力系数下的缓冲层合理厚度进行研究,以期对高地应力大变形隧道变形控制提供借鉴。

1 工程概况

中义隧道为单线铁路隧道,长 14.755 km,最大埋深 1 240 m,是丽江至香格里拉铁路最长的隧道,位于云南省玉龙县境内。隧道地处青藏高原东南缘,地质构造复杂,残余构造应力大。地应力实测结果表明:与隧道走向接近垂直的水平方向为地应力最大主应力方向,该方向地应力与自重应力的比值为 0.9~1.9,平均值为 1.2。

中义隧道 2014 年年底正式开工,2016 年年初开始隧道各开挖面相继出现大变形。在初期支护加强的情况下(全环间距 0.6 m 的 I20b 型钢拱架,27 cm 厚的 C25 喷射混凝土,长 4.5 m、间距 1 m×1 m 的系统锚杆),最大水平收敛位移仍高达 1 000 mm

以上。初期支护变形具有水平收敛大于拱架下沉、边墙至拱腰段变形最大的特点,如图 1 所示。

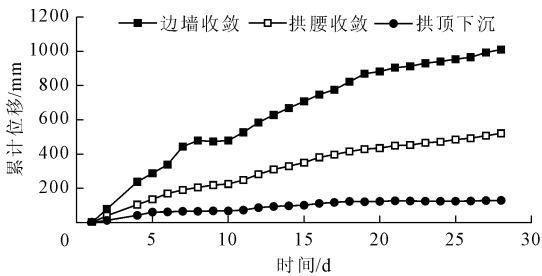


图 1 典型断面初期支护变形历时曲线

由于围岩变形快,很多区段初期支护尚未成环前就已破坏或变形侵限,给隧道施工进度和安全造成了极大影响。因此,研究适宜的、控制初期支护成环前变形的技术措施成了当务之急。经技术、经济比选,在围岩与初期支护间设缓冲层成为可行方案之一。

2 缓冲层材料及其物理力学参数

经现场试验和综合比选,中义隧道围岩与初期支护间采用的缓冲层为聚苯乙烯泡沫板(EPS)。它由聚苯乙烯发泡而成,成型过程中形成许多封闭的空腔,具有轻质、高强的特点<sup>[15]</sup>。

为获得聚苯乙烯泡沫板(EPS)的物理力学参数,按照国内外学者对 EPS 进行力学特性试验研究的方法<sup>[15-16]</sup>,对边长为 50 mm 的 EPS 立方体试件进行单轴压缩试验。试样压缩过程中的轴向应力-应变曲线如图 2 所示,轴向、横向应变曲线如图 3 所示。

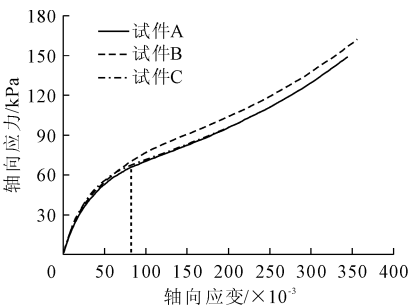


图 2 轴向应力-应变曲线

由图 2 可看出:聚苯乙烯泡沫板在应变 > 0.08 (压缩量 > 4 mm) 以后,应力和应变近似呈线性关系。即,聚苯乙烯泡沫板在压缩变形较大的阶段,应力-应变关系可按线弹性考虑。

由图 3 可看出:聚苯乙烯泡沫板在轴向应变 < 0.13 (压缩量 < 6.5 mm) 之前,横向应变很小;轴

向应变  $>0.13$  (压缩量  $>6.5\text{ mm}$  后), 横向应变与轴向应变的比值 (泊松比  $\mu$ ) 随轴向应变的增加逐渐增大, 泊松比为  $0.16\sim0.30$ 。

