

# 基于夹层理论的地铁隧道防水型单层衬砌叠合结构受力分析\*

温书亿 邓一三

(中铁科学研究院集团有限公司, 610031, 成都)

**摘 要** [目的]喷涂防水膜可使地铁隧道衬砌中混凝土与防水膜发生复合作用,然而目前还没有关于防水型单层衬砌叠合结构分析的设计指导和参考文献。提出了基于夹层理论确定隧道单层衬砌叠合结构厚度及按照刚度进行弯矩分配的设计方案。[方法]首先进行了等效厚度及弯矩分配理论推导,并选择青岛地铁 1 号线西镇站进行等效厚度及各层弯矩分配计算,得出理论解析解。为了验证理论的正确性,使用有限元软件 Ansys 进行了数值仿真分析,对第二层喷射混凝土在不同厚度情况下的等效厚度、弯矩分配情况进行了比较和讨论。最后采用室内试验方法,针对夹喷涂防水叠合结构与不夹防水层的结构进行四点梁对比测试,通过夹层抗弯强度折减比例反算夹层结构的等效厚度。[结果及结论]采用所设计方法可以确定等效厚度及弯矩分配,该方法合理可行。

**关键词** 地铁隧道;防水型单层衬砌;夹层理论;喷涂防水中图分类号 U455.91

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.033

## Stress Analysis of Waterproof Single-layer Lining Composite Structure in Metro Tunnels Based on Intermediate Layer Theory

WEN Shuyi, DENG Yisan

(China Railway Academy Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] The application of sprayed waterproof membranes can enable composite action between the shotcrete and the waterproof membrane in metro tunnel linings. However, there is currently no design guidance or reference literature for analyzing waterproof single-layer lining composite structures. A design method is proposed to determine the thickness of the tunnel single-layer lining composite structure and to allocate bending moments according to stiffness based on intermediate layer theory. [Method] The theoretical derivation of equivalent thickness and bending moment distribution is first conducted. The Qingdao Metro Line 1 Xizhen Station is select-

ed for calculating the equivalent thickness and bending moment distribution of each layer, yielding theoretical analytical solutions. To verify the accuracy of the theory, numerical simulation analysis is performed using the finite element Ansys, comparing and discussing the equivalent thickness and bending moment distribution for different second layer shotcrete thicknesses in tunnels. Finally, indoor experiments are conducted to perform four-point beam tests comparing structures with and without a sprayed waterproof membrane. The equivalent thickness of the composite structure is calculated through the reverse deduction of the bending strength reduction ratio of the intermediate layer structure. [Result & Conclusion] The proposed design method can accurately determine the equivalent thickness and bending moment distribution, proving to be both reasonable and feasible.

**Key words** metro tunnel; waterproof single-layer lining; intermediate layer theory; sprayed waterproof

## 0 引言

复合式衬砌隧道防水是通过安装在一次衬砌(外)衬和二次衬砌(内)衬之间的预制防水板来完成的,防水板被作为衬砌之间的分离层或滑动层。然而,在几何形状复杂的隧道,防水板很难与开挖隧道轮廓密贴;且由于存在大量焊缝和钢筋,安装过程中造成的损坏、过度拉伸以及受安装不良的二次混凝土衬砌影响,防水板经常出现渗漏。

当使用双面黏结强度较高的喷涂防水与永久喷射混凝土作为第一层喷射混凝土和第二层喷射混凝土时,由于两层之间存在复合行为,因此可以将第一层喷射混凝土和第二层喷射混凝土视为单一复合结构,也即防水型单层衬砌<sup>[1]</sup>。

作为一种相对较新的衬砌结构,防水型单层衬砌隧道在国内外应用较少,横贯伦敦铁路和伦敦地

\* 中国中铁股份有限公司项目(2021-重大-15)

