

DOI: 10.11779/CJGE201501009

基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析

叶 飞, 杨鹏博, 毛家骅, 毛燕飞, 陈 治, 孙昌海

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为探明盾构隧道纵向变形性能及抗弯刚度有效率的取值, 基于模型试验, 根据相似理论对通缝、错缝及匀质圆筒模型进行纵向模型试验研究。分别对3种纵向试验模型进行了加载试验, 采用数据采集系统测试加载过程中的管片模型的纵向变形, 得到了各级荷载下通缝、错缝及匀质圆筒模型纵向变形规律及其抗弯刚度有效率, 并对试验结果进行对比分析。结果表明: ①盾构隧道纵向变形与荷载基本呈线性关系; ②通缝、错缝隧道纵向抗弯刚度有效率分别在0.18~0.39和0.20~0.40; ③通缝和错缝隧道的纵向弯曲变形性能基本一致, 错缝拼装效应对盾构隧道纵向变形的影响并不明显, 研究成果可为盾构隧道的设计提供参考。

关键词: 盾构隧道; 管片结构; 模型试验; 纵向刚度

中图分类号: TU451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0083-08

作者简介: 叶 飞(1977-), 男, 陕西石泉人, 教授, 硕士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作。

E-mail: ypb2103090228@126.com.

Longitudinal rigidity of shield tunnels based on model tests

YE Fei, YANG Peng-bo, MAO Jia-hua, MAO Yan-fei, CHEN Zhi, SUN Chang-hai

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to explore the performances of longitudinal deformation and the efficient values of bending rigidity of shield tunnels, straight-jointed, stagger-jointed and uniform longitudinal models are investigated based on model tests and similarity theories. The values of longitudinal deformation of three kinds of longitudinal models under loads are measured by a data acquisition system. The rules of longitudinal deformation and the efficiencies of bending rigidity of the straight-jointed, stagger-jointed, and uniform longitudinal models under all loading stages are obtained, by adding the concentrated loads on the models. The comparative analysis of the test results shows the linear relationship between the longitudinal deformation and the loads. The range of the efficient values of longitudinal bending rigidity is between 0.18 and 0.39 under straight-jointed condition, and in the stagger-jointed model it is between 0.20 and 0.40. What's more, the performances of the longitudinal bending of straight-jointed and stagger-jointed tunnels are similar, and the stagger-jointed effect is not obvious to the longitudinal deformation of shield tunnels. This study may provide some references for the design of shield tunneling in China.

Key words: shield tunnel; segmental structure; model test; longitudinal rigidity

0 引言

盾构隧道受到小半径曲线、大坡度施工、邻近施工、地层沉降、平行设置隧道、地震等因素影响时, 仅仅依据横断面的结构设计来评价其力学行为是比较困难的^[1]。因此, 盾构隧道设计中, 需要考虑施工各阶段及完成后的状态及衬砌的结构特点, 根据需要进行纵断面的结构设计, 纵向设计越来越受到重视^[2]。目前, 盾构隧道纵向结构分析模型主要以纵向梁-弹簧模型^[3-5]和纵向等效连续化模型^[6-7]为主。

小泉淳等^[3-5]提出了纵向梁-弹簧模型。该模型以梁单元模拟衬砌环, 以弹簧的轴向、剪切和转动效应

模拟环向接头和纵向接头, 以弹簧模拟土体与隧道之间的相互作用。志波由纪夫等^[6-7]提出了考虑纵向接头影响的纵向等效连续化模型。徐凌^[8]在“志氏模型”的基础上, 考虑了环缝影响范围, 提出了广义纵向等效连续化模型并推导了考虑环缝影响范围的纵向等效抗弯刚度及轴向等效刚度的计算公式。廖少明^[9]依据纵向梁-弹簧模型对上海地铁一号线隧道进行了分析, 得到了考虑接缝影响的隧道纵向等效抗弯刚度有效

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178052, 50808020, 51478044)

收稿日期: 2014-05-09

率。黄正荣^[10]采用壳—弹簧模型对匀质隧道、纵向匀质隧道、横向匀质隧道、通缝拼装隧道、错缝拼装隧道的纵向等效弯曲刚度进行了分析。叶飞等^[11]在横向修正惯用法的基础上, 将横向弯曲刚度有效率引入到纵向等效连续化模型的推导中, 对考虑横向刚度影响的盾构隧道纵向等效抗弯刚度进行理论推导, 得到了考虑横向刚度有效率的纵向等效抗弯刚度计算式, 从而初步将纵向刚度的分析与横向刚度的变化统一起来, 进而也说明了盾构隧道纵、横向抗弯刚度的相关性和匹配性。

可以看出, 现有针对盾构隧道纵向抗弯刚度的研究手段多集中于理论分析, 亟需其他研究手段予以验证。本文采用荷载—结构模型, 以有机玻璃模拟管片衬砌结构, 钢质和铝质焊丝模拟接头螺栓, 围绕盾构隧道纵向抗弯刚度有效率问题开展模型试验, 研究管片衬砌结构的纵向抗弯刚度, 得出纵向抗弯刚度有效率的取值范围, 并探究横向性能对纵向性能的影响。