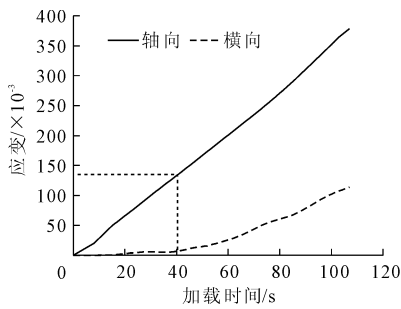


图 3 轴向、横向应变曲线

工程实际中,如果聚苯乙烯泡沫板压缩量太小,则不能发挥控制围岩变形的作用。中义隧道在围岩与初期支护间设缓冲层的区段,现场试验发现,单块泡沫板(厚  $50\text{ mm}$ ) 的压缩量都在  $15\text{ mm}$  以上。为此,根据图 2、图 3 的试验结果得出聚苯乙烯泡沫板的弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$ ,见表 1。

| 表 1 聚苯乙烯泡沫板的物理力学参数  |           |                                           |
|---------------------|-----------|-------------------------------------------|
| 弹性模量 $E/\text{GPa}$ | 泊松比 $\mu$ | 重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ |
| 0.42                | 0.25      | 7.85                                      |

3 缓冲层效果及设置参数分析

数值计算方法可以模拟复杂的工程条件,已成为地下工程围岩稳定性分析的重要手段之一,广泛用于复杂地下工程的计算分析<sup>[17]</sup>。为此,本文也采用数值方法对初期支护与围岩间设缓冲层时初期支护的内力和位移进行计算。MIDAS/GTS 是目前隧道工程中普遍使用的数值计算软件,本文的数值计算也采用该软件。

3.1 数值分析模型

中义隧道埋深小于  $700\text{ m}$  的区段,经过已施工段的工程实践,采用加强支护、合理预留变形量、根据监控量测结果适时进行初期支护补强等措施可较好地控制大变形。拟在围岩和初期支护间设缓冲层的区段,隧道埋深大多在  $700\text{ m}\sim900\text{ m}$ ,因此,数值计算选取隧道埋深为  $800\text{ m}$ 。隧址区地应力实测结果表明:与隧道走向接近垂直的水平方向为最大主应力方向,该方向地应力与自重应力的比值为  $0.9\sim1.9$ ,平均值为  $1.2$ 。为此,数值计算选取的地应力侧压系数为  $0.9\sim1.7$ 。

3.1.1 数值模型构建

隧道开挖引起的围岩应力重分布的范围大体是

隧洞半径的 5 倍<sup>[17]</sup>。中义隧道大变形区段横断面形状接近椭圆,高  $10.9\text{ m}$ 、宽  $8.91\text{ m}$ 。为减少边界效果对计算结果的影响,模型上边界距隧顶  $50\text{ m}$ 、左、右边界距隧道中心  $40\text{ m}$ 。数值模型高  $100\text{ m}$ 、宽  $80\text{ m}$ ,边界条件为:左、右边界水平方向固定,底部竖向固定,如图 4 所示。

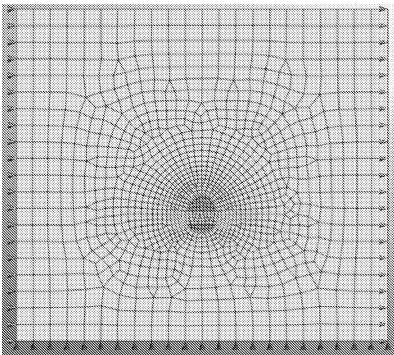


图 4 数值模型

隧道大变形区段为 V 级围岩,以片理化玄武岩为主,为层状碎裂结构,层厚  $1\text{ cm}\sim10\text{ cm}$ 。为获得大变形区段围岩的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ,在现场选取 4 个测点进行原位钻孔剪切测试,得到围岩的  $c$ 、 $\varphi$  值为  $220\text{ kPa}$ 、 $15.0^\circ$ 。在现场测试的基础上,参考《铁路隧道设计规范》<sup>[18]</sup> (TB 10003—2005) 选取围岩的物理力学参数,见表 2。

| 表 2 围岩物理力学参数                                 |                       |      |                       |                      |
|----------------------------------------------|-----------------------|------|-----------------------|----------------------|
| 重度<br>$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 变形模量<br>$/\text{GPa}$ | 泊松比  | 内摩擦角<br>$/(^{\circ})$ | 黏聚力<br>$/\text{kPa}$ |
| 23.6                                         | 1.8                   | 0.35 | 15                    | 220                  |