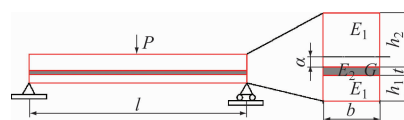
下银行的地铁站改造提升项目属于该类应用。虽然国际隧道协会于2013年推出了《隧道喷涂防水技术设计指南》,以指导和规范该项技术的应用,但并未给出明确的衬砌结构受力计算方法<sup>[2]</sup>,且缺乏实测参数数据。为解决这个问题,早期主要依据其他行业的夹层玻璃理论。文献[3]是夹层玻璃规范,给出了夹层玻璃等效厚度的算法,但未给出理论推导或分析,而且玻璃与混凝土两者材料属性不同。文献[4]研究了夹层玻璃的机械性能,并表明可以通过使用刚性、结构性、非PVB(聚乙烯醇缩丁醛)夹层与现代玻璃加工方法相结合来提高性能,但是未对混凝土结构和防水层叠合结构进行研究。文献[5]对复合材料的夹层梁弯曲理论进行了深入研究,并用解析方法计算了夹层梁的弯曲应力和挠度,但是未得出等效厚度及弯矩分配。文献[6]研究了喷涂膜界面的应力状态和潜在失效机制以及膜测试方法。也有部分学者通过数值模拟的方法对该课题进行了探究。文献[7]采用接触面单元等形式对喷膜防水层进行模拟,但接触面设置参数主要是基于一些假设进行拟定,不同工程的实例计算结果差异较大。文献[8]结合排水和不排水两种情况,对第二层喷射混凝土50~300 mm 6种不同厚度工况进行各层混凝土的轴力、弯矩及应力的数值性能分析。近年来,部分研究工作从试验的角度对含有喷膜防水层的隧道衬砌结构模拟构件进行了测试。文献[9-10]为研究软土地层条件下的喷膜防水层界面特性,针对防水型单层衬砌进行喷大板试验,并取芯进行循环抗拉及抗剪试验。文献[11-12]对夹层小梁进行室内试验,得出荷载-挠度曲线,也证明了混凝土-喷涂防水界面存在高度复合作用。文献[13]制作了含有喷膜防水层的压弯试验梁,测试了试验构件在加载过程中各截面部位的应力、应变变化过程,对试验构件的力学特性进行了初步研究。我国学者对其承载机理、材料特性及结构设计也有研究。文献[14]采用试验方法,对层间作用下的多层衬砌结构的应力特性进行了分析。多层喷射混凝土的每一层都存在着径向抗滑移作用,当组成叠合衬砌之后,就可以构成一个整体的承载结构。文献[15]依据试验测得的防水膜力学参数及界面参数,建立了复合式衬砌、喷膜防水衬砌及单层衬砌的数值计算模型,进行复合式衬砌内力分析。文献[16]研究结果探明了双面黏结型隧道衬砌结构的层间界面剪切破坏机制和力学特性,并得

到了基于摩尔-库伦本构模型的相关参数,可以作为判断双面黏结型隧道喷膜防水衬砌接触面破坏的依据。文献[17]对有较强层间黏结结构的整体性做了定量测定,但是没有建立外载与各叠合层之间的力学关系。

本文基于夹层理论提出防水型单层衬砌叠合结构分析方法,理论推导夹层结构等效厚度及弯矩分配的解析方法,并通过数值模拟及室内试验进行验证。

## 1 夹层理论

防水型单层衬砌连续两层使用相同的材料(即混凝土),在混凝土层之间使用黏结材料(即喷涂防水)制作夹心梁。利用防水层单层衬砌挠度 $\delta_{eq}$ 与均质体衬砌挠度 $\delta_{均}$ 相等,根据简支梁的挠度等效原则,估算防水型单层衬砌整体等效厚度 $h_{eq}$ 。夹层简支梁如图1所示。



注: $P$ —集中荷载,单位 N; $l$ —梁的跨度,单位 mm; $a$ —喷涂防水层上边缘至防水层单层衬砌形心的距离,单位 mm; $b$ —梁宽,单位 mm; $E_1$ —喷射混凝土弹性模量,单位 MPa; $E_2$ —喷涂防水弹性模量,单位 MPa; $G$ —喷涂防水的抗剪模量,单位 MPa; $h_1$ —第一次喷射混凝土厚度,单位 mm; $h_2$ —第二次喷射混凝土厚度,单位 mm; $t$ —喷涂防水的厚度,单位 mm。

图1 夹层简支梁示意图

Fig. 1 Diagram of intermediate layer simply supported beam

在求解中,考虑的关键参数是主要材料层的厚度和弹性模量,以及喷涂防水层的剪切刚度,具体计算公式为:

$$\delta_{eq} = \frac{Pl^3}{48G_{eq}} + \frac{Pl}{4H_{eq}} \quad (1)$$

$$\delta_{均} = \frac{Pl^3}{48E_1 I_{eq}} \quad (2)$$

式中:

$G_{eq}$ ——防水型单层衬砌抗弯刚度,单位  $Nmm^2$ ;

$H_{eq}$ ——防水型单层衬砌抗剪刚度,单位  $Nmm^2$ ;

$I_{eq}$ ——均质体衬砌的惯性矩,单位  $mm^4$ 。

根据挠度等效原则,推算得出:

$$h_{eq} = \sqrt[3]{\frac{12}{E_1 \left( \frac{12}{H_{eq} l^2} + \frac{1}{G_{eq}} \right)}} \quad (3)$$

$$G_{eq} = \frac{E_1 h_1^3}{12} + E_1 h_1 \left( \frac{h_1}{2} - a \right)^2 + \frac{E_2 t^3}{12} + E_2 t \left( \frac{t}{2} + a \right)^2 + \frac{E_1 h_2^3}{12} + E_1 h_2 \left( \frac{h_2}{2} + t + a \right)^2 \quad (4)$$

