

文章编号: 1005-0523(2026)01-0039-08



模型盾构隧道管片环设计试验分析

黄大维^{1,2}, 李庆^{1,2}, 耿大新¹, 江强波¹, 陈后宏^{1,2}

(1. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 华东交通大学综合立体交通信息感知与融合江西省重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 模型盾构隧道横向刚度相似性直接关系到模型试验过程中模型盾构隧道横断面变形的精准度。为研究模型盾构隧道管片环的设计方法, 分析了模型盾构隧道管片环的相似性要求和加工材料性能, 设计了不同类型的模型隧道管片环, 并进行试验, 得到了不同类型模型隧道管片环竖向位移和水平位移与竖向加载量的关系。结果表明: 部分高分子材料具有一定的蠕变性, 不宜用于制作模型盾构隧道管片环; 尼龙材料的蠕变小, 可作为加工模型隧道管片环的材料; 因拼装接头的抗弯刚度影响因素复杂, 当需要模拟管片纵缝接头时, 建议采用开槽的方式, 接头的抗弯刚度可通过开槽宽度与深度进行控制; 修正均质圆环设计与加工简单, 若采用缩尺试验研究盾构隧道, 且需将模型盾构隧道设计为修正均质管片环时, 建议使用钢板作为加工模型盾构隧道的材料。试验结果对设计模型盾构隧道具有一定的参考价值。

关键词: 隧道工程; 盾构隧道; 模型管片环; 缩尺试验; 管片环设计

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

本文引用格式: 黄大维, 李庆, 耿大新, 等. 模型盾构隧道管片环设计试验分析[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(1): 39-46.

Experimental Analysis on Design of Model Shield Tunnel Segment Ring

Huang Dawei^{1,2}, Li Qing^{1,2}, Geng Daxin¹, Jiang Qiangbo¹, Chen Houhong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Comprehensive Stereoscopic Traffic Information Perception and Fusion, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Whether the transverse stiffness similarity of the model shield tunnel is reasonable or not is directly related to the accuracy of the cross-sectional deformation of the model shield tunnel during the model test. In order to study the design method of segment ring of model shield tunnel, the similarity and processing materials of the model shield tunnel segment ring were analyzed. Different types of model tunnel segment rings were designed and tested. The relationship between vertical displacement and horizontal displacement of segment ring and vertical loading of shield tunnel with different models was obtained. The results show that: some polymer materials have certain creep properties, and it is recommended to avoid using polymer materials with this characteristic to make model shield tunnel segment rings; the creep of nylon material is small, which can be selected as the material for processing model tunnel segment ring. Due to the complexity of the influencing factors of the bending stiffness of the assembled joint, when it is necessary to simulate the longitudinal joint of the segment, it is recom-

收稿日期: 2024-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378398; 522784001); 江西省主要学科学术和技术带头人领军人才项目(20232BCJ22009); 江西省自然科学基金项目(20242BAB26077)

mended to simulate the longitudinal joint of the segment by slotting. The bending stiffness of the joint can be controlled by the width and depth of the slotting. The design and processing of modified homogeneous ring are simple. If the shield tunnel is studied by scale test and the model shield tunnel is designed as modified homogeneous segment ring, it is recommended to use steel plate as the material for processing the model shield tunnel.

Key words: tunnel engineering; shield tunnel; model segment ring; scale test; segment ring design

Citation format: HUANG D W, LI Q, GENG D X, et al. Experimental analysis on design of model shield tunnel segment ring[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 39–46.

盾构隧道受外部工程活动响应的影响因素复杂,从研究时间与科研成本的角度考虑,模型试验为更好的手段。然而,现有模型试验多数情况下属于模拟试验,即定性地模拟相关科研问题所呈现出的规律与现象,而在影响结果方面无法等比对应现实情况,其主要原因为模型试验的主要影响因素并未按相似关系进行设计^[1]。此外,盾构隧道衬砌因接头的存在而使其力学性能复杂,致使模型盾构隧道管片环的设计难度加大^[2]。因此,亟需探究模型盾构隧道管片环的设计方法。