中义隧道大变形最严重,拟在围岩和初期支护间铺设缓冲层的区段采用双层钢拱架 + 喷锚联合支护。支护参数为:间距  $0.8\text{ m}$  的 I20b 双层钢拱架,厚  $54\text{ cm}$  的 C25 喷射混凝土,长  $4.5\text{ m}$ 、间距  $1\text{ m}\times1\text{ m}$  的系统锚杆,  $40\text{ cm}$  的预留变形量。数值模型中,将钢拱架和喷射混凝土层作为一个整体,用梁单元模拟,系统锚杆用杆单元模拟。钢拱架和喷射混凝土层的整体弹性模量,按照刚度相等的原则,将钢拱架的折算给喷射混凝土层<sup>[19]</sup>。初期支护的物理力学参数见表 3。

| 表 3 初期支护物理力学参数 |                                              |                       |      |
|----------------|----------------------------------------------|-----------------------|------|
| 材料             | 重度<br>$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 弹性模量<br>$/\text{GPa}$ | 泊松比  |
| 锚杆             | 78.5                                         | 200.0                 | 0.30 |
| 钢拱架及喷射混凝土      | 25.0                                         | 21.3                  | 0.20 |

围岩和初期支护间的缓冲层用平面应变单元模拟,采用线弹性模型,参数根据本文第 2 节聚苯乙烯泡沫板的试验结果按表 1 选取。围岩采用弹塑性本构关系中的摩尔-库仑模型,参数按表 2 选取。

在拱顶围岩和初期支护间铺设缓冲层,施工安全无法保障,加之中义隧道大变形区段初期支护变形具有水平收敛大于拱顶下沉的特点。因此,缓冲层仅在拱腰至拱脚段铺设。

3.1.2 数值模型合理性验证

中义隧道 DK42+840—DK43+050 段隧道埋深 780 m~820 m,平均埋深 800 m,附近地应力测孔测得的地应力侧压力系数为 1.38。采用双层钢拱架支护,并在围岩和初期支护间设 10 cm 厚聚苯乙烯泡沫板缓冲层,目前施工已完成。该区段 22 个监控量测断面测得的、初期支护变形稳定后的边墙、拱腰水平收敛及拱顶下沉平均值分别为 556.3 mm、331.0 mm 和 198.9 mm。施工中采用 40 cm 的预留变形量,绝大部分区段变形未超限。

根据 DK42+840—DK43+050 段的隧道平均埋深、初期支护参数和缓冲层厚度,按照 3.1.1 节所述数值模型计算出的围岩水平、竖向位移如图 5 所示。

由图 5 可看出:数值模型计算出的边墙、拱腰水平收敛位移及拱顶下沉分别为 572.1 mm、356.7 mm 和 182.9 mm。数值模型计算结果与 DK42+840—DK43+050 段 22 个断面实测结果平均值的相对误差分别为 2.8%、7.2% 和 8.8%。

数值模型计算结果和实测结果均具有边墙水平收敛最大、拱顶下沉最小、拱腰水平收敛居中的特点,两者在数值上也比较接近。这说明上述数值计算模型及参数选取是合理的,可用于后续的计算分析。

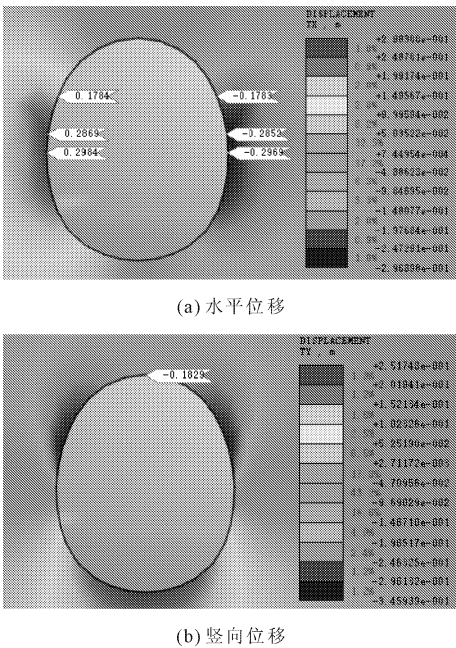


图 5 围岩位移(单位:m)