考虑  $t$  厚度较薄, 经过简化整理后得出:

$$G_{eq} = E_1 \left[ \frac{h_1^3}{12} + \frac{h_1^3}{12} + (h_2^2 - h_1^2 + 2th_2)a + (h_1 + h_2)a^2 + t^2 h_2 + th_2^2 \right] \quad (5)$$

$$H_{eq} = \frac{G \left( t + \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} \right)^2}{t} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(3), 并经过简化后可得到防水型单层衬砌整体等效厚度:

$$h_{eq} = \sqrt[3]{\frac{12}{E_1 \left[ \frac{12t}{GBl^2} + \frac{1}{E_1 (Ca + Da^2 + F)} \right]}} \quad (7)$$

其中:

$$a = \frac{\frac{h_2^2}{2} + t \left( \frac{t}{2} + h_2 \right)^2 + h_1 \left( \frac{h_1}{2} + t + h_2 \right)}{h_1 + t + h_2} - t - h_2 \quad (8)$$

$$B = \left( t + \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} \right)^2 \quad (9)$$

$$C = h_2^2 - h_1^2 + 2th_2 \quad (10)$$

$$D = h_1 + h_2 \quad (11)$$

$$F = \frac{h_1^3}{12} + \frac{h_1^3}{12} + t^2 h_2 + th_2^2 \quad (12)$$

通过上述扰度相等原则得到便于计算的等效厚度(等效厚度中考虑了防水涂层层间剪切的影响), 再通过弯矩分配分别计算确定两层喷射混凝土的具体厚度。

对于无层间相对错动的防水型单层衬砌, 可忽略剪力对变形的影响。在隧道中, 纯弯曲梁半径远大于喷射混凝土厚度, 弯曲曲率一般均较小。故在弯曲曲率一定的情况下, 第一层及第二层喷射混凝土承担的弯矩分别与各自的抗弯刚度成正比, 在第一层与第二层喷射混凝土强度等级一致时, 各层喷射混凝土承担的弯矩分别与各层的惯性矩成正比。当第一层喷射混凝土厚度不变、第二层喷射混凝土厚度减薄时, 各层承担的弯矩相应变化。计算公

式为:

$$M_1 = \frac{ME_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} = \frac{Mh_1^3}{h_1^3 + h_2^3} \quad (13)$$

$$M_2 = \frac{ME_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} = \frac{Mh_2^3}{h_1^3 + h_2^3} \quad (14)$$

式中:

$M$ ——两层喷射混凝土的总弯矩;

$M_1$ ——第一层喷射混凝土承担的弯矩;

$M_2$ ——第二层喷射混凝土承担的弯矩;

$I_1$ ——第一层喷射混凝土的惯性矩;

$I_2$ ——第二层喷射混凝土的惯性矩。

## 2 室内试验

### 2.1 试验目的及方法

为了验证夹层理论等效厚度及弯矩分配理论的合理性, 采用小梁弯曲韧性试验, 得出夹层结构的等效厚度, 验证等效厚度理论的正确性, 确定在分析中可以按照等效厚度计算, 以综合考虑层间剪切的影响。

该试验按照《喷射混凝土应用技术规程》, 采用四点弯曲方法测试。先在模具内浇筑第一层混凝土, 养护 1 d 后进行喷涂防水施工, 喷涂防水养护完成后浇筑第二层混凝土, 最终形成具有喷涂防水的叠合小梁, 小梁截面为 150 mm × 150 mm × 550 mm。弯曲韧性采用美特斯工业设备公司生产的“SANS”力学万能试验机测试, 加载速率为 0.15 mm/min。通过特制的夹具固定传感器来测试小梁中心处的挠度变化。测试过程中, 在小梁试样的两侧, 分别采用一对伸缩式位移传感器和伸缩式与夹式位移传感器, 分别用来测试小梁受压时的挠度(相互印证准确性)。试验安装形式见图 2。并且通过无夹层小梁的抗弯强度及残余抗弯强度与有夹层小梁的抗弯强度及残余抗弯强度进行对比, 得出夹层结构的等效厚度。