1 模型试验设计

1.1 模型试验的相似关系

(1) 相似参数的确定

根据有关力学理论分析, 模型试验所涉及到的全部物理量如下:

a) 管片特性: ①几何尺寸 L 包括管片的外径 D 、管片的内径 r 、厚度 t 和环宽 b ; ②材料性能包括管片的弹性模量 E_c 、重度 γ 和泊松比 ν ; ③管片应力 σ 、管片应变 ε 、管片环挠度 δ 和管片环转角 θ 。

b) 螺栓特性: 螺栓直径 d 、长度 l 和弹性模量 E_t 。

c) 外荷载特性: 集中力 F 、外均布荷载 q 、弯矩 M 、抗弯刚度 EI 、抗拉刚度 EA 。

本相似试验中, 因管片自重与其所受上部土压及地表超载相比很小, 故不考虑管片重度 γ 的相似; 试验中以集中力加载, 因此不考虑外均布荷载 q 和弯矩 M 的相似性。

(2) 管片相似

根据相似理论, 模型与原型 π 值相等, 可得各相似常数之间的关系:

设管片的几何相似比和弹性模量相似比:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_{cp}}{L_{cm}} &= C_{L_c}, \\ \frac{E_{cp}}{E_{cm}} &= C_{E_c}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

则有

$$\left. \begin{aligned} C_\sigma &= C_{E_s}, \\ C_\delta &= C_L, \\ C_F &= C_{E_s} C_L^2, \\ C_\mu &= C_\varepsilon = 1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, C 为原型与模型的相似常数, 下标为该模型系统中相应参数。

(3) 接头相似

文献[8, 12~14]采用不同方式对管片接头进行了模拟。本文应用了一种与上述管片接头刚度相似方法不同的新方法, 具体步骤如下:

a) 计算原型隧道管片抗弯刚度、抗拉(压)刚度与螺栓接头的抗弯刚度、抗拉(压)刚度的比值(α_{ij})_p, 模型隧道的各刚度比值为(α_{ij})_m, 由相似理论可得(α_{ij})_p = (α_{ij})_m = α_{ij} 。接头各个刚度表达式如表 1 所示(注: $i=1$ 表示环向接头, $i=2$ 表示纵向接头, $j=1$ 表示抗弯, $j=2$ 表示抗拉(压))。

表 1 接头各个刚度表达式

Table 1 Expressions for joint stiffnesses

项目	弯曲刚度		抗拉(压)刚度	
	管片	螺栓	管片	螺栓
原型	$(E_c I_c)_p$	$(n E_t I_t)_p$	$(E_c A_c)_p$	$(n E_t A_t)_p$
模型	$(E_c I_c)_m$	$(n' E_t I_t)_m$	$(E_c A_c)_m$	$(n' E_t A_t)_m$

横向接头的刚度比:

$$\frac{(E_c I_c)_p}{(n E_t I_t)_p} = \frac{(E_c I_c)_m}{(n' E_t I_t)_m} = \alpha_{11}, \quad (3)$$

$$\frac{(E_c A_c)_p}{(n E_t A_t)_p} = \frac{(E_c A_c)_m}{(n' E_t A_t)_m} = \alpha_{12}, \quad (4)$$

式中, $I_c = bt^3/12$, $I_t = \pi d^4/64$, $A_c = bt$, $A_t = \pi d^2/4$ 。

纵向接头的刚度比:

$$\frac{(E_c I_c)_p}{(n E_t I_t)_p} = \frac{(E_c I_c)_m}{(n' E_t I_t)_m} = \alpha_{21}, \quad (5)$$

$$\frac{(E_c A_c)_p}{(n E_t A_t)_p} = \frac{(E_c A_c)_m}{(n' E_t A_t)_m} = \alpha_{22}, \quad (6)$$

式中, $I_c = \pi(D^4 - r^4)/64$, $I_t = \pi d^4/64$, $A_c = 2\pi r t$, $A_t = \pi d^2/4$ 。

由上式推导可以得到螺栓的几何相似比和弹性模量相似比:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L_{tp}}{L_{tm}} &= C_{L_t}, \\ \frac{E_{tp}}{E_{tm}} &= C_{E_t}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

b) 合理选择结构模型材料是结构模型试验成功的先决条件。经过大量的对比筛选, 通过对材料线弹性阶段的弹性模量值的分析, 并对各种材料的成本、加

工难易程度、现有材料加工工艺的综合分析, 决定采用有机玻璃作为管片模型材料。

c) 管片相似材料确定后, 按步骤 a) 反算可得螺栓材料的弹性模量: $E_t=3.16 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 进而对大量材料进行试验, 最终确定螺栓材料的几何相似比与弹性模量相似比。

