

# 盾构隧道3D打印模型刚度有效率的试验验证<sup>\*</sup>

陈立<sup>1</sup> 李博<sup>2</sup> 卢生安<sup>3</sup> 张海涛<sup>4</sup> 吕延豪<sup>4</sup>

(1. 温州市勘察测绘研究院有限公司, 325001, 温州; 2. 温州大学建筑工程学院, 325035, 温州;

3. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司, 325025, 温州;

4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

**摘要** [目的]为探究3D打印技术制作隧道模型的可行性,有必要测定盾构隧道纵横向刚度有效率的取值。[方法]通过对光敏树脂、环氧树脂和尼龙三种材料的拉伸和压缩试验,最终选择了光敏树脂作为盾构隧道管片的模型材料。通过相似第二定律计算,确定试验几何相似比为1:30。试验基于温州轨道交通1号线盾构隧道工程,利用3D打印技术精细化设计隧道模型,衬砌管片采用弯曲螺栓连接,还原其细部结构。通过对3D打印隧道模型进行纵横向八级加载,测定了不同拼装工艺的纵横向刚度有效率。同时采用椭圆度 $\phi$ 来具体描述不同外部荷载作用下隧道的横向变形程度。最后对比其他学者的模型试验,论证了该方法的可行性以及精确性。[结果及结论]3D打印制作的盾构隧道,通缝拼装时纵向刚度有效率为0.13~0.20,横向刚度有效率为0.67;错缝拼装时,纵向刚度有效率为0.15~0.30,横向刚度有效率为0.79;错缝拼装隧道刚度略大于通缝拼装隧道刚度。均质隧道、错缝拼装隧道及通缝拼装隧道的椭圆度依次为1.62‰、1.87‰及2.55‰,通缝隧道模型在外部加载作用下的压扁程度最大。

**关键词** 盾构隧道;刚度有效率;3D打印模型试验;通缝及错缝拼装

**中图分类号** U451+.5

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.04.044

## Experimental Verification on Stiffness Effective Rate for Shield Tunnel 3D Printing Model

CHEN Li<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, LU Sheng'an<sup>3</sup>, ZHANG Haitao<sup>4</sup>, LYU Yanhao<sup>4</sup>

(1. Wenzhou Survey and Mapping Research Institute Co., Ltd., 325001, Wenzhou, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, 325035, Wenzhou, China; 3. Wenzhou Railway and Rail Transit Investment Group Co., Ltd., 325025, Wenzhou, China; 4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China)

**Abstract** [Objective] In order to explore the feasibility of

3D printing technology in making tunnel models, it is necessary to determine the effective rate values of the shield tunnel longitudinal and lateral stiffness. [Method] Through tensile and compression experiments on photosensitive resin, epoxy resin and nylon three materials, photosensitive resin is finally selected as the model material for shield tunnel segments. Through the calculation of the second law of similarity, the experiment geometric similarity ratio is determined to be 1:30. The experiment is conducted based on Wenzhou M1 shield tunnel project, the tunnel model is finely designed using 3D printing technology, and the lining segments are connected with curved bolts to restore their detailed structure. By loading the 3D printed tunnel model to eight levels in longitudinal and transverse directions, the longitudinal and transverse stiffness efficiency of different assembly processes is determined. At the same time, ellipticity $\phi$  is used to specifically describe the lateral deformation degree of the tunnel under different external loads. Finally, by comparing with the model experiments of other scholars, the feasibility and accuracy of this method are demonstrated. [Result & Conclusion] The longitudinal stiffness efficiency of the through-seam shield tunnel made by 3D printing is between 0.13~0.20, and the transverse stiffness efficiency is 0.67; the longitudinal stiffness efficiency of the staggered seams is between 0.15~0.30, and the transverse stiffness efficiency is 0.79. The stiffness of staggered-seam tunnel is slightly greater than that of the through-seam tunnel. The ellipticities of the homogeneous tunnel, the staggered-seam shield tunnel and the through-seam shield tunnel are 1.62‰, 1.87‰ and 2.55‰ respectively. The through-seam tunnel model has the greatest degree of flattening under external loading.