### 2.2 结果分析

对小梁试样进行弯曲韧性测试, 其中中间夹喷涂防水, 两层均为合成纤维混凝土的荷载-挠度曲线, 如图 3 所示。各种工况的抗弯强度及残余抗弯强度如表 1 所示。

针对合成纤维混凝土, 夹喷涂防水层后的抗弯强度与无防水层的抗弯强度之比为 62%; 不同挠度下, 夹喷涂防水层后的残余抗弯强度与无防水层的



a) 正面(夹式)传感器 b) 反面(伸缩式)传感器

图 2 小梁试样及挠度测试传感器安装形式

Fig. 2 Installation form of small-beam specimen and deflection test sensors

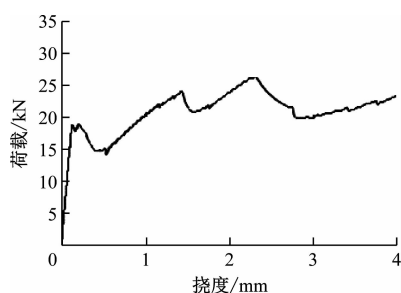


图 3 混凝土小梁四点弯曲测试荷载-挠度曲线

Fig. 3 Strain-deflection curve of concrete small-beam four-point bending test

表 1 各层喷射混凝土抗弯强度及残余抗弯强度

Tab. 1 Shotcrete bending strength and residual bending strength in each layer

测试项目	抗弯强度/ MPa	不同挠度下的残余抗弯强度/MPa			
		0.5 mm	1.0 mm	2.0 mm	4.0 mm
PF	4.82	2.94	3.68	4.07	3.64
SF	5.86	4.02	3.65	3.60	3.41
SM-PF	2.98	2.12	2.03	2.59	3.15
SM-SF	3.46	2.50	2.70	3.04	3.26

注:PF 表示混凝土内掺合成纤维,中间无防水层;SF 表示混凝土内掺钢纤维,中间无防水层;SM-PF 表示第一层混凝土及第二层混凝土均掺合成纤维,中间为喷涂防水(SM);SM-SF 表示第一层混凝土及第二层混凝土均掺钢纤维,中间为喷涂防水(SM)。

残余抗弯强度之比分别为 72%、55%、64% 和 87%，综合判断为 68%。针对钢纤维混凝土,夹喷涂防水层后的抗弯强度与无防水层的抗弯强度之比为 56%；不同挠度下,夹喷涂防水层后的残余抗弯强度与无防水层的残余抗弯强度之比分别为 62%、74%、84% 和 96%，综合判断为 74%。由于抗弯强度  $f_c = \frac{Pl}{bd^2}$  ( $P$  为试件峰值荷载; $d$  为梁高),跨距中点挠度  $y\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{46Pl^2}{108bd^3}$ ,因此,在夹层梁与非夹层梁挠度等效的情况下,若荷载或抗弯强度占比为

68%，则截面高度为 132 mm；同理,钢纤维混凝土夹层小梁的等效厚度为 136 mm。

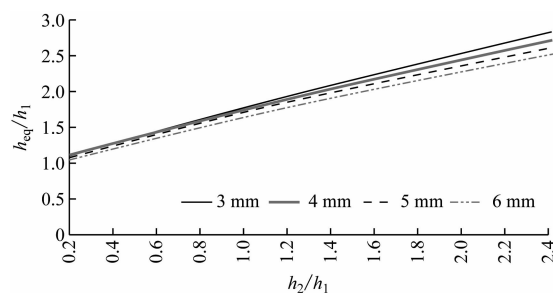
### 3 现场应用

#### 3.1 工程概况

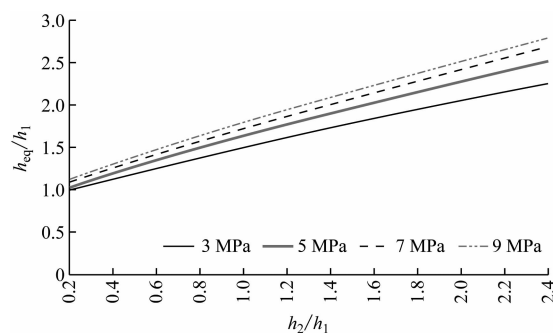
青岛地铁 1 号线西镇站位于费县路与郅城北路交叉口,为地下两层暗挖岛式车站,公共区采用单层衬砌。隧道宽度为 23 m,隧道直径等效为 10 m,轴线约位于地面以下 17 m 处,设计为防水型单层衬砌。第一层喷射混凝土与第二层喷射混凝土均为 C35,喷涂防水层厚 6 mm,剪切模量为 5 MPa<sup>[18-19]</sup>。

#### 3.2 等效厚度应用及室内试验验证

根据 2.1 节内容可生成图 4 所示的曲线。在喷涂防水抗剪模量不变的情况下,喷涂防水厚度越厚,对应的等效厚度越小;在喷涂防水厚度不变的情况下,喷涂防水抗剪刚度越大,抗剪能力越强,对应的等效厚度越大。第一层喷射混凝土厚度为 150 mm,对应于第二层厚度分别为 150 mm、100 mm、50 mm 时计算均质体等效厚度  $h_{eq}$ ,计算结果见表 2。



a) 不同喷涂防水厚度情况下等效厚度计算



b) 不同喷涂防水抗剪模量情况下等效厚度计算

图 4 夹层理论设计图

Fig. 4 Intermediate layer theory design chart

假设第一层喷射混凝土  $h_1$  为 150 mm,第二层喷射混凝土  $h_2$  分别为 150 mm、100 mm、50 mm 时,则两层喷射混凝土承担的总弯矩分别为  $M_a$ 、 $M_b$ 、 $M_c$ 。根据 2.1 节内容则有:



表 2 防水型单层衬砌等效厚度计算表

Tab. 2 Equivalent thickness calculation of waterproof single-layer lining

$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$h_{\text{eq}}/\text{mm}$	占比/%
150	150	274	91
150	100	233	93
150	50	190	95

$$M_a = \frac{E_{\text{eq},a} I_{\text{eq},a}}{\rho} \quad (15)$$

$$M_{1a} = \frac{E_{\text{eq},a} I_{\text{eq},a}}{\rho} \times \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_{2a}^3} \quad (16)$$

$$M_{2a} = \frac{E_{\text{eq},a} I_{\text{eq},a}}{\rho} \times \frac{h_{2a}^3}{h_1^3 + h_{2a}^3} \quad (17)$$

式中:

$\rho$ ——梁中性层的曲率半径;

$I_{\text{eq}}$ ——防水型单层衬砌结构的等效惯性矩。

按照上述弯矩分配公式进行计算,结果如表 3 所示。

表 3 各层喷射混凝土弯矩计算

Tab. 3 Calculation of shotcrete bending moment in each layer

$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$(M_a/\rho)/$ ( $10^{10}$ Nmm <sup>2</sup> )	第一层喷射混凝土		第二层喷射混凝土	
			$(M_{1a}/\rho)/$ ( $10^{10}$ Nmm <sup>2</sup> )	占比/ %	$(M_{2a}/\rho)/$ ( $10^{10}$ Nmm <sup>2</sup> )	占比/ %
150	150	7.4	3.7	50	3.7	50
150	100	4.3	3.3	77	1.0	23
150	50	2.2	2.1	95	0.1	5

从上述数据可看出,在第一层喷射混凝土厚度不变的情况下,第二层喷射混凝土厚度减薄的情况下,两层喷射混凝土承担的弯矩呈减小趋势;且第二层喷射混凝土越薄,第一层喷射混凝土承担的弯矩比例越大,第二层喷射混凝土承担的弯矩比例越小。

室内试验仅开展第一层混凝土与第二层混凝土均为 75 mm 等厚试验,该情况下夹层结构等效厚度占非夹层结构厚度比例为 88% ~ 90%,近似取 89%;针对第二层厚度分别为 100 mm 及 50 mm 情况,近似取 89%,待下阶段进一步试验研究。具体如表 4 所示。

综合考虑层间剪切影响,现场试验方法得出的

表 4 防水型单层衬砌等效厚度计算对比表

Tab. 4 Calculation and comparison of waterproof single-layer lining equivalent thickness

$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	理论计算		现场试验	
		等效厚度/ mm	占比/ %	等效厚度/ mm	占比/ %
150	150	274	91	267	89
150	100	233	93	233	89
150	50	190	95	178	89

等效厚度与理论计算结果差异较小,吻合度较高,由此可证明夹层理论计算等效厚度的正确性。

### 3.3 数值模拟

为进一步验证前述原理的正确性,采用有限元软件 Ansys 进行防水型单层衬砌的数值仿真分析。将“等效厚度”按照弯矩分配的原理做成两层建到模型中,通过数值分析验证弯矩分配原理的正确性。模型建立进行如下假设:

1) 地层均采用莫尔-库伦失效准则进行建模。

2) 采用线性弹性模型和莫尔-库伦失效准则对第一层混凝土和第二层喷射混凝土进行建模。后者允许模拟裂纹后的行为。

3) 地下水位为 20 m(绝对标高)。短期和长期的水压剖面被建模为静水静力。

4) 单层衬砌初衬采用假设的弹性模量方法建模,第 1 天刚度为 5 GPa,第 28 天刚度为 15 GPa。二衬采用第 28 天 15 GPa 刚度建模。

5) 假设开挖过程中的地面松弛率为 60%;达到第 1 天刚度时,喷射混凝土初衬松弛率为 10%;当单层衬砌初衬达到第 28 天刚度时,其松弛率为 30%。

模型中的第一层喷射混凝土厚度为 150 mm,第二层喷射混凝土厚度分别为 150 mm、100 mm 和 50 mm。该模型被分为两个主要区域:单层衬砌隧道周围的细网格和模型其余部分的粗网格。隧道计算模型如图 5 所示。模型垂直边界水平固定,底边界垂直和水平方向固定。分析计算时考虑地面超载。喷涂防水采用 SOLID45/PLANE42 单元。本次分析只验证弯矩分配的合理性,未考虑喷射混凝土与喷涂防水的荷载传递机理,未考虑锚杆与喷射混凝土的耦合作用,同时采用纤维喷射混凝土,未模拟钢筋网。具体的隧道模型参数、地层参数、地质参数如表 5—表 7 所示。