按照试验相似关系的要求, 螺栓要同时满足几何相似和弹性模量相似, 并且按照管片模型可拼装的要求, 螺栓材料必须适于加工螺纹。通过大量的资料查阅和市场调研, 选择了纯铝焊丝(HS301)铁焊丝(J50)和钢焊丝(ER325), 按照国家标准《金属拉伸试验试件》GB6397—1986 的要求, 分别制作了以上 3 种焊丝试件, 进行金属拉伸试验, 验证其是否满足弹性模量相似要求。材料的应力 - 应变关系如图 1~3 所示。

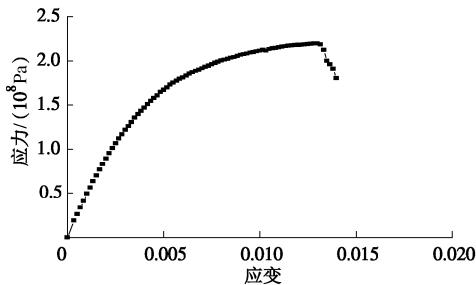


图 1 纯铝焊丝材料应力 - 应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationship of pure aluminium wire

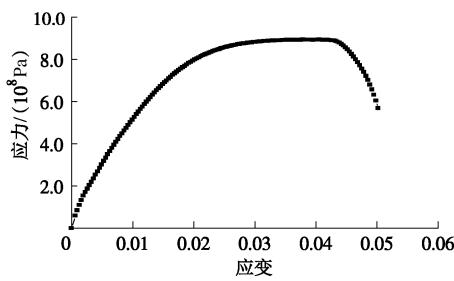


图 2 铁焊丝材料应力 - 应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of iron wire

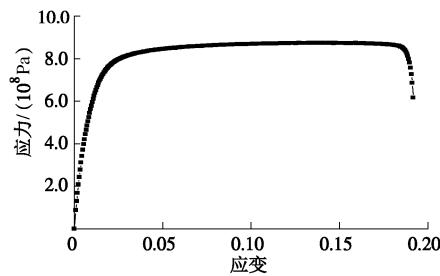


图 3 钢焊丝材料应力 - 应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of steel wire

通过对比 3 种材料的弹性模量发现, 纯铝焊丝(HS301)的弹性模量满足弹性模量相似比的要求, 并且纯铝焊丝较易加工螺纹, 是理想的螺栓模型材料。

d) 将 $(\alpha_{ij})_p$ 与 $(\alpha_{ij})_{m0}$ 比较, 可得到模型纵、横向螺栓接头数量。值得注意的是, 为使管片顺利连接, 环向接头与纵向接头螺栓数量不少于管片环数。注: $(\alpha_{ij})_{m0}$ 为管片模型抗弯、抗拉(压)刚度与单个接头螺栓模型的抗弯、抗拉(压)刚度的比值。

e) 将 $(\alpha_{ij})_m$ 与 $(\alpha_{ij})_p$ 比较, 计算模型隧道与原型隧道螺栓接头的抗拉(压)、抗弯刚度相似度 β_{ij} , 相似度按下式进行计算:

$$\beta_{ij} = 1 - \frac{|(\alpha_{ij})_p - (\alpha_{ij})_m|}{(\alpha_{ij})_m} \quad (8)$$

f) 根据选出的模型材料和原型材料相关参数确定管片模型和螺栓模型的弹性模量相似比, 并结合几何相似比得到荷载相似比。

1.2 相似材料

制作管片结构模型的材料种类很多, 经过大对比筛选、反复材料性能试验, 选取各向同性、透明度高, 质轻且常温下具有较好的拉伸、弯曲和压缩性能的无定形热塑性材料——有机玻璃作为模拟管片材料。

本实验以几何相似比 ($C_L=15$) 及材料的弹性模量相似比(由所选材料决定)为基础相似比, 选取有机玻璃模拟管片衬砌结构, 通过接头刚度相似方法, 选取钢质和铝质焊丝模拟接头螺栓。表 2, 3 给出了地铁隧道原型与模型的几何尺寸及材料物性参数。

表 2 地铁隧道模型与原型的几何参数

Table 2 Geometric parameters of prototype subway tunnel

项目	衬砌外径 /m	衬砌内径 /m	衬砌厚度 /m	环宽 /m	螺栓长 /m	螺栓直径 /m	螺栓根数 /根
原型	6.200	5.500	0.350	1.000	0.400	0.030	17
模型	0.400	0.355	0.023	0.065	0.027	0.002	6

表 3 地铁隧道模型与原型的材料物性参数

Table 3 Parameters of physical properties of subway tunnel

项目	管片弹性模量/(10 ⁹ Pa)	管片泊松比	螺栓弹性模量/(10 ¹⁰ Pa)	螺栓泊松比
原型	34.50	0.2	20.00	0.30
模型	2.06	0.3	3.38	0.32

由式 (8) 可得: $\beta_{11}=93.02\%$, $\beta_{12}=95.76\%$, $\beta_{21}=93.99\%$, $\beta_{22}=95.33\%$ 。因此, 选出的模型材料具有很高的相似性, 能对原型隧道进行相似模拟。