**Key words** shield tunnel; stiffness efficiency; 3D printing model test; through-seam and staggered-seam assembly

## 0 引言

模型试验已成为国内外学者研究盾构隧道的

<sup>\*</sup> 温州市科学技术局项目(S2023024)

普遍方法<sup>[14]</sup>,其可分为足尺试验和缩尺试验。缩尺试验不仅能在满足主要物理量相似后,很好地还原隧道原型结构响应,还能避免足尺试验的费用高、周期长、约束条件多等问题。因此,缩尺试验常被用于盾构隧道的试验研究中。3D 打印技术相较于其他模型制作技术而言,具有更高的成型精度(精度可达 0.1~0.2 mm),能更好地满足模型试验的精度要求<sup>[5-7]</sup>。

在相似模型上:文献[8]用 PE(聚乙烯)管模拟隧道衬砌,用螺丝+薄塑料片(PE 片)模拟纵环向接头;文献[9]用水、石膏和硅藻土预制加工的特种石膏材料来模拟管片衬砌,用刻槽的方法弱化接头处的抗弯刚度;文献[10]使用有机玻璃模拟管片衬砌,用钢质和铝制焊丝模拟螺栓接头。随着 3D 打印技术的发展,国内外各领域专家开始将 3D 打印技术应用于模型试验中,文献[11]利用 3D 打印技术制作盾构隧道关键节点模型,并探讨了 3D 打印技术在隧道模型中应用的可行性。

本文以温州轨道交通 1 号线(以下简称“M1 线”)盾构隧道为原型,利用 3D 打印技术通过相似比设计和分块打印的方法制作隧道相似模型(以下简称“3D 打印模型”),进而测定隧道抗弯刚度有效率。

## 1 3D 模型的制作

### 1.1 模型的主要参数

模型的主要参数取决于实际隧道参数和相似比。

对于实际隧道,M1 线盾构隧道外径为 6.7 m,内径为 5.9 m,壁厚为 0.4 m。衬砌混凝土强度等级为 C50,衬砌混凝土内预留塑料套筒。隧道埋深为 10~30 m。单环衬砌包含 1 块封顶块、2 块邻接块及 3 块标准块,衬砌环间错缝拼装。纵环向弯曲螺栓均采用 8.8 级 M33 螺栓,并配有螺母及垫圈。

在外荷载作用下,隧道纵横向刚度有效率的测定主要涉及以下参数:①管片几何尺寸参数  $L$ (包含管片外径  $D$ 、管片内径  $r$ 、壁厚  $t$  和环宽  $b$ );②管片材料性能参数,包括弹性模量  $E$ 、管片应变  $\varepsilon$ 、管片挠度  $\delta$ ;③外部荷载  $F$ 。

依据相似理论第二定理( $\pi$  定理),以管片几何尺寸参数及管片弹性模量来确定基本相似比。管片几何尺寸参数相似比  $C_L = 1:30$ ,管片弹性模量相

似比  $C_E = 1:40$ ,其他主要参数的相似比如表 1 所示。

表 1 主要参数的相似比  
Tab. 1 Similarity ratio of main parameters

参数	符号	相似比计算关系	相似比
几何尺寸参数	$L$	$C_L$ 为基本相似比	1:30
弹性模量	$E$	$C_E$ 为基本相似比	1:40
压强	$q$	$C_q = C_E$	1:40
应力	$s$	$C_s = C_E$	1:40
位移	$d$	$C_d = C_L$	1:30
应变	$e$	$C_e = 1$	1:1
轴向刚度	$E_A$	$C_{EA} = C_L^2 C_E$	1:30 <sup>2</sup> × 40
抗弯刚度	$E_I$	$C_{EI} = C_L^4 C_E$	1:30 <sup>4</sup> × 40
集中力	$F$	$C_F = C_L^2 C_E$	1:30 <sup>2</sup> × 40

### 1.2 打印材料的选择

试验选用 SLA(激光固化成型)方式打印制作隧道模型。3D 打印机型号为 SLA650 和 SLA450。受 3D 打印材料的种类有限,若要满足相似条件,须在尼龙、环氧树脂或光敏树脂中选择合适材料<sup>[10]</sup>。

本研究先采用 3 种材料分别制作试件,再根据 GBT 1040—1992《塑料拉伸性能试验方法》及 GB/T 1041—1992《塑料压缩性能试验方法》,对试件进行材料力学性能试验,测定试件的拉伸弹性模量及压缩弹性模量,进而确定 3D 打印模型所用材料。材料力学性能试件包含拉伸试件与压缩试件,如图 1 所示。其中压缩试件为圆柱体,直径和高均为 30 mm。