3.2 围岩与初期支护间铺设缓冲层的效果

由于中义隧道地应力侧压力系数实测值平均值为 1.2。为此,选取隧道埋深 800 m、地应力侧压力系数 1.2,对拱脚至拱腰设置厚度分别为 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm 缓冲层时的初期支护位移和内力进行计算。

计算结果表明:地应力侧压力系数 1.2,埋深 800 m,不同缓冲层厚度下的初期支护位移、内力分布规律基本相同;初期支护最大位移、最大弯矩、最大轴力以及喷射混凝土最大拉、压应力的出现部位也基本相同,但不同缓冲层厚度下的数值并不相等。隧道埋深 800 m,双层钢拱架,不同缓冲层厚度下初期支护位移、内力的主要计算结果见表 4。

表 4 埋深 800 m、地应力侧压力系数 1.2 双层拱架下初期支护位移及内力计算结果

| 缓冲层<br>厚度/mm | 水平收敛<br>最大值/mm | 拱顶<br>下沉/mm | 最大弯矩<br>/(kN·m) | 最大弯矩<br>出现部位 | 最大轴力<br>/kN | 最大轴力<br>出现部位 | 最大压应力<br>/MPa | 最大压应力<br>出现部位 | 最大压应力<br>与喷射混凝土<br>强度标准值之比 |
|--------------|----------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|----------------------------|
| 0            | 565.7          | 161.4       | 5320.3          | 拱顶           | 55518.6     | 拱顶—拱腰        | 20.85         | 拱顶、边墙         | 1.25                       |
| 50           | 513.1          | 152.8       | 5250.2          | 拱顶           | 47642.2     | 拱顶—拱腰        | 14.91         | 拱顶、边墙         | 0.89                       |
| 100          | 508.0          | 147.1       | 5424.2          | 拱顶           | 49546.8     | 拱顶—拱腰        | 14.13         | 拱顶、边墙         | 0.85                       |
| 150          | 509.5          | 143.0       | 5403.2          | 拱顶           | 47802.9     | 拱顶—拱腰        | 13.55         | 拱顶、边墙         | 0.81                       |
| 200          | 513.9          | 139.5       | 5591.8          | 拱顶           | 46351.9     | 拱顶—拱腰        | 12.48         | 拱顶、边墙         | 0.75                       |

由表 4 可看出:  
(1) 与不设缓冲层相比,在围岩与初期支护间增设厚度 50 mm~200 mm 的缓冲层可使水平收敛最大位移减小 50 mm~60 mm,拱顶下沉减少 15 mm

~22 mm,减少幅度均在 10% 左右;缓冲层厚度超过 100 mm 后,初期支护位移随缓冲层厚度的增加变化不大。  
(2) 初期支护最大轴力、喷射混凝土最大压应

力随缓冲层厚度增加逐渐减少,在缓冲层厚度 50 mm 时减少最为明显;未设缓冲层时,喷射混凝土最大压应力达 20.85 MPa,已超过其轴心抗压强度标准值 16.7 MPa,增设厚度不小于 50 mm 的缓冲层后,喷射混凝土最大压应力均小于其轴心抗压强度标准值。

表 4 的计算结果表明,初期支护最大轴力、喷射混凝土最大压应力均出现在拱顶和边墙,这也是目前初期支护破坏最严重的部位,如图 8、图 9 所示。现场调查发现,拱顶、边墙初期支护的破坏过程大多表现为:刚开始时喷射混凝土发生压碎、剥落,并随初期支护变形增大逐渐加剧,最后发生钢拱架压屈、弯折,如图 6、图 7 所示。