王晓迪^[3]通过构建双侧开槽盾构管片模型,研究了接头刚度折减对管片受力的影响。Lee等^[4]采用多铰环模型计算了均质环的横向弯曲刚度有效比。黄大维等^[5]推导了根据管片纵缝接头刚度解析通缝拼装盾构隧道横向刚度有效率的计算公式。封坤等^[6]提出了大断面水下盾构隧道横向刚度有效率的求解方法。黄宏伟等^[7]提出了相似模型试验可成为研究通缝拼装盾构隧道刚度有效率的较理想方法。

缩尺试验因其试验难度小和方便改变外部条件等优点广泛应用于盾构隧道的研究中。学者分别采用有机玻璃、聚乙烯片、石膏与硅藻土混合材料、聚乙烯管,设计模型盾构隧道,探究其力学性能^[8]。能够成为加工模型盾构隧道管片环的材料众多,但其是否能够作为加工模型隧道管片环的材料有待研究。因此,在加工模型盾构隧道时,如何选取材料和模拟接头是值得探究的问题。

文章分析模型隧道管片环的相似性和加工材料,设计不同类型的模型隧道管片环进行试验,在综合对比分析的基础上,给出模型盾构隧道管片环设计方法与建议。试验结果对设计模型盾构隧道具有一定的参考价值。

1 模型盾构隧道管片环相似设计分析

采用模型试验对结构的弹性变形进行模拟时,需满足应力及应变条件的一致性;对结构进行破坏特性模拟时,则需应力、应变及强度均满足相似要求。因此,设计模型试验时,一般选取结构的弹性变形来对模型试验进行简化。此外,模型试验是缩小原型结构的几何尺寸,而试验结构的几何尺寸减小势必放大试验误差,甚至导致测试元件难以布设^[8]。所以,应选取合适的几何相似比设计模型盾构隧道,使测试元件能够布设在模型盾构隧道上。为此,文章考虑将模型盾构隧道的几何相似比与容重相似比分别设计为1/10和1。同时,基于相似三定理^[9],推导得到模型试验基本物理量的相似关系如表1所示(表中物理量均用C加上物理量的下标表示相似常数,如 C_l 为几何相似常数)。

盾构隧道采用缩尺试验研究时,如果要使缩尺模型可行,则模型盾构隧道完全满足相似关系,见表1。因此,在选择加工盾构隧道模型管片环的材

表1 模型试验基本物理量相似关系
Tab.1 Similarity relation of basic physical quantities in model test

物理量	相似关系	相似常数
几何尺寸 l	基本量	10
容重 γ	基本量	1
应力	$C_\sigma = C_l C_\gamma$	10
位移	$C_\delta = C_l$	10
弹性模量	$C_E = C_l$	10
弯矩	$C_M = C_l C_\gamma C_l^4$	10 000
轴力	$C_N = C_l C_\gamma C_l^3$	1 000
剪力	$C_Q = C_l C_\gamma C_l^3$	1 000
弯曲刚度	$C_{EI} = C C C_l^5$	100 000
轴向刚度	$C_{EA} = C_l^3$	1 000

料时,其容重需要与混凝土材料一致,而其弹性模量需为混凝土弹性模量的1/10。此外,因隧道抗弯刚度受隧道接头的影响较大,则需保证模型和原型盾构隧道管片接头满足相似关系。

盾构隧道变形分为横断面变形和纵向挠曲变形。当隧道发生横断面变形时,管片纵缝接头会受到多种内力(弯矩、轴力以及剪力等)的共同作用。因此,设计盾构隧道管片环时,管片接头能否满足相似要求是值得重视的问题。只有管片接头力学性能满足相似关系,才能确保原型盾构隧道管片环的合理性。然而,影响隧道接头力学性能的因素众多,要使其具有良好的相似关系难度较大。因此,如何设计合理的模型盾构隧道管片环是一个值得探究的问题。

2 模型盾构隧道管片环材料选取分析

加工模型盾构隧道管片环的材料众多,常用的材料为石膏和重晶石粉混合材料。此外,也有学者

选取高分子材料(如聚乙烯和尼龙等),此时需要保证材料的弹性模量和泊松比均满足设计要求。此外,模型试验的时间较长,高分子材料的蠕变性也不能过大,否则将导致试验结果的误差变大,从而影响试验数据的可靠性。为探究高分子材料作为加工模型盾构隧道管片环的合理性,选取了4种高分子材料进行弹性模量的试验分析。测试方法及结果见文献[1]。聚乙烯和聚氯乙烯材料弹性模量分别约为0.5 GPa和0.8 GPa,甲醛材料弹性模量为6.0~6.5 GPa,尼龙材料的弹性模量为2.7~3.6 GPa。由于模型盾构隧道管片环的几何相似比一般选取为1/10,即3.55 GPa。因此,尼龙材料的弹性模量满足要求。