以光敏树脂试件为例,力学测试结果图如图 2 所示。根据图 2 计算可知,光敏树脂压缩弹性模量为 900 MPa;拉伸弹性模量为 450 MPa。同样,由实验室结果计算可得不同材料的压缩弹性模量和拉伸弹性模量,如表 2 所示。综合考虑弹性模量相似及计算便利性,本研究最终选用光敏树脂材料来模拟隧道衬砌管片。

### 1.3 模型的拼装

根据所选材料分别打印封顶块、邻接块、标准块,并根据隧道预留的套筒按规定曲率制作纵环向弯曲螺栓,并采用 M4 螺母及垫圈拼装隧道。3D 打印模型拼装细节如图 3 所示,模型所用弯曲螺栓实物如图 4 所示,原隧道及模型隧道参数如表 3 所示,原螺栓及模型螺栓参数如表 4 所示。



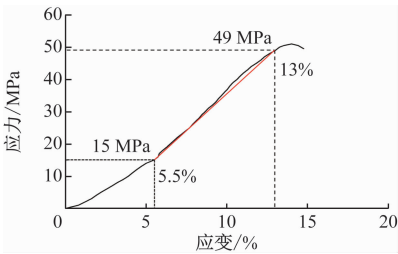
a) 拉伸试件



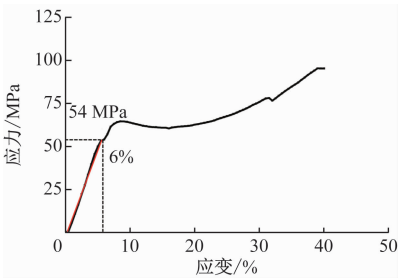
b) 压缩试件

图 1 材料力学性能试件

Fig. 1 Material mechanical properties test specimen



a) 拉伸试验



b) 压缩试验

图 2 拉伸及压缩试验的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for tensile and compression tests

2 3D 模型刚度有效率验证

2.1 横向刚度有效率

横向刚度有效率试验组情况如表 5 所示。其中 H2 组采用 20° 错缝拼装——以衬砌圆环 2 环为 1 组,第一环封顶块管片左偏 10°,第二块封顶块管片右偏 10°。横向刚度有效率试验采用拱顶集中加载

表 2 不同材料的弹性模量

Tab. 2 Elastic modulus of different materials

材料	拉伸弹性模量/ MPa	压缩弹性模量/ MPa
光敏树脂	450	900
环氧树脂	720	500
尼龙	4 600	1 200

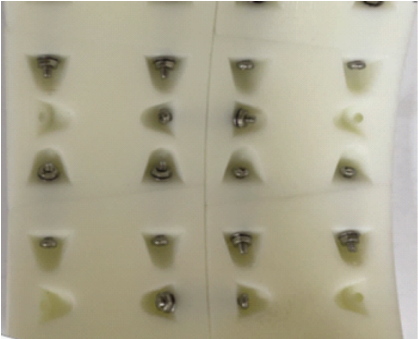


图 3 3D 模型拼装细节图

Fig. 3 3D model assembly details



图 4 弯曲螺栓

Fig. 4 Curved bolt assembly

表 3 原隧道与模型隧道参数

Tab. 3 Parameters of original tunnel and model tunnel

类型	长度/ mm	外径/ mm	内径/ mm	环宽/ mm	弹性模量/ MPa
原型隧道	18 000	6 700	5 900	400	$3.45 \times 10^4$
模型隧道	6 000	220	20	10	900

表 4 原螺栓及模型螺栓参数

Tab. 4 Parameters of original bolts and model bolts

类型	螺栓数量/个		直径/ mm	弧长/ mm	弹性模量/ GPa
	纵向	横向			
原型螺栓	16	12	33	590	206
模型螺栓	16	12	4	20	190

方式,实景图如图 5 所示。试验方案如下:

1) 制作木质反力架及木质托板,在 3D 打印模型的拱顶方向、45°方向、水平直径方向共布置 5 个量程为 10 mm 的百分表,用于记录 3D 打印模型的变形。

2) 共施加 8 级荷载,第一级加载的等效质量为“木质托板质量 + 625 g”,对应每级加载为 227.52 kN,每级加载待模型稳定后记录百分表读数。试验结束后缓慢卸除荷载。重复试验后取平均值作为