1.3 模型拼装

按图 4 所示的拼装方式, 分别对管片和螺栓模型进行通缝、错缝环拼装。通缝和错缝试验模型由 25 环管片组成; 匀质圆桶模型采用完整的有机玻璃管按设计尺寸加工。加工完成的匀质、错缝、通缝管片模型如图 5 所示。

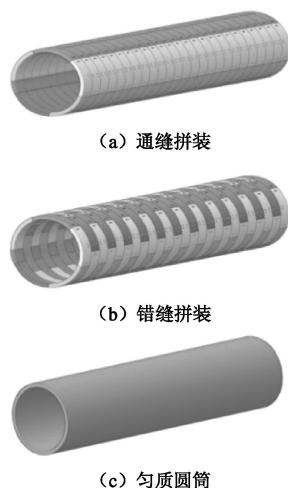


图 4 管片模型的不同拼装方式

Fig. 4 Different assembling ways of segment models

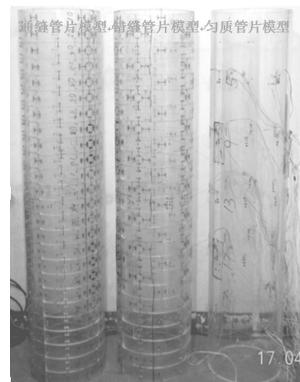


图 5 拼装后的管片模型图

Fig. 5 Photo of different segmental models

1.4 试验装置及试验方法

(1) 试验装置

a) 反力架

根据试验需要, 设计制作了如图 6 所示的加载台架。

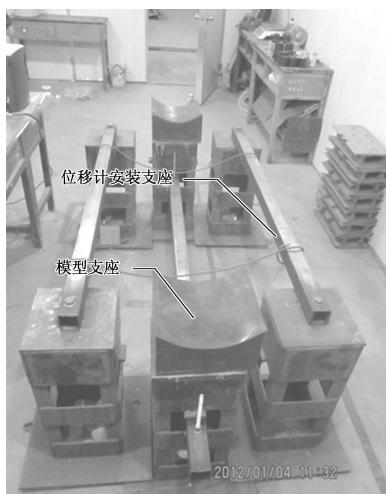


图 6 加载台架

Fig. 6 Loading platform

b) 数据采集系统

采用 DH3816 型静态数据采集仪采集数据, 和 WBD 型机电两用电阻应变式位移传感器, 对管片模型因弯曲变形引起的挠度和横向变形进行测试和采集。测点断面布置在管片模型第 5、9、13、17、21 环中间, 断面上布置 3 个测点, 分别位于管片环水平直径处和管片底部, 见图 7。

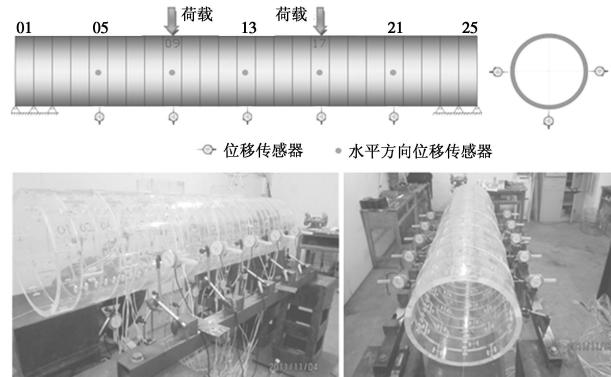


图 7 测点布置

Fig. 7 Arrangement of measuring points

(2) 试验方法

a) 试验工况

试验工况见表 4。

表 4 试验工况

Table 4 Test conditions

组别	试验模型编号	拼装方式	横向螺栓描述
1	ZXTFGPMX-01	25 环-通缝	铝制螺栓
	ZXCFGPMX-01	25 环-错缝	
2	ZXTFGPMX-02	25 环-通缝	钢制螺栓
	ZXCFGPMX-01	25 环-错缝	
3	ZXYZGPMX-01	完全匀质	无接头

b) 加载方案

①在模型隧道拱顶设置两个加载点, 采用两点对称加载。②施加第一级荷载, 第一级荷载为“铁砂+铁板+法码”。每个加载点加载重量为 3 kg, 一级荷载 6 kg, 试验共计 9 级荷载。③施加第二级荷载, 每个加载点堆放 6 个法码 (3 kg)。④重复第 3 步骤, 直至 9 级荷载全部施加完毕, 如图 8 所示。