针对以上4种材料进行蠕变性测试(放置砝码,测量材料挠度随时间的变化),在聚乙烯、聚氯乙烯以及甲醛材料的测试中均加载同一重量。而尼龙材料的测试中,由于尼龙材料在测试过程中蠕变较小,进行了2次加载。4种材料挠度与加载时长的关系如图1所示。由图1分析可知,4种高分子材料

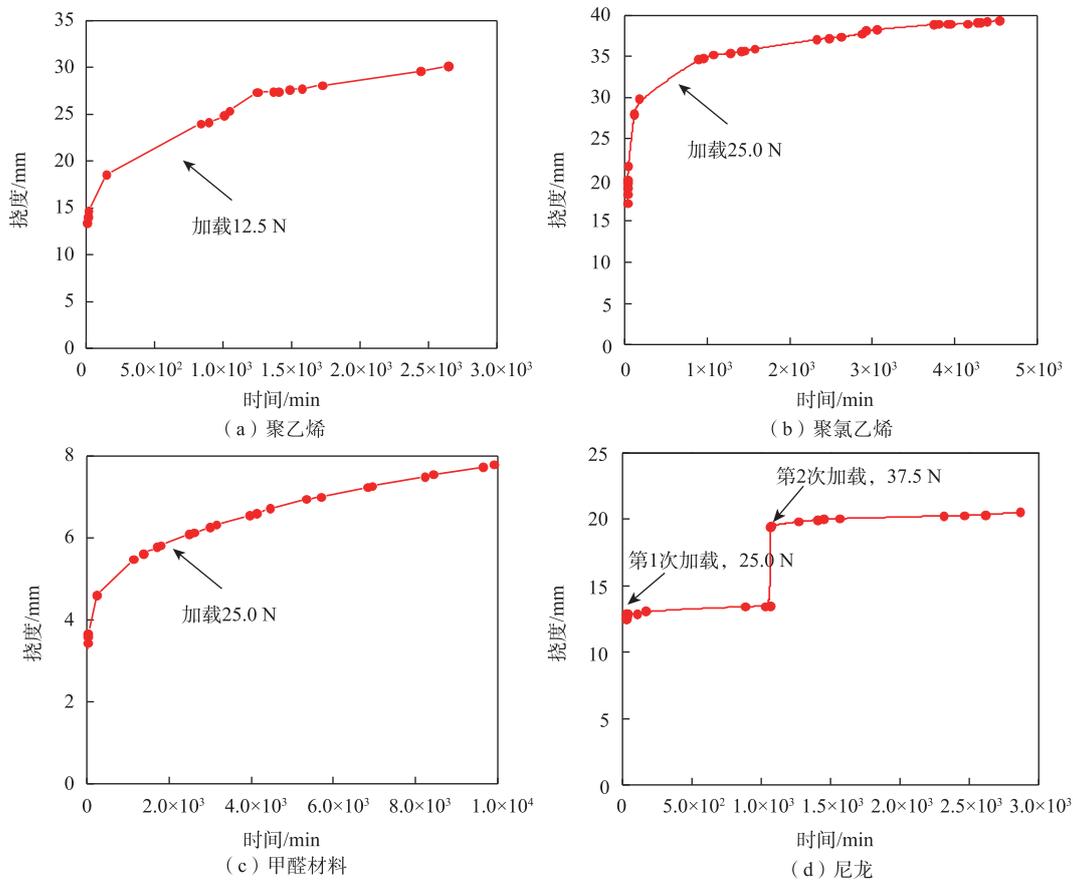


图1 4种材料挠度与时间的关系
Fig. 1 Relationship between deflection and time of 4 materials

在加载完成后,其挠度随着时间均呈现出增大的趋势,聚氯乙烯和聚乙烯材料增加的幅度最大,其次为甲醛材料,最小为尼龙材料。

综上所述,加工模型盾构隧道管片环采用高分子材料时,需考虑其弹性模型及材料的蠕变性。上述4种高分子材料中,聚乙烯、聚氯乙烯及甲醛材料因与理想弹性模量相差较大,同时蠕变性强,不建议作为加工模型管片环的材料。尼龙材料弹性模量与满足相关要求,且蠕变性小,可作为加工模型盾构隧道管片环的材料。