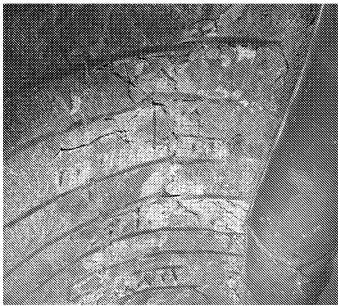


图 6 拱顶破坏图



图 7 边墙破坏图

由初期支护破坏过程可看出:拱顶和边墙是初期支护最先发生破坏的关键部位,其破坏是由喷射混凝土的压碎开始的。因此,可将初期支护喷射混凝土的最大压应力是否超过其轴心抗压强度标准值作为判断初期支护是否开始失稳的标准。

表 4 的计算结果表明,在围岩与初期支护间设置缓冲层后,初期支护喷射混凝土最大压应力随着缓冲层厚度增加逐渐减少。这说明,围岩和初期支护间缓冲层的铺设可有效提高初期支护的稳定性。

为验证围岩和初期支护间增设缓冲层的变形控制效果。在铺设缓冲层的区段,采用埋设简易测量装置(见图 8)和钻芯取样(见图 9)的方法,得到初期支护变形稳定后 EPS 泡沫板缓冲层挤压后的厚度。结果表明:原先厚度为 10 cm 的缓冲层,挤密后的厚度大多为 6 cm ~ 7 cm,单侧厚度减少 3 cm ~ 4 cm。即,可减少围岩的单侧收敛变形 3 cm ~ 4 cm,这与表 4 的计算结果基本一致。

上述结果表明,在围岩与初期支护间增设缓冲层可明显提高初期支护的稳定性,并减少初期支护的变形,有较好的大变形控制效果。

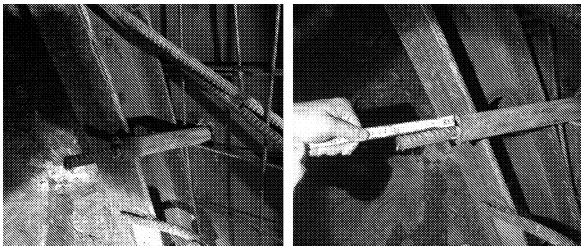


图 8 缓冲层厚度变化简易测量装置



图 9 钻孔取芯确定缓冲层压缩后的厚度

3.3 不同地应力侧压力系数下的缓冲层合理厚度

由于中义隧道拟在围岩和初期支护间设缓冲层的区段隧道埋深大多在 700 m ~ 900 m 附近,地应力侧压力系数实测值在 0.9 ~ 1.7 之间。为此,对隧道埋深 800 m,地应力侧压力系数分别为 0.7、0.9、1.1、1.2、1.3、1.5、1.7,在拱腰至拱脚铺设不同厚度缓冲层时的初期支护位移和内力进行数值计算。为保证初期支护的稳定性,喷射混凝土的最大压力应小于其轴心抗压强度标准值(C25 混凝土为 16.7 MPa)。以此为标准,得出隧道埋深 800 m、不同地应力侧压力系数下的缓冲层合理厚度见表 5。

表 5 埋深 800 m 不同地应力侧压系数下的合理缓冲层厚度

| 地应力侧压力系数   | <0.9 | 1.0 ~ 1.3 | 1.3 ~ 1.5 | 1.5 ~ 1.7 |
|------------|------|-----------|-----------|-----------|
| 缓冲层合理厚度/mm | 不设   | 100       | 150       | 200       |

按照表 5 的厚度铺设缓冲层,与未设缓冲层相比,初期支护最大水平收敛和拱顶下沉的减小数值见表 6。

表 6 埋深 800 m 设置缓冲层后初期支护位移减少情况

| 地应力侧压力系数 |        | 1.1  | 1.2  | 1.3  | 1.5  | 1.7  |
|----------|--------|------|------|------|------|------|
| 最大水平收敛减少 | 绝对值/mm | 48.9 | 57.7 | 61.4 | 59.6 | 62.4 |
|          | 相对值/%  | 9.2  | 10.2 | 10.5 | 9.6  | 9.7  |
| 拱顶下沉减少   | 绝对值/mm | 13.7 | 14.3 | 16.4 | 22.7 | 26.7 |
|          | 相对值/%  | 8.7  | 8.9  | 10.1 | 13.8 | 16.1 |