图 8 纵向加载

Fig. 8 Longitudinal load

2 纵向刚度有效率计算

文献[6, 7]认为盾构隧道在横向为一匀质圆环, 在纵向以刚度等效的方法将拼装管片等效为连续匀质圆筒。由于盾构隧道存在大量接头, 大大降低了其纵向抗弯刚度, 因此, 对隧道纵向等效抗弯刚度进行折减,

$$(EI)_{eq} = \eta EI \quad , \quad (9)$$

式中, $(EI)_{eq}$ 为隧道纵向等效抗弯刚度, EI 为均匀连续梁抗弯刚度, η' 为管片纵向抗弯刚度有效率。

根据材料力学, 可得梁的抗弯刚度 EI 与挠度 ω 的关系:

$$EI \propto 1/\omega \quad . \quad (10)$$

依据式(10), 即可通过对比拼装隧道和匀质隧道相应位置的挠度, 得到纵向抗弯刚度有效率, 见图 9。

$$\eta' = \omega_y / \omega_p \quad , \quad (11)$$

式中, ω_y 表示匀质管片模型的挠度, ω_p 表示拼装管片模型的挠度。

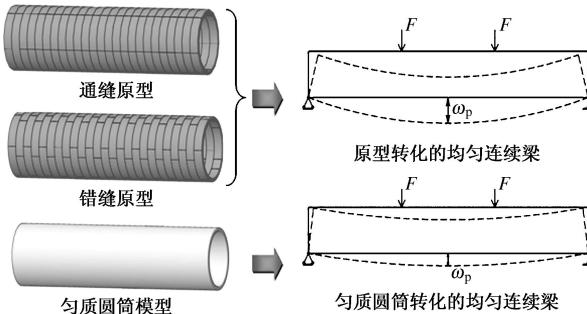


图 9 纵向抗弯刚度有效率计算图

Fig. 9 Efficiency of longitudinal bending rigidity of shield tunnel

按式(11)计算的纵向抗弯刚度有效率实际上是加载过程的平均值, 为精确得到不同荷载下的抗弯刚度有效率, 对式(11)进行引申:

$$\eta' = \Delta\omega_y / \Delta\omega_p \quad , \quad (12)$$

式中, $\Delta\omega_y$ 表示匀质管片模型在某一荷载变化下的挠度变化, $\Delta\omega_p$ 表示拼装管片模型在某一荷载变化下的挠度变化。

3 试验结果分析

3.1 隧道纵向变形分析

第1、3组试验不同拼装方式的管片模型加载后的变形情况如图 10, 11 所示。

从图 10 可以看出, 通缝、错缝、匀质管片模型的挠度曲线均符合简支梁弯曲变形规律, 跨中挠度最大, 自跨中向两边支座处挠度逐渐减小。其挠度大小依次为通缝模型>错缝模型>匀质模型, 但错缝与通缝模型挠度接近, 错缝拼装对盾构隧道纵向变形的影

响并不明显。

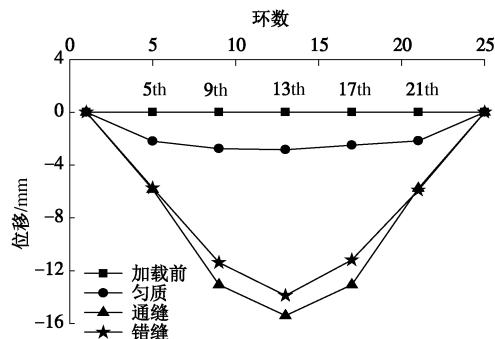


图 10 纵向挠度曲线

Fig. 10 Curves of vertical deflection

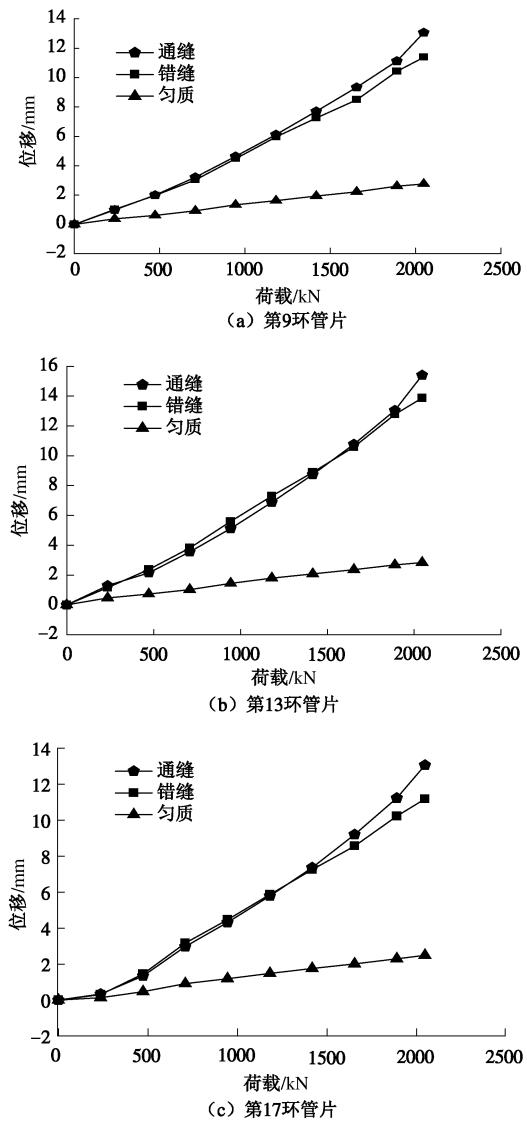


图 11 各环管片的荷载 - 挠度关系曲线

Fig. 11 Relationship between vertical deflections and loads

从图 11 可以看出, 在加载过程中, 通缝、错缝、匀质管片模型各测点挠度值随着荷载增加而基本呈线性增大, 通缝与错缝模型的“荷载 - 挠度曲线”基本重合。

3.2 抗弯刚度有效率分析

由式(12)计算每级荷载作用下,通缝、错缝、匀质管片模型相应位置挠度的比值,得到盾构隧道纵向抗弯刚度有效率,图12给出了第13环在各级荷载作用下的刚度有效率所示。