3 不同模型盾构隧道管片环研究

3.1 拼装模型管片环试验研究

盾构隧道拼装模型管片环设计时,需对隧道接头进行模拟,需在管片上加工出手孔及螺栓孔,选用尼龙材料,以上海通缝盾构隧道为原型,制作盾构隧道管片模型。

原型隧道横断面的几何尺寸如图2所示,盾构隧道外径为6.2 m,内径为5.5 m,管片幅宽为1.2 m,厚度为0.35 m。混凝土强度级别为C55,弹性模量为35.5 GPa。隧道管片环接头均采用机械性能为5.8级的M30直螺栓连接。模型盾构隧道设计中,缩尺模型的几何相似常数一般为10。本次模型拼装盾构隧道管片环按照几何相似比1/10进行设计,最后得到模型拼装盾构隧道管片环的外径、幅宽及厚度分别为620、120、35 mm。

依据文献[1],按照几何相似比加工具有螺栓孔

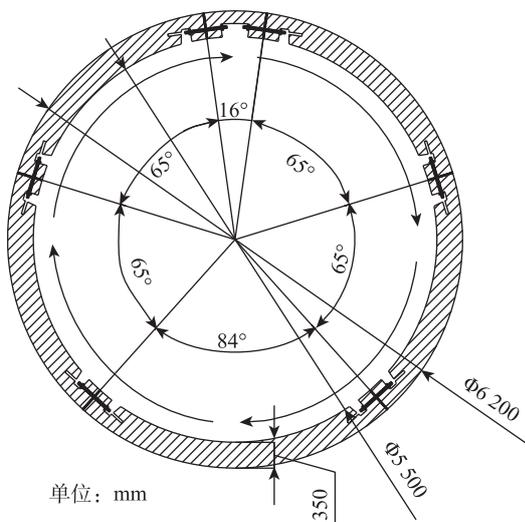


图2 原型盾构隧道的几何尺寸

Fig. 2 Geometric dimensions of prototype shield tunnel

的尼龙盾构隧道模型管片,其实物如图3(a)所示。为保证尼龙模型盾构隧道单块管片材料具有良好的弹性,对加工好的单块拼装管片进行管片接头抗弯刚度试验,管片两个接头处布置位移计,测量其测点的位移,如图3(b)所示。制作拼装盾构隧道管片环时,需考虑拼装管片的接头。盾构隧道管片环接头刚度受到诸多因素的影响,且影响因素复杂。因此,制作的前提是要确保影响管片接头刚度的各因素均满足相似关系。影响因素包含螺栓的预紧力、弹性衬垫、螺栓垫片以及连接螺栓的材质等。

拼装模型盾构隧道管片环连接时,需要考虑螺栓与螺母之间的垫片,是否设置垫片对模型盾构隧道接头的抗弯刚度有一定的影响。为此,文章针对设置了螺栓垫片的管片环抗弯刚度的影响进行研究。采用对压法进行模型管片环试验(图3(c)),其中,管片向内为正,向外为负。但为了数据更直观,制图时,数据均取正值。

由图4可知,螺栓垫片的数量会影响模型盾构隧道管片环的竖向和水平位移。当螺栓未设置垫片,或设置1块垫片时,管片环竖向位移和水平位移均随加载量的增加呈近线性增长趋势。设置1块垫片时竖向和水平位移大于未设置垫片的竖向和水平位移,说明增加垫片会使模型管片环的抗弯刚度降低。由图4(c)可知,当螺栓设置2块垫片时,管片环竖向和水平位移增长趋势与设置1块垫片时不同,呈现为近似指数增长趋势。综上所述,螺栓垫片对模型拼装盾构隧道管片环接头抗弯刚度有显著影响,要使其满足良好的相似要求难度极大。此外,模型管片环接头抗弯刚度的影响因素复杂,其影响因素除螺栓垫片外,还包括螺栓预紧力、弹性衬垫及连接螺栓的材料等。因此,如果要使模型拼装盾构隧道管片环与原型隧道满足相似关系,则需要保证影响因素均满足相似要求。然而,要控制所有影响因素完全满足相似关系,显然难度极大。