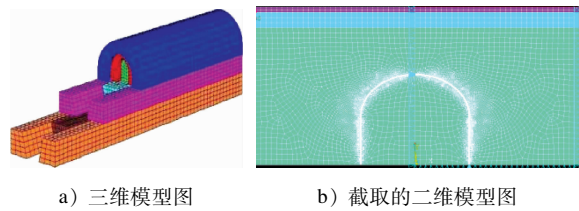


图 5 隧道模型图

Fig. 5 Tunnel model diagram

表 5 隧道模型参数

Tab. 5 Tunnel model parameters

部位	材质	厚度/mm	强度等级
第一层结构	聚烯烃粗纤维喷射混凝土	150	C40
夹层	喷涂防水	6	
第二层结构	聚丙烯细纤维喷射混凝土	150	C40

表 6 地层参数

Tab. 6 Stratigraphical parameters

材料	上部高程/m	下部高程/m	厚度/m
粉质黏土	25.7	25.1	0.6
强风化花岗岩	25.1	23.9	1.2
中风化花岗岩	23.9	21.2	2.7
微风化花岗岩	21.2	-13.8	35.0

表 7 地质参数

Tab. 7 Geological parameters

材料	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	静止土压 力系数	有效黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)	泊松比
粉质黏土	18	0.50	5	25	0.25
强风化	23	0.30	0	50	0.23
中风化	26	0.20	0	55	0.23
微风化	26	0.15	0	65	0.20

3.4 弯矩分配应用及数值分析验证

第一层喷射混凝土厚度为 150 mm,第二层喷射混凝土厚度分别为 150 mm、100 mm 和 50 mm,运用有限元分析第一层喷射混凝土及第二层喷射混凝土的弯矩内力数值,具体数值如图 6 和图 7 所示。这三种情况下,第一层喷射混凝土弯矩基本无差异,第二层喷射混凝土弯矩差异较大。

从图 6 和图 7 中对各层混凝土最大弯矩(侧墙拱部)进行提取,计算两层总弯矩,结果如表 8 所示。从表 8 中可以看出,两层混凝土等厚时,弯矩分配比例基本在 50%;第二层混凝土厚度为 100 mm 时,第一层混凝土弯矩占 63%;第二层混凝土厚度为 50 mm 时,第一层混凝土弯矩占 76%。随着第二

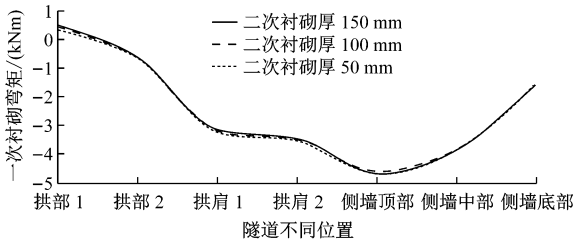


图 6 第一层喷射混凝土弯矩

Fig. 6 Primary layer shotcrete bending moment

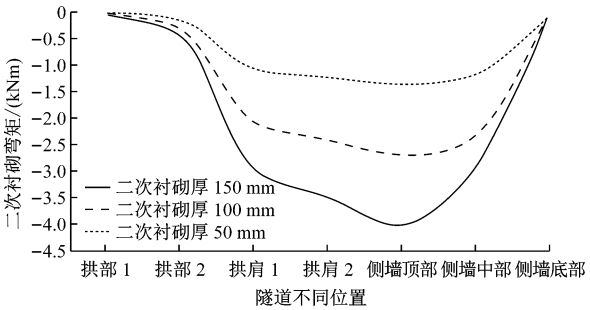


图 7 第二层喷射混凝土弯矩

Fig. 7 Secondary layer shotcrete bending moment

层混凝土厚度减薄,也就是第一层混凝土厚度占比加大或第二层混凝土厚度占比减小,第一层混凝土承担的弯矩逐渐增大,第二层混凝土承担的弯矩逐渐减小。

表 8 各层喷射混凝土最大弯矩

Tab. 8 Shotcrete maximum bending moment in each layer

$h_1$ / mm	$h_2$ / mm	$M_a$ / (kNm)	第一层喷射混凝土		第二层喷射混凝土	
			$M_{1a}$ / (kNm)	占比/ %	$M_{2a}$ / (kNm)	占比/ %
150	150	-8.5	-4.5	53	-4.0	47
150	100	-7.2	-4.5	63	-2.7	37
150	50	-5.9	-4.5	76	-1.4	14

根据理论解析、数值模拟得出夹层结构弯矩分配占非夹层结构厚度的比例,结果如表 9 所示。

表 9 各层喷射混凝土弯矩分配

Tab. 9 Shotcrete bending moment distribution in each layer

$h_1$ /mm	$h_2$ /mm	理论解析		数值模拟	
		第一层混凝土弯矩占比/%	第二层混凝土弯矩占比/%	第一层混凝土弯矩占比/%	第二层混凝土弯矩占比/%
150	150	50	50	53	47
150	100	77	23	63	37
150	50	95	5	76	14