从图12可以看出,盾构管片结构在弹性状态至结构开裂前,纵向抗弯刚度有效率随着荷载的增加而逐渐减小,通缝隧道纵向抗弯刚度有效率在0.18~0.39之间,错缝隧道纵向抗弯刚度有效率在0.20~0.40之间;通缝与错缝模型隧道的抗弯刚度有效率基本相同。可见,通缝隧道与错缝隧道的纵向弯曲性能基本一致,错缝拼装效应并不明显。

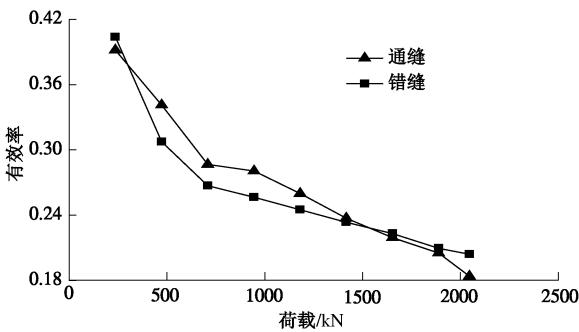


图12 管片纵向刚度有效率-荷载关系曲线

Fig. 12 Relationship between efficiencies of longitudinal bending rigidity and loads

3.3 模型试验结果对比分析

(1) 与理论解对比

a) 纵向梁-弹簧模型

文献[9]以上海地铁一号线隧道为例,利用纵向梁-弹簧模型计算得出了考虑接缝影响的隧道纵向等效抗弯刚度为匀质隧道刚度的1/5,即纵向抗弯刚度有效率为0.2。本次试验所得纵向抗弯刚度有效率与梁-弹簧模型计算所得有效率基本一致。

b) 纵向等效连续化模型

纵向等效连续化模型^[6-7]的纵向抗弯刚度有效率 η' 可表示为

$$\eta' = \frac{\cos^3 \varphi}{\cos \varphi + (\pi/2 + \varphi) \cdot \sin \varphi}, \quad (13)$$

式中,

$$\varphi + \cot \varphi = \pi \left(\frac{1}{2} + \frac{nK_b}{E_s A_s / l} \right), \quad (14)$$

其中, n 为螺栓数量, K_b 为螺栓线刚度, A_s 为隧道横截面面积, E_s 为隧道横截面弹性模量。

将隧道原型参数代入式(14)中,解得 $\varphi=55.03^\circ$,将 φ 代入式(13)可得纵向抗弯刚度有效率为0.0713。本次试验所得有效率值比该值大,主要原因在于纵向等效连续化模型夸大了隧道环缝的影响范围,使得有

效率计算值较小。

(2) 与数值解对比

文献[10]采用壳-弹簧模型对不同拼装方式的隧道纵向等效弯曲刚度进行了分析研究,得出了通缝拼装隧道的纵向抗弯刚度有效率为0.092,错缝拼装隧道的纵向抗弯刚度有效率为0.106。

本次试验所得刚度有效率值比壳-弹簧模型所得数值大,原因在于壳-弹簧模型将安装在管片内部的纵向螺栓简化为两环管片对应位置节点间的剪切弹簧,剪切弹簧无法起螺栓的销栓作用,降低了拼装隧道整体刚度,使得计算出的刚度有效率值较低。

(3) 与试验结果对比

a) 现场试验

文献[3]通过盾构隧道现场载荷测试得到了盾构隧道整体刚度,其结果表明:在黏土(标贯值 N 为5~10)和砂土(标准贯入值 N 为40~50)中隧道纵向弯曲刚度的实测值是匀质隧道纵向弯曲刚度的1/5左右,与本次模型试验值恰好吻合。

b) 模型试验

文献[8]进行了系统的盾构隧道纵向模型试验,得出了通缝、错缝隧道纵向弯曲刚度有效率分别为0.11和0.13。本文和文献[8]的试验结果不同主要由以下原因引起:①试验材料;②拼装方式;③加载方式;④量测位置。其中最主要的原因是拼装方式的不同,本次试验所采用的接头与文献[8]中纵向模型试验所用的接头,无论是材料,还是结构形式,都完全不同,并且两种接头为纵向模型提供的结构刚度亦不相同。文献[8]采用塑料接头片+螺丝,本文采用铝制螺栓+2个弹簧垫+2个螺母+凝固剂。因此,本次试验所得弯曲刚度有效率与文献[8]所得的有效率值有所差别,本次试验所得弯曲刚度有效率为一取值范围,为实际工程提供了指导性原则。应根据实际应根据实际工程情况进行取值。