3.2 开槽模型管片环试验研究

在设计模型盾构隧道管片环时,有一种降低隧道横向刚度的方式,即在模型隧道接头位置进行开槽处理。文献[10]对盾构隧道开槽模型进行了理论分析,采用数值模型进行了验证,并提出了隧道开槽模型的设计方法。其中,螺栓管片接头和开槽管片接头的示意图如图5所示。

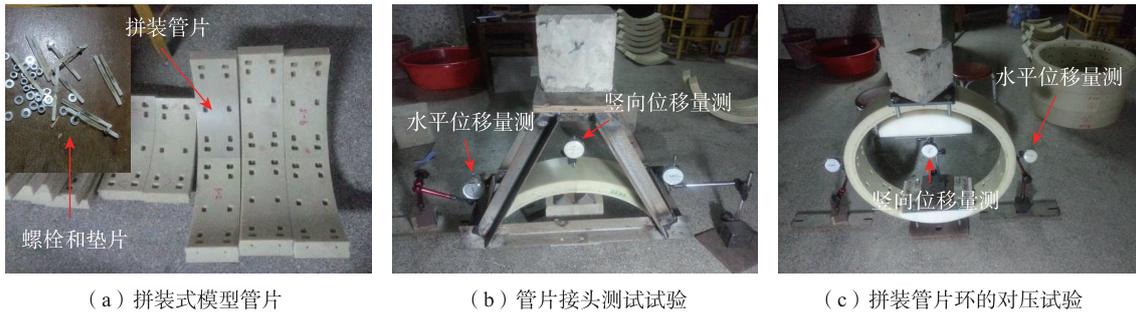


图3 拼装管片环测试

Fig. 3 Assembled segment ring test

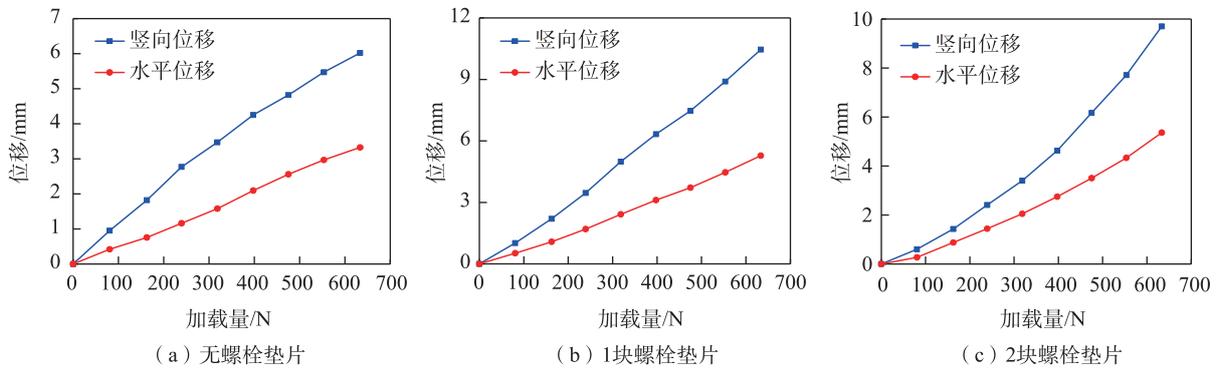


图4 管片环位移与加载量的关系

Fig. 4 Relationship between tunnel displacement and loading amount

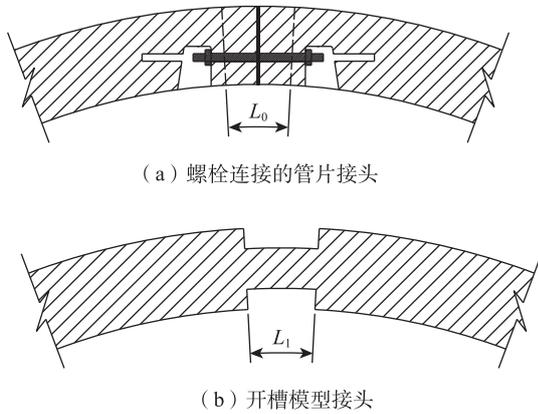


图5 两种盾构隧道接头形式

Fig. 5 Two types of shield tunnel joints

具体开槽模型接头的开槽段厚度推导过程在文献[11]中详细介绍,其开槽模型接头的开槽段厚度 t' 的计算公式为

$$t' = \sqrt[3]{\frac{12L_1k_jI_s}{b_s(EI_s + k_jL_0)}} = \sqrt[3]{\frac{12I_s k_j \alpha_g (D + D_i)}{2b_s EI_s + b_s k_j \alpha_g (D + D_i)}} \quad (1)$$

式中: k_j 为纵缝接头抗弯刚度; I_s 为管片环横截面惯性矩; b_s 为管片环幅宽; α_g 为开槽段对应的管片

环中心角; D, D_i 分别为管片环外径和内径。

单侧开槽接头模型的计算结果与两侧等深度开槽结果基本相同,仅在开槽部位的弯矩有突变,且当开槽模型接头对应的管片环中心角为 $3^\circ \sim 5^\circ$ 时,材料强度完全满足要求^[11]。试验中,为得到模型盾构隧道管片环的竖向位移,位移计应布设在模型盾构隧道管片环的内部。为此,加工模型管片环时,考虑单侧开槽(即在管片环外侧进行开槽)。此外,模型盾构隧道开槽管片环按照文献[10]进行设计,选取加工模型盾构隧道开槽管片环的材料为尼龙。同时,开槽管片环的几何尺寸为原型隧道的1/10,开槽位置参数见表2。