由表 9 可知,理论方法与数值模拟拟合度较高,

趋势接近,说明按照刚度进行弯矩分配的原则是合理可行的。但是由于室内试验未对第一层混凝土和第二层混凝土分别贴应变片,无法得出两层混凝土的弯矩分配。后续可结合其他夹层能量吸收试验等进一步完善研究弯矩分配。

## 4 结语

关于防水型单层衬砌隧道的高效设计,目前还没有详细的设计指导。喷涂防水具有较好的黏结强度及抗剪强度,通过对防水型单层衬砌隧道的夹层结构的等效厚度及弯矩分配进行了理论分析,并采用室内试验、数值分析验证了其合理性,可为设计提供理论指导,其结论如下:

1) 对夹喷涂防水的夹层结构等效厚度进行理论分析,并采用室内试验进行验证,得出的等效厚度离散性较好、吻合度较高,基本在 90% 左右,说明采用挠度等效夹层理论的方法是可行的。

2) 对等效厚度进行弯矩分配,并分两层建模进行数值模拟验证。结果表明:在第一层混凝土厚度不变的情况下,随着第二层混凝土厚度的减少,第一层混凝土承担弯矩的比例逐渐增大,第二层混凝土承担弯矩的比例逐渐减小;而且理论与数值模拟吻合度较高,趋势接近。说明按照刚度进行弯矩分配的原则是合理可行的。

## 参考文献

- [1] THOMAS A. Sprayed concrete lined tunnels[M]. 2nd ed. London: CRC Press, 2020: 110-112.
- [2] ITAtech (International Tunneling and Underground Space Association). Design guidance for spray-applied waterproofing membranes[R]. Geneva: ITAtech Publications, 2013.
- [3] DIN (Deutsches Institut für Normung). DIN EN 13474-1:1999. Glass in building - Design of glass panes - Part 1: General basis of design; German version prEN 13474-1:1999 [R]. Berlin: DIN, 1999.
- [4] BENNISON S, QIN M H, DAVIES P. High-performance laminated glass for structurally efficient glazing[C]//HKIE (The Hong Kong Institution of Engineers). Annual Seminar on Innovative Light-weight Structures and Sustainable Facades. Hongkong: HKIE, 2008.
- [5] 刘润泉, 石勇, 朱锡, 等. 夹层复合材料的弯曲理论分析与计算方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(6): 6.  
LIU Runquan, SHI Yong, ZHU Xi, et al. Calculating method investigation and theoretic analysis of sandwich beams at bending [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(6): 6.
- [6] SU J. Stress status of sprayed waterproofing membrane under groundwater pressure within composite SCL tunnels[J]. Expanding Underground, 2023, 3(2): 1003.
- [7] BLOODWORTH A, SU J. Numerical analysis and capacity evaluation of composite sprayed concrete lined tunnels[J]. Underground Space, 2018, 3(2): 87.
- [8] SU J, BLOODWORTH A. Utilizing composite action to achieve lining thickness efficiency for sprayed concrete lined (SCL) tunnels[C]//ITA (International Tunneling and Underground Space Association). 2016 World Tunnel Congress. San Francisco, CA: ITA, 2016.
- [9] SU J, BLOODWORTH A, HAIG B. Experimental investigation into the interface properties of composite concrete lined structures [C]//ITA (International Tunneling and Underground Space Association). Underground - the Way to the Future: Proceedings of the World Tunnel Congress. Geneva: ITA, 2013.
- [10] SU J, BLOODWORTH A. Interface parameters of composite sprayed concrete linings in soft ground with spray-applied waterproofing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59: 170.
- [11] SU J, Bloodworth A. Experimental and numerical investigation of composite action in composite shell linings [C]//The Warwick Research Archive Portal. 7th International Symposium on Sprayed Concrete. Sandefjord: The Warwick Research Archive Portal, 2014.
- [12] SU J, BLOODWORTH A. Numerical calibration of mechanical behaviour of composite shell tunnel linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 76: 107.
- [13] NAKASHIMA M, HAMMER A L, THEWES M, et al. Mechanical behaviour of a sprayed concrete lining isolated by a sprayed waterproofing membrane[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 143.
- [14] 周平, 王志杰, 雷飞亚, 等. 考虑层间效应的钢纤维混凝土隧道单层衬砌受力特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 116.  
ZHOU Ping, WANG Zhijie, LEI Feiya, et al. Experimental study on the stress characteristics of single-layer lining of steel fiber reinforced concrete tunnels considering interlayer effects [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 116.
- [15] 蒋雅君, 何斌, 赵菊梅, 等. 隧道喷膜防水衬砌结构力学性能研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 95.  
JIANG Yajun, HE Bin, ZHAO Jumei, et al. Study on mechanical properties of tunnel lining structure with spray-applied waterproofing membrane [J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(1): 95.
- [16] 蒋雅君, 赵菊梅, 何雨帝, 等. 双面黏结型隧道喷膜防水衬砌层间界面力学特性探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(6): 1003.  
JIANG Yajun, ZHAO Jumei, HE Yudi, et al. Mechanical characteristics of interface between layers of double-sided adhesive spray-applied membrane waterproof tunnel lining [J]. Tunnel