3.4 横向刚度对纵向抗弯刚度的影响

通常将盾构隧道横向、纵向结构性能分别看成两个平面问题加以研究。这种研究方法,忽略了横向、纵向性能的相互影响和匹配关系,不能真实反映衬砌结构的受力和变形形态。为了探究横向对纵向抗弯刚度的影响,本试验采用文献[15]的方法通过改变环向螺栓材料来实现管片横向抗弯刚度的改变(通过横向模型试验得到横向铝螺栓和钢螺栓拼装的管片模型横向抗弯刚度有效率如表5所示),分别对铝制和铁质螺栓拼装的两种不同横向抗弯刚度的纵向模型进行加载试验。由1、2组实验得出加载后各模型的挠度曲线如图13所示。

表 5 横向铝螺栓和钢螺栓作用下横向抗弯刚度有效率

Table 5 Efficiencies of transverse rigidity with aluminum and steel circumferential bolts

类型	以竖直直径变化判别		以水平直径变化判别	
	铝质横向螺栓	钢质横向螺栓	铝质横向螺栓	钢质横向螺栓
	通缝	0.10~0.19	0.27~0.34	0.09~0.23
错缝	0.30~0.61	0.51~0.71	0.30~0.80	0.52~0.93

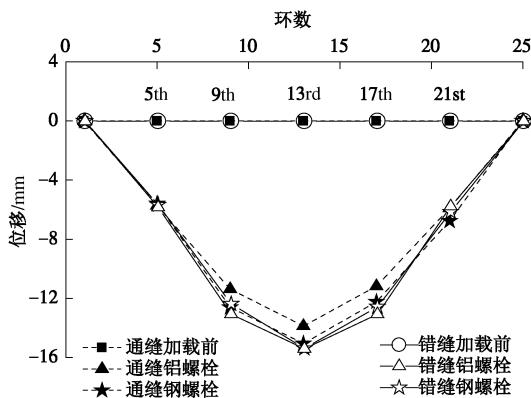


图 13 不同的环向螺栓下纵向挠度曲线

Fig. 13 Curves of vertical deflection under different kinds of circumferential bolts

从图 13 可以看出, 不同的环向螺栓拼装的管片模型各测点位移分布规律基本一致; 两种模型挠度大小存在一定区别, 但区别并不明显。

不同横向螺栓拼装的管片模型的纵向抗弯刚度随荷载变化如图 14 所示。从图 14 可以看出, 不同横向螺栓拼装的管片模型的纵向抗弯刚度有效率有所区别, 但规律并不明显。根据文献[11]的理论公式及数值模拟结果, 盾构隧道纵向抗弯刚度随横向抗弯刚度的增大而增大。但本试验中, 反而出现在横向钢螺栓拼装的管片模型的纵向抗弯刚度有效率小于横向铝螺栓拼装的管片模型, 可能是由于管片模型挠度值小于其竖直直径变化值。可见, 以隧道底部位移作为整个横断面的沉降值并不十分合理, 而应采用隧道横断面中性轴的竖向位移作为横断面沉降值。

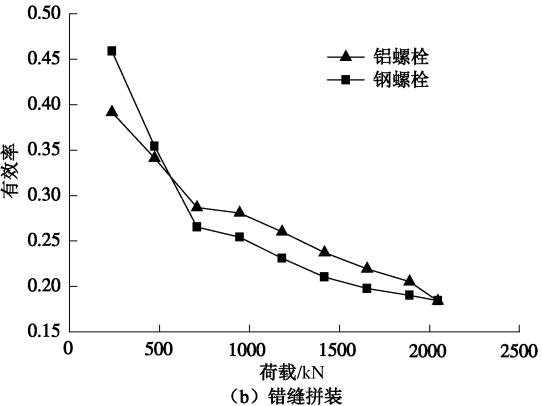
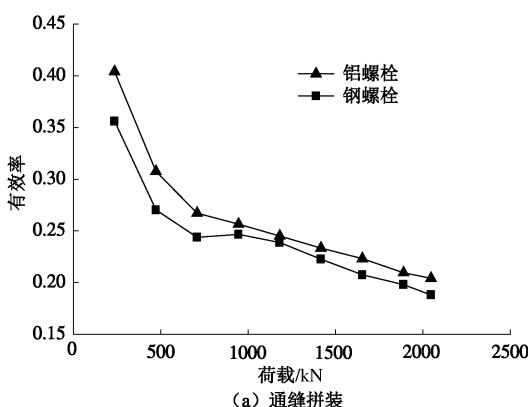


图 14 第 13 环管片刚度有效率 - 荷载曲线

Fig. 14 Relationship between efficiencies of segment rigidity of 13th ring and loads