模型管片环加工完成后,需确保开槽模型管片

表2 纵缝接头对应槽缝深度

Tab.2 Longitudinal seam joint corresponding to slot depth

位置	纵缝接头刚度 / (MN (m/rad))	开槽深度/mm
8°与352°	34	12.32
73°与287°	28	11.58
138°与222°	50	13.92

环的合理性。为此,对模型管片环进行对压试验,与未开槽管片环的试验结果进行对比分析,如图6所示。试验中,通过改变砝码的数量来模拟不同的加载量,管片环顶部和两侧位置分别安装位移计,测量管片环的水平位移和竖向位移。得到未开槽管片环和开槽管片环变形与竖向压力的关系如图7所示。

由图7分析可知,当管片环未开槽时,随着竖向加载量的增加,管片环的竖向位移和水平位移呈近似线性增长的趋势,且竖向位移约为水平位移的2倍。当管片环开槽时,其竖向和水平位移随加载量的增大而增加,同样竖向位移约为水平位移的2倍。但是开槽管片环的竖向位移和水平位移的数值明显大于未开槽管片环。开槽削弱了管片环整体的刚度,从而导致开槽后管片环的水平和竖向位移比未开槽的管片环大。由于影响管片环抗弯刚度的因素为开槽孔深度与宽度,可通过改变开

槽孔深度和宽度来控制刚度折减。同时,采用开槽方式模拟管片接头的力学性能更稳定。综上所述,建议在模型盾构隧道管片上开槽来模拟管片环纵缝接头。

3.3 均质环模型管片环试验研究

盾构隧道简化模型有均质圆环模型、弹性铰模型、梁-弹簧模型及修正均质圆环模型。研究盾构隧道与土层的相互作用时,采用修正均质圆环模型简化盾构隧道更便于进行模型试验。基于文献[11]中提出的模型隧道管片环设计方法,当采用钢材作为加工模型隧道管片环材料时,其修正均质圆环模型管片环的厚度 t_m 的计算公式为