- Construction, 2023, 43(6): 1003.
- [17] 邓一三, 李刚, 张建伟, 等. 防水型单层衬砌的叠合面力学性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 776.
- DENG Yisan, LI Gang, ZHANG Jianwei, et al. Study on composite surface of waterproof single-layer lining by tests [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(3): 776.
- [18] 李德明, 温书亿, 张建伟, 等. 单层衬砌聚烯烃粗纤维喷射混凝土性能试验及工程应用[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 195.
- LI Deming, WEN Shuyi, ZHANG Jianwei, et al. Performance test and engineering application of macro-polyolefin fiber reinforced shotcrete used as single-shell lining[J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58(2): 195.
- [19] 温书亿, 严金秀, 郑波. Tam seal800 喷涂防水在成都地铁区间隧道中的应用[C]//中国土木工程学会. 第八届国际桥梁与隧道技术大会论文集. 北京:中国土木工程学会, 2019: 269.
- WEN Shuyi, YAN Jinxiu, ZHENG Bo. Application of Tam Seal800 spray applied waterproofing membrane for Chengdu Metro tunnels[C]//Chinese Civil Engineering Society. Proceedings of the 8th International Conference on Bridge and Tunnel Technology. Beijing: Chinese Civil Engineering Society, 2019: 269.
- 收稿日期:2023-12-07 修回日期:2024-02-15 出版日期:2024-08-10  
Received:2023-12-07 Revised:2024-02-15 Published:2024-08-10
- 通信作者:温书亿,高级工程师,359418435@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- 
- (上接第 191 页)
- [12] 黄大维, 冯青松, 刘开富, 等. 基于弯矩最小化的地铁盾构隧道横断面优化设计分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 159.
- HUANG Dawei, FENG Qingsong, LIU Kaifu, et al. Analysis for optimal design of cross section of metro shield tunnel based on minimum bending moment[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 159.
- 收稿日期:2022-03-11 修回日期:2022-04-24 出版日期:2024-08-10  
Received:2022-03-11 Revised:2022-04-24 Published:2024-08-10
- 第一作者:张慧鹏,高级工程师,2873565471@qq.com  
通信作者:张涛,硕士研究生,zt04200305@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 国家铁路局将在粤港澳大湾区试点基础上协调推进 更大范围的“四网融合”试点

2024年7月10日,国务院新闻办举行“推动高质量发展”系列主题新闻发布会。会上,国家铁路局局长费东斌表示,将在粤港澳大湾区试点的基础上,协调推进更大范围的“四网融合”试点推广工作,大力推进区域一体化发展,更好服务国家重大战略实施。

“四网融合”指的是干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路和城市轨道交通的融合,主要指的是地铁和城际铁路、市域(郊)铁路的融合与互联互通。随着国家区域战略的实施,“四网融合”的需求就越来越强烈,党中央、国务院在《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》等战略规划中进行了专门部署。“四网融合”中存在的问题和难点主要就是地铁和铁路之间的制式不统一、标准不统一和管理不一致。针对这些问题,国家铁路局正在和相关部门、省份对接,以广东省粤港澳大湾区为试点,大力推动“四网融合”工作,着力打造具有中国特色的轨道交通融合发展模式。下一步,协调推进更大范围的“四网融合”试点推广工作,将着力在设施互联、票制互通、安检互信、信息共享和管理协同等方面下功夫。

在设施互联方面,将聚焦多运营主体、多层次轨道交通互联互通需求,制定基础设施、机车客车、牵引供电、通信信号等互联互通技术规范,研究构建互联互通接入规则。在票制互通方面,将制定票制互通、支付兼容等相关标准,研究制定票制互通工程实施方案,积极拓展“一次购票、一次支付”服务模式。在安检互信方面,将促进铁路和地铁安检标准的衔接互认,完善换乘条件,更新补强安检设施设备,进一步优化安检流程。在信息共享方面,将研究数据资源开放共享机制和交换渠道,制定数据采集、数据安全等标准,促进各类信息的开放共享。在管理协同方面,将研究制定相关制度办法,完善铁路运输基础设施、车辆、驾驶人员资格等许可,推进铁路和地铁在设备运用、运营组织、从业人员等方面的管理互通。

(来源:新华网)