4 结 论

(1) 基于相似理论, 本文提出了一种管片接头刚度相似方法: 先确定原型隧道中, 管片抗拉(压)、抗弯与接头抗拉(压)、抗弯的比值; 选定管片材料和几何尺寸后, 采用与原型隧道一致的刚度比值, 得出螺栓材料的刚度值, 进而确定螺栓材料的几何相似比与弹性模量相似比。

(2) 通过纵向模型试验得到了通缝、错缝拼装隧道纵向变形规律, 结果显示隧道纵向变形与荷载基本呈线性关系。

(3) 将通缝、错缝隧道与完全匀质隧道的挠度进行对比, 得到了隧道纵向抗弯刚度有效率, 通缝隧道纵向抗弯刚度有效率在 0.18~0.39 之间, 错缝隧道纵向抗弯刚度有效率在 0.20~0.40 之间。

(4) 通缝隧道纵向抗弯刚度有效率和错缝隧道基本相同, 通缝隧道和错缝隧道的纵向弯曲变形性能基本一致, 错缝拼装效应对盾构隧道纵向变形的影响并不明显。

参考文献:

- [1] 廖少明, 白廷辉, 彭芳乐, 等. 盾构隧道纵向沉降模式及其结构响应[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 566~570. (LIAO Shao-ming, BAI Ting-hui, PENG Fang-le, et al. Longitudinal settlement forms and structural response of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2006, 2(4): 566~570. (in Chinese))
- [2] 小泉淳. 盾构隧道管片设计——从容许应力设计法到极限状态设计法[M]. 官林星, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (KOIZUMI Atsushi. Segment design for shield tunnel—from allowable stress design method to limit state design method[M]. GUAN Lin-xing, trans. Beijing: China

- Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 西野健三, 吉田和夫, 小泉淳. ツールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察[J]. 土木学会論文集, 1986: 131 - 40. (NISHINO Kenso, YOSHIDA Kazuo, KOIZUMI Atsushi. In-situ tests and consideration on shield tunnel in the longitudinal direction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986: 131 - 140. (in Japanese))
- [4] 小泉淳, 村上博智, 石田智郎, 等. 急曲線施工用セグメントの設計法について [J]. 土木学会論文集, 1992: 111-120. (KOIZUMI Atsushi, MURAKAMI Hirotomo, ISHIDA Tomoaki, et al. Design method of segments at sharply curved section[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992: 111 - 120. (in Japanese))
- [5] 小泉淳, 村上博智, 西野健三. ツールドトンネルの軸方向特性のモデルにイヒついて[J]. 土木学会論文集, 1988: 79-88. (KOIZUMI Atsushi, MURAKAMI Hirotomo, NISHINO Kenso. Study on the analytical model of shield tunnel in longitudinal direction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988: 79-88. (in Japanese))
- [6] 志波由紀夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. ツールドトンネルの耐震解析による長手方向覆工剛性の評価法[J]. 土木学会論文集, 1988: 319 - 327. (SHIBA Yukio, KAWASHIMA Kazuhiko, OBINATA Naomi, et al. An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analyses[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988: 319 - 327. (in Japanese))
- [7] 志波由紀夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. 応答変位法によるツールドトンネルの地震時断面力の算定法[J]. 土木学会論文集, 1989: 385 - 394. (SHIBA Yukio, KAWASHIMA Kazuhiko, OBINATA Naomi, et al. Evaluation procedure for seismic stress developed in shield tunnels seismic deformation method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989: 385 - 394. (in Japanese))
- [8] 徐凌. 軟土盾構隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005. (XU Ling. Study on the longitudinal settlement of shield tunnel in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [9] 廖少明. 圆形隧道纵向剪切传递效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002. (LIAO Shao-ming. Research on the effect of longitudinal shear transfer on circular tunnel lining[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))
- [10] 黄正荣. 基于壳-弹簧模型的盾构衬砌管片受力特性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007. (HUANG Zheng-rong. Study on the mechanics character of shield tunnel segment with shell-spring model[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [11] 叶飞, 何川, 朱合华, 等. 考虑横向性能的盾构隧道纵向等效刚度分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1870 - 1876. (YE Fei, HE Chuan, ZHU He-hua, et al. Longitudinal equivalent rigidity analysis of shield tunnel considering transverse characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1870 - 1876. (in Chinese))
- [12] 唐溢. 盾构法隧道错缝拼装衬砌受力机理的研究[D]. 上海: 同济大学, 1988. (TANG Yi. Study on the mechanism of shield tunnel lining force of staggered joint assembly [D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [13] 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 Zhi-cheng, HE Chuan, LIN Gang. 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. (in Chinese))
- [14] 杨征. 武汉长江隧道大型管片衬砌结构力学特征研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007. (YANG Zheng. Study on the mechanical characteristics of segment lining for Wuhan Yangtze River Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (in Chinese))
- [15] YE Fei, GOU Chang-fei, SUN Hai-dong, et al. Model test study on effective ratio of segment transverse bending rigidity of shield tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 41: 193 - 205.