$$t_m = \sqrt[3]{\frac{\eta_h E_p}{C_l^4 E_m} t_p} \quad (2)$$

式中: η_h 为原型隧道横向刚度有效率。 E_p , t_p 分别为原型隧道弹性模量和管片厚度; C_l 为几何相似常数; E_m 为模型隧道管片弹性模量。

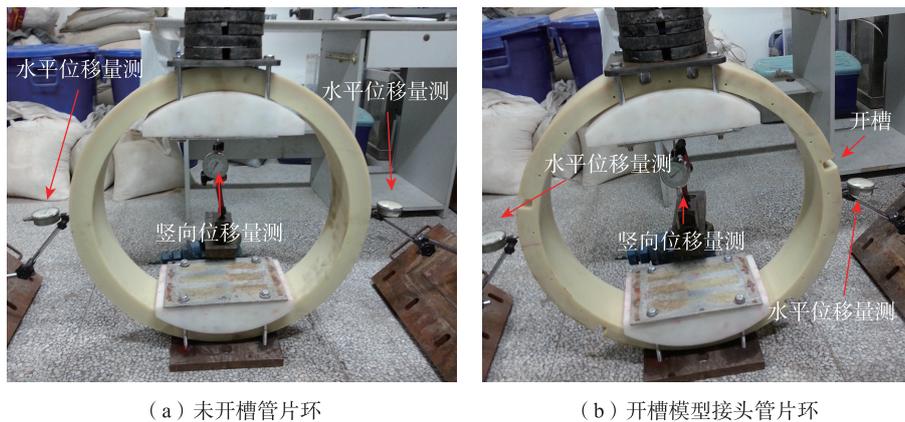


图6 两种模式管片环对压试验

Fig. 6 Two modes of segment ring pressure test

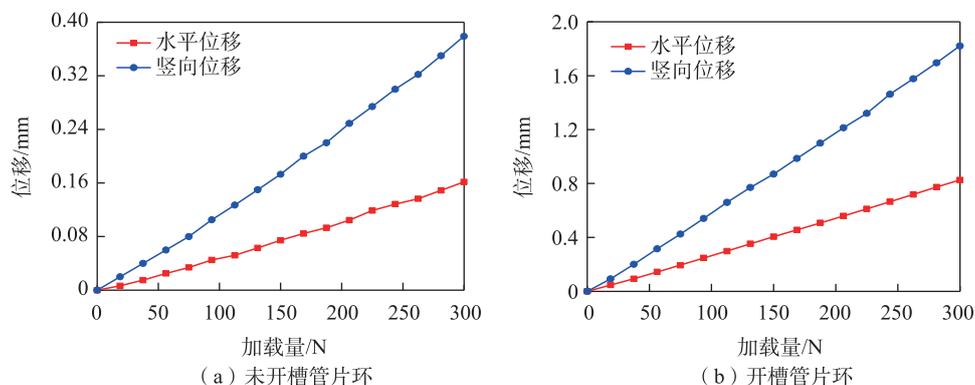


图7 两种模式管片环的变形与竖向加载的关系

Fig. 7 The relationship between the deformation of the segment ring and the vertical loading for the two modes

当模型隧道管片环采用钢材加工时,仅需考虑钢环的厚度。将原型隧道和模型隧道的相关参数代入到式(2)中,即可算得模型管片环的厚度为6.998 mm。为方便对模型隧道管片环进行加工,钢制模型管片环的厚度取7.000 mm。模型隧道管片环与原型管片环参数对比如表3所示。

表3 模型管片环与原型管片环的参数对比

Tab. 3 Comparison between parameters of prototype and model segment rings

对比参数	幅宽/ mm	弹性模量/ GPa	厚度/ mm	横向刚度/ (kN·m ²)
原型管片环	1 200	35.5	350	70 623.7
模型管片环	120	206	6.998	0.705 975

加工模型隧道管片环完成后,采用对压法试验测试其横向刚度,如图8所示。加载过程中,得到模型盾构隧道管片环的竖向和水平位移与加载量的关系如图9所示。由图9分析可知,钢制模型管片