表 5 横向刚度有效率试验组情况

Tab. 5 Conditions of lateral stiffness effective rate test

group		
组号	隧道环数	拼装方式
H1 组	2	通缝拼装
H2 组	2	错缝拼装
H3 组	1	完全匀质

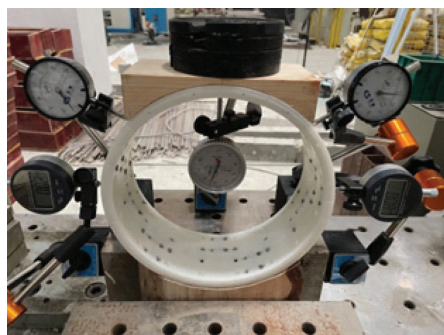


图 5 横向刚度有效率试验实景图

Fig. 5 Real picture of lateral stiffness effective rate test

试验结果。

## 2.2 纵向刚度有效率

参照文献[10,12-13],纵向刚度有效率试验采用集中加载的方式。纵向刚度有效率试验组情况如表 6 所示。通过测量匀质隧道(S3 组)及拼装隧道(S1 组及 S2 组)在试验中的挠度,进而计算隧道纵向抗弯刚度有效率  $\eta$ :

$$\eta = \Delta\omega_m / \Delta\omega_p \quad (1)$$

式中:

$\Delta\omega_m$ ——某一荷载下匀质隧道模型挠度;

$\Delta\omega_p$ ——某一荷载下拼装隧道模型挠度。

表 6 纵向刚度有效率试验组情况

Tab. 6 Conditions of longitudinal stiffness effective rate test groups

组别	隧道环数	拼装方式
S1 组	15	通缝拼装
S2 组	15	错缝拼装
S3 组	1	完全匀质

纵向刚度有效率试验实景如图 6 所示。共施加 8 级荷载。第一级加载的等效质量为“木质托板质量 + 2.55 kg”,对应每级加载为 918.00 kN。纵向刚度有效率试验方案其他内容与横向刚度有效率试验方案一致。

• 246 •



图 6 纵向刚度有效率试验实景图

Fig. 6 Real picture of longitudinal stiffness effective rate test

## 2.3 试验结果分析

3D 打印模型的水平直径处变形曲线如图 7 所示,纵向刚度有效率试验的隧道模型变形如图 8 所示。按文献[7-8],测点试验结果通过相似比换算至原型隧道后,能准确模拟原型隧道的变形结果。

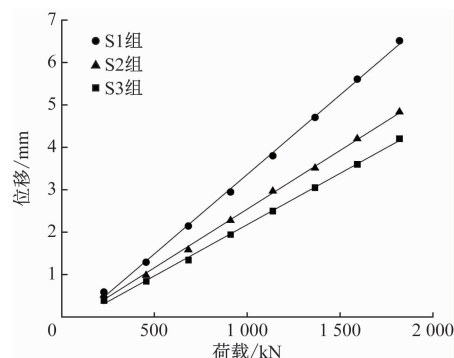


图 7 水平直径处变形曲线

Fig. 7 Deformation curves at horizontal diameter

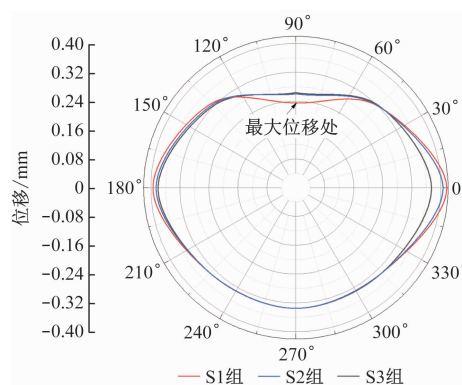


图 8 横向刚度有效率试验的隧道变形

Fig. 8 Tunnel deformation for lateral stiffness effective rate test

由图 7 及图 8 可知:

- 1) 3D 打印模型按测点位移从小到大排序为: H3 组、H2 组、H1 组。
- 2) 最大变形位置为拱顶处。隧道变形呈竖直

方向压缩、水平方向拉伸的“横鸭蛋”模式。

根据 GB 50446—2017《盾构法隧道施工与验收规范》,采用椭圆度  $\phi$  来具体描述不同外部荷载作用下隧道的横向变形程度,具体如下:

$$\phi = [\Delta b - \Delta a] / D \times 1\,000\text{‰} \quad (2)$$

式中:

$\Delta b$ ——隧道水平收敛变形;

$\Delta a$ ——隧道竖向收敛变形;

$D$ ——隧道外径。

计算得到,H3组、H2组、H1组隧道模型横向变形的椭圆度依次为1.62‰、1.87‰、2.55‰,可见H1组模型在外部加载作用下压扁程度最大。

由图7可见,各试验组测点的变形与荷载呈线性关系。隧道模型横向刚度有效率见表7。由表7可见,H<sub>2</sub>组模型的横向刚度有效率平均值为0.79,略大于H<sub>1</sub>组模型的横向刚度有效率平均值0.67。

表7 二环隧道模型横向刚度有效率

试验组	横向刚度有效率			
	拱顶处	45°处	水平直径处	平均值
H <sub>2</sub> 组	0.77	0.72	0.88	0.79
H <sub>1</sub> 组	0.70	0.67	0.65	0.67

纵向挠度曲线如图9所示,第8环管片挠度曲线如图10所示。由图9及图10可知:不同拼装方式的隧道模型,按挠度从小到大排序为S3组、S2组、S1组;S<sub>1</sub>组与S<sub>2</sub>组的挠度变化相近,跨中第8环位置为挠度变化最大处。匀质隧道模型(S3组)挠度最大值为0.83 mm;通缝隧道模型(S1组)挠度最大值为4.54 mm;错缝隧道模型(S2组)挠度最大值为3.56 mm。隧道模型跨中挠度随荷载变化曲线基本呈线性变化;隧道纵向挠度变化规律符合简支梁受弯变化规律。

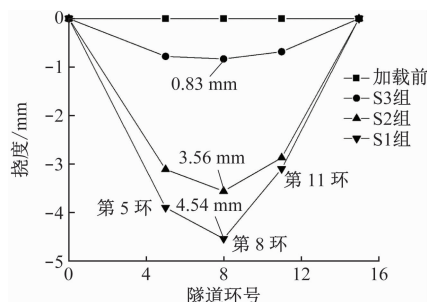


图9 纵向挠度曲线

Fig. 9 Longitudinal deflection curves

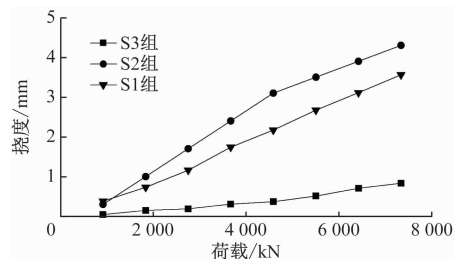


图10 第8环管片挠度曲线

Fig. 10 Deflection curves of the 8th ring segment

纵向刚度有效率如图11所示。由图11可知,通错缝隧道刚度有效率随荷载增大呈下降趋势;错缝隧道刚度有效率范围为0.30~0.15,而通缝隧道刚度有效率范围为0.20~0.13。在施加荷载初期错缝隧道刚度有效率略高于通缝隧道刚度有效率,随荷载不断增大,通错缝隧道刚度有效率接近。错缝隧道整体刚度相较于通缝隧道整体刚度约提升15%。

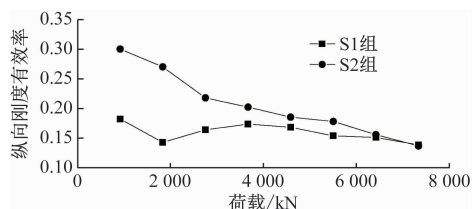


图11 纵向刚度有效率

Fig. 11 Longitudinal stiffness effective rate

## 2.4 与现有结论对比分析

根据文献[14]的抗弯刚度有效率取值范围及文献[7]的纵向等效连续化模型,盾构隧道理论计算纵向刚度有效率约为0.2;文献[10]通过模型试验得出通缝隧道纵向抗弯刚度有效率为0.18~0.39,错缝隧道纵向抗弯刚度有效率为0.20~0.40;文献[15]通过模型试验认为纵向隧道抗弯刚度有效率为0.10~0.19;文献[16]认为纵向刚度可按照20%~30%进行折减;文献[8]得出通缝隧道横向刚度有效率为0.67,错缝隧道为0.75;文献[17]与文献[8]结果一致,认为错缝隧道刚度有效率比通缝隧道其刚度有效率高约15%。