由表 6 可看出:隧道埋深 800 m、地应力侧压力系数  $\lambda = 1.1 \sim 1.7$  时,在围岩与初期支护间设置合

理厚度的缓冲层后,可使初期支护最大水平收敛位移减少 49 mm ~ 62 mm,拱顶下沉减少 14 mm ~ 27 mm;总体而言,地应力侧压力系数越高,初期支护最大水平收敛、拱顶下沉减少的绝对数值越大。这说明,地应力侧压力系数越大,在围岩与初期支护间设置缓冲层控制变形的效果越明显。

## 4 结 论

(1) 在围岩与初期支护间设置厚度合理的、具有较高变形能力的 EPS 泡沫板缓冲层,可明显减少初期支护的最大轴力和喷射混凝土最大压应力,显著提高初期支护的稳定性。

(2) 丽香铁路中义隧道埋深 800 m、地应力侧压力系数  $\lambda = 1.1 \sim 1.7$  条件下的计算结果表明,在围岩与初期支护间设置合理厚度的缓冲层后,可使初期支护最大水平收敛位移、拱顶下沉减少 10% 左右。

(3) 丽香铁路中义隧道埋深在 800 m 附近、发生大变形的区段,地应力侧压力系数小于 0.9 时,可不设缓冲层;地应力侧压力系数为 1.0 ~ 1.3、1.3 ~ 1.5、1.5 ~ 1.7 时,缓冲层的合理厚度分别为 100 mm、150 mm、200 mm。

## 参考文献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [2] 李术才,徐 飞,李利平,等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1366-1376.
- [3] 陈子全,何 川,吴 迪,等. 高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1237-1244.
- [4] 陈锦涛,韩爱果,任光明. 基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 178-182.
- [5] 丁远振,谭忠盛,马 栋. 高地应力断层带软岩隧道变形特征与控制措施研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S1): 129-134.
- [6] 汪 波,郭新新,何 川,等. 当前我国高地应力隧道支护技术特点及发展趋势浅析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 1-10.
- [7] 仇文革,王 刚,龚 伦,等. 一种适应隧道大变形的限阻耗能型支护结构研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1785-1795.
- [8] 贾宏俊,王 辉. 软岩大变形巷道刚柔结合支护方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 11-16.
- [9] 汪 波,王 杰,吴德兴. 让压支护技术在软岩大变形隧道中的应用探讨[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 115-122.
- [10] 何一韬,罗泽军,张清照,等. 大直径盾构隧道双层衬砌力学特性分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 1139-1143.
- [11] 陈卫忠,田洪铭,杨阜东,等. 泡沫混凝土预留变形层对深埋软岩隧道长期稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2577-2583.
- [12] 吴顺川,韩 伟,陈 钊,等. 基于膨胀本构的石膏岩隧道衬砌缓冲层厚度优化研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1182-1190.
- [13] 田 云,陈卫忠,田洪铭,等. 考虑软岩强度时效弱化的缓冲层让压支护设计研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 237-245.
- [14] 闫红江,邓志刚. 丽香铁路中义隧道高地应力软岩大变形控制技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 67-72.
- [15] 贾 鹏,徐永福. EPS 块体的强度和变形特性研究综述[J]. 现代交通技术, 2017, 14(6): 8-11.
- [16] 雷忠琦,姚小虎,龙舒畅,等. 聚苯乙烯泡沫材料的动态压缩特性[J]. 高压物理学报, 2019, 33(2): 100-109.
- [17] 郑颖人,朱合华,方正昌,等. 地下工程围岩稳定性分析与设计理论[M]. 北京:人民交通出版社, 2012.
- [18] 铁路隧道设计规范: TB 10003—2005[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [19] 邓志刚. 基于相对变形的大变形隧道地应力反算——以丽香铁路中义隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 194-201.