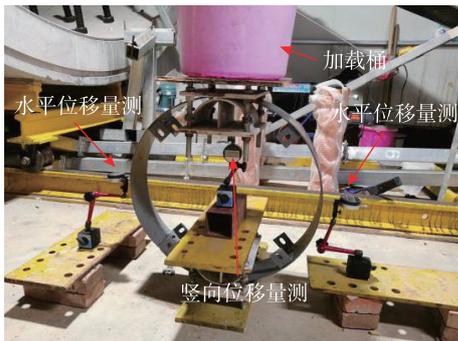


图8 模型管片环横向刚度测试

Fig. 8 Transverse stiffness test of model segment ring

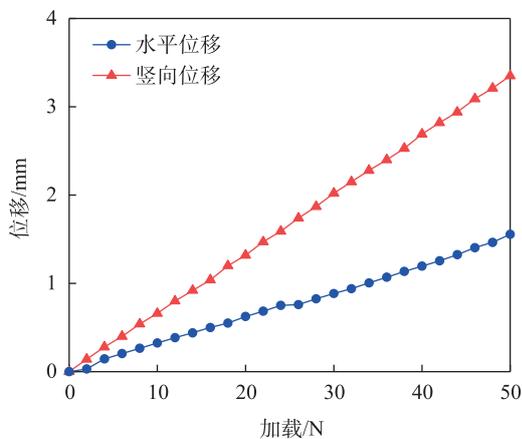


图9 管片环变形与竖向加载量的关系

Fig. 9 Relationship between deformation of segment ring and vertical loading

环的形变随载荷的增加呈现出近似线性增长趋势,说明钢制模型管片环的线弹性较好。因此,采用缩尺试验研究盾构隧道,且需将模型盾构隧道设计为修正均质管片环时,应综合考虑加工模型材料的强度和加工的便利性,建议采用钢板作为加工模型材料。

4 结论

1) 当高分子材料具有明显的蠕变性时,不宜用于加工模型盾构隧道;尼龙材料蠕变小,且强度与可加工性良好,可用于加工模型盾构隧道。

2) 因拼装接头的抗弯刚度影响因素复杂,模拟管片纵缝接头时,建议采用开槽的方式,接头的抗弯刚度可通过开槽宽度与深度进行控制。

3) 修正均质圆环的设计与加工简单,当模拟盾构隧道与地层相互作用时,可将模型管片环设计为修正均质管片环。此外,鉴于钢板具有良好的韧性与可加工性,建议采用钢板进行加工。

参考文献:

- [1] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 盾构隧道与地层相互作用的模型试验设计[J]. 铁道学报, 2018, 40(6): 127-135.
HUANG D W, ZHOU S H, FENG Q S, et al. Scaled model test design for interaction between shield tunnel and stratum[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(6): 127-135.
- [2] 黄大维,周顺华,王秀志,等. 模型盾构隧道管片纵缝接头设计方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1068-1076.
HUANG D W, ZHOU S H, WANG X Z, et al. Design method for longitudinal segment joints of shield tunnel model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1068-1076.
- [3] 王晓迪. 考虑纵缝接头刚度折减的盾构管片性能研究[J]. 铁道建筑技术, 2023(4): 108-112.
WANG X D. Study on the performance of shield segment considering the reduction of longitudinal joint stiffness[J]. Railway Construction Technology, 2023(4): 108-112.
- [4] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(3): 461-483.
- [5] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 通缝拼装盾构隧道横向刚度有效率计算方法及其影响因素[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 47-54.

- HUANG D W, ZHOU S H, FENG Q S, et al. Calculation method for transverse effective rigidity ratio of shield-driven tunnel with straight joint and its influential factors [J]. China Railway Science, 2017, 38(3): 47-54.
- [6] 封坤, 何川, 夏松林. 大断面盾构隧道结构横向刚度有效率的原型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1750-1758.
- FENG K, HE C, XIA S L. Prototype tests on effective bending rigidity ratios of segmental lining structure for shield tunnel with large cross-section[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1750-1758.
- [7] 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): 11-18.
- HUANG H W, XU L, YAN J L, et al. Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 11-18.
- [8] 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): 335-340.
- WEI L X, YANG C S, HUANG H B, et al. Model test study on longitudinal stiffness of shield tunnel and its influencing factors[J]. Highway, 2020, 65(1): 335-340.
- [9] MOLINS C, ARNAU O. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 764-777.
- [10] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- YANG J J. Similarity theory and structural model test[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.
- [11] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85-89.
- TANG Z C, HE C, LIN G. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 85-89.
- [12] 黄大维, 徐长节, 罗文俊, 等. 考虑横向与纵向刚度相似的模型盾构隧道设计方法[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2299-2307.
- HUANG D W, XU C J, LUO W J, et al. Design method for shield tunnel model considering similarities of transverse and longitudinal rigidities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2299-2307.



第一作者: 黄大维(1984—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为盾构隧道及岩土工程。E-mail: gddthdw@126.com。



通信作者: 耿大新(1977—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为交通岩土工程。E-mail: gengdaxin@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 李根)