本研究的3D打印模型纵横向刚度有效率试验数据汇总如表8所示。对比现有隧道通错缝拼装及刚度有效率测试结果可见:3D打印盾构纵向隧道刚度有效率略低于文献[10]的试验结果,与文献[7-8]的结果较为接近,且错缝隧道整体刚度相较于通缝隧道整体刚度约提升15%。

表 8 3D 打印模型纵横向刚度有效率试验数据汇总

Tab.8 Test data summary of 3D printed models longitudinal and lateral stiffness effective rate

隧道模型	纵向刚度有效率	横向刚度有效率
通缝隧道	0.13 ~ 0.20	0.67
错缝隧道	0.15 ~ 0.30	0.79

### 3 结语

本文以 M1 线盾构隧道为依据,以几何尺寸、弹性模量来确定基本相似比,通过相似性设计 3D 打印拼装得到盾构隧道模型,并开展刚度模型验证,可为今后模型试验中结构的相似提供参考。

均质隧道、错缝拼装隧道及通缝拼装隧道的椭圆度依次为 1.62‰、1.87‰、2.55‰。通缝隧道模型在外部加载作用下的压扁程度最大。

通缝隧道纵向刚度有效率为 0.13 ~ 0.20、横向刚度有效率为 0.67 左右;错缝隧道纵向刚度有效率为 0.15 ~ 0.30、横向刚度有效率为 0.79 左右。错缝隧道刚度有效率比通缝隧道刚度有效率高约 15%。试验结果与其他学者研究成果接近,验证了本研究相似结构模型试验结果的可信性,也验证了 3D 打印技术用于盾构隧道模拟的可行性。

### 参考文献

- [1] CUI Q L, WU H N, SHEN S L, et al. Chinese Karst geology and measures to prevent geohazards during shield tunnelling in Karst region with caves[J]. Natural Hazards, 2015, 77(1): 129.
- [2] WANG G F, LYU H M, SHEN J S, et al. Evaluation of environmental risk due to metro system construction in Jinan, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10): 1114.
- [3] SHEN S L, WU H N, CUI Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 309.
- [4] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 454.
- [5] 江 权,宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):23.  
JIANG Quan, SONG Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1):23.
- [6] 何川,汪洋,方勇,等. 土压平衡式盾构掘进过程的相似模型试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 162.

- HE Chuan, WANG Yang, FANG Yong, et al. Similarity model test of Earth-Pressure-Balanced shield tunneling process [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 162.
- [7] 徐凌,黄宏伟,罗富荣. 软土地层盾构隧道纵向沉降研究进展[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 53.  
XU Ling, HUANG Hongwei, LUO Furong. Research on longitudinal settlement of shield tunnel in soft ground[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(6): 53.
  - [8] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 11.  
HUANG Hongwei, XU Ling, YAN Jialiang, et al. Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 11.
  - [9] 何川,张建刚,杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 85.  
HE Chuan, ZHANG Jiangang, YANG Zheng. Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the Wuhan Yangtze River tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 85.
  - [10] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等. 基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 83.  
YE Fei, YANG Pengbo, MAO Jiahua, et al. Longitudinal rigidity of shield tunnels based on model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 83.
  - [11] 禹海涛,张敬华,季倩倩,等. 基于 3D 打印技术的盾构隧道模型设计与制作[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(8): 1707.  
YU Haitao, ZHANG Jinghua, JI Qianqian, et al. Design and fabrication of shield tunnel models based on 3D-print technology [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(8): 1707.
  - [12] 王泽洋. 地铁盾构隧道纵向不均匀沉降模型试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.  
WANG Zeyang. Model test study on longitudinal uneven settlement of subway shield tunnel [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
  - [13] 杨茜,罗玉屏,张振波,等. 地铁盾构隧道抗弯刚度有效率的模型试验研究[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(4): 39.  
YANG Qian, LUO Yuping, ZHANG Zhenbo, et al. A model-tests-based study of the anti-bending effectiveness of the longitudinal and transverse rigidity of shield-drilled tunnels[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2020, 18(4): 39.
  - [14] 高树东,高文元,卢权威,等. 软土地区盾构隧道弯曲刚度有效率取值研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 248.  
GAO Shudong, GAO Wenyuan, LU Quanwei, et al. Study on the value of effective bending rigidity ratio of subway shield tunnel in soft soil area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 248.

(下转第 253 页)

尾刷刷丝长度分别不小于175、275、300 mm。

## 参考文献

- [1] QIAN Q, LIN P. Safety risk management of underground engineering in China: progress, challenges and strategies[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(4): 423.
  - [2] XIE H, ZHANG Y, CHEN Y, et al. A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103651.
  - [3] WANG S, FU J, ZHANG C, et al. Shield tunnel engineering: from theory to practice[M]. Amsterdam: Elsevier, 2021: 77.
  - [4] 朱祖熹. 盾构法隧道的盾尾防水密封与盾尾密封油脂[J]. 中国建筑防水, 2009(7): 2.  
ZHU Zuxi. Waterproofing and sealing of shield tail and sealing grease[J]. China Building Waterproofing, 2009(7): 2.
  - [5] 郭世情. 盾尾密封油脂防水密封性能评价指标的相关性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4): 181.  
GUO Shiqing. Correlation analysis of evaluation indicators for shield tail sealing grease waterproof performance[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(4): 181.
  - [6] SHEN X, YUAN D, CAO L, et al. Experimental investigation of the dynamic sealing of shield tail grease under high water pressure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 121: 104343.
  - [7] 钟小春, 黄思远, 竺维彬, 等. 基于压缩和油脂逃逸试验的盾尾刷密封性分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 125.  
ZHONG Xiaochun, HUANG Siyuan, ZHU Weibin, et al. Analysis of sealing performance of shield tail brush based on compression and grease escape test[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 125.
  - [8] 高振峰. 高压下盾尾密封油脂耐水压密封性评价及影响因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
GAO Zhenfeng. Evaluation of water-tightness of shield tail grease under high water pressure and its influencing factors analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
  - [9] 李光, 王宁. 基于多相流数值模拟的盾尾密封系统密封性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊1): 490.  
LI Guang, WANG Ning. Study on sealing performance of shield tail sealing system based on numerical simulation of multiphase flow[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 490.
  - [10] 刘建国, 朱君, 鞠丽艳, 等. 盾尾密封系统防水失效特性试验与模拟分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 39.  
LIU Jianguo, ZHU Jun, JU Liyan, et al. Test and simulation analysis of waterproof failure characteristics of shield tail sealing system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 39.
  - [11] DOGU Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 136.
  - [12] NABIZADEH A, ABBASI M, SIAVASHI J, et al. Fluid flow modeling through pressure-dependent porous media: an analytical solution and a computational fluid dynamics approach[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2022, 18: 100776.
  - [13] 饶竹红. 盾尾密封油脂防水性能分析[D]. 上海: 同济大学, 2018.  
RAO Zhuhong. Waterproof performance analysis of shield tail sealing grease[D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
  - [14] SHEN X, YUAN D, JIN D. Influence of shield attitude change on shield-soil interaction[J]. Applied Sciences, 2008.
- 收稿日期:2024-06-07 修回日期:2024-08-20 出版日期:2025-04-10  
Received:2024-06-07 Revised:2024-08-20 Published:2025-04-10  
• 通信作者:蒋沛峰,工程师,252652836@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248页)
- [15] 孙海东. 盾构隧道管片衬砌结构刚度有效率模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
SUN Haidong. Study on model test for effective rigidity ratio of shield-driven tunnel segments lining[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
  - [16] 魏立新, 杨春山, 黄海滨, 等. 盾构隧道纵向刚度及影响因素模型试验研究[J]. 公路, 2020, 65(1): 335.  
WEI Lixin, YANG Chunshan, HUANG Haibin, et al. Model test study on longitudinal stiffness of shield tunnel and its influencing factors[J]. Highway, 2020, 65(1): 335.
  - [17] 王谭, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 错缝拼装及土层刚度对盾构隧道横向刚度有效率的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(9): 136.  
WANG Tan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. The impact of staggered joint and soil stiffness on transverse effective rigidity ratio of shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(9): 136.
- 收稿日期:2024-01-15 修回日期:2024-06-01 出版日期:2025-04-10  
Received:2024-01-15 Revised:2024-06-01 Published:2025-04-10  
• 第一作者:陈立,高级工程师,281183149@qq.com  
通信作者:李博,教授,39185453@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