

# 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫接头抗弯刚度试验研究

杨秀仁<sup>1,2</sup> 林 放<sup>1,2</sup> 黄美群<sup>1,2</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037; 2. 城市轨道交通绿色与安全建造技术国家工程实验室, 北京 100037)

**摘要:** 文章以地铁车站预制装配式结构的注浆式单榫接头为研究对象, 通过开展多种工况接头关键受力方向 1:1 原型加载试验, 对各种工况下的接头  $M-\theta$  关系曲线进行拟合和微分得到抗弯刚度经验公式, 分析不同轴力作用下、不同注浆范围、不同榫头长度等工况下的接头刚度和弯矩的关系曲线特征, 揭示接头在不同的荷载作用下的变刚度特性, 以及各类接头在不同受力条件下的刚度变化规律及影响因素, 并初步提出注浆式单榫接头抗弯刚度通用计算公式, 为同类接头的设计和研发提供参考。

**关键词:** 地铁车站; 预制装配式结构; 地下结构; 注浆式榫槽接头; 单榫接头; 接头抗弯刚度; 原型试验  
**中图分类号:** TU248.2 U451.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)03-0038-06

## Experimental research on flexural rigidity of grouted single mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures

Yang Xiuren<sup>1,2</sup> Lin Fang<sup>1,2</sup> Huang Meiqun<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China;  
2. National Engineering Lab for Green & Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The flexural rigidity of grouted single mortise-tenon joints used in prefabricated metro station structures is analyzed on the basis of the prototype experiments on a 1:1 scale model loaded in the key working direction. The  $M-\theta$  relationship curves of the joints under various conditions are obtained and the empirical formula for the joint flexural rigidity is established by using the fitting and differentiation method. Relationship curves of flexural rigidity and bending moment under different axial forces, grouting ranges and joint lengths are discussed. The results show that the joint shows the characteristic of variable rigidity under different loads. Change laws of flexural rigidity and the influence factors of different kinds of joints under different loading conditions are illustrated. The general calculation formulas for calculating the flexural rigidity of single mortise-tenon joint are proposed, which can provide reference for the design and research of similar joints.

**Keywords:** metro station; prefabricated structure; underground structure; grouted mortise-tenon joint; single-tenon joint; joint flexural rigidity; prototype test

**E-mail:** yangxr@bjucd.com

### 引 言

长春地铁 2 号线在国内首次研究并应用预制装配技术建造了多座明挖地铁车站, 其主体结构是由 7 块环宽 2m 的预制构件拼装而成的单拱大跨装配式结构, 装配式结构断面示意图 1, 构件之

间的环向和纵向连接采用新型的注浆式榫槽接头<sup>[1]</sup>。

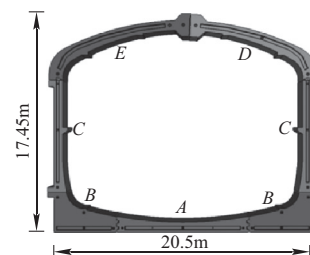


图 1 装配式结构断面示意

Fig. 1 Diagram of prefabricated structure section

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201104)

作者简介: 杨秀仁, 学士, 教授级高级工程师

收稿日期: 2019-11-04

接头不仅打断了整体混凝土结构的连续性，而且结构在接头部位的刚度发生了变化，必然会对整体结构的内力分布产生重要影响<sup>[2-3]</sup>，这种影响的大小，与接头的抗弯刚度( $k_\theta$ )的大小和变化特征密切相关。抗弯刚度反映接头抵抗弯矩作用的能力，是进行结构内力分析的关键技术参数，了解和掌握接头刚度特性对于研究预制装配式结构的力学行为和结构整体稳定性具有重要意义。

目前对装配式地下结构接头的研究，主要集中在传统圆形盾构隧道管片接头方面，工程应用中大多根据经验将接头刚度确定为某一定值并建立简化接头模型<sup>[4-7]</sup>，而有关文献曾指出接头刚度可能并非

常数，上述简化带来的误差不能忽视<sup>[8-9]</sup>。

另外，长春地铁装配式车站结构所采用的注浆式单榫接头有两种形式，一种是单榫长接头，榫头长 195mm；另一种是单榫短接头，榫头长 95mm，接头构造见图 2，接头构造与盾构隧道的不注浆平接头或不注浆浅凹凸榫接头等也有较大差异；同时，装配式车站结构建造过程中轴力和弯矩随不同工况不断变化，接头的刚度也随之变化，与盾构隧道单一工况在承载特性方面差别较大，因此无法直接运用以往盾构隧道的研究或应用成果，有必要通过试验对注浆式榫槽接头的抗弯刚度特性进行全面研究。

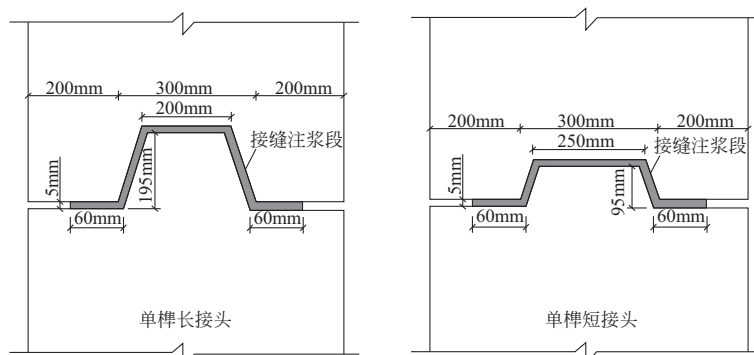


图 2 单榫长接头和短接头构造示意

Fig. 2 Details of grouted single mortise-tenon joint with long-tenon and short-tenon

## 1 试验内容

### 1.1 试验工况和加载方式

本研究针对单榫接头进行了不同榫头长度、不同注浆材料、不同注浆范围以及不同受力条件共计

26 组试验，试验工况和加载方式见表 1<sup>[10]</sup>。试件沿关键受力方向(装配式结构横截面受弯方向)为 1:1 原型足尺，截面高度 700mm；试件宽度沿车站结构纵向截取 800mm，接头试件混凝土强度等级(C50)及配筋同实际工程。

表 1 试验工况和加载方式

Table 1 Experimental cases and layout

工况	轴力工况: 2000kN、1600kN、 1000kN、500kN	榫头长度 195mm(长榫头)、95mm(短榫头)
		注浆范围 a(仅榫头榫槽范围)、b(榫头榫槽外扩 60mm)、c(榫头榫槽外扩 100mm)
		注浆材料 纯环氧树脂浆液、改性环氧树脂浆液、改性水泥基浆液、不注浆
加载方式	<p>轴向力 <math>N</math> 和横向集中力 <math>F_M</math> 分别加载，可自由组合出不同轴力和弯矩作用下的接头受力状态 单位(mm)</p>	

### 1.2 接头接缝张开量测量及转角计算方法

试验通过测量接缝边缘张开量来计算相邻构件的接头相对转角( $\theta$ )。图 3 为接头张开量测量方法及转角

计算简图， $W_a$  和  $W_b$  分别为接头受压侧和受拉侧张开量，通过试件顶面及两侧面所布设的拉绳式位移传感器和顶杆式位移传感器测量，转角  $\theta$  计算公式如下：

$$\begin{cases} W_a \times X_b = W_b \times X_a \\ \sin \frac{\theta}{2} = \frac{W_b}{2X_b} \\ X_a + X_b = 0.7 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\theta$ 为接头转角(rad)； $W_a$ 、 $W_b$ 分别为接头受压侧和受拉侧张开量(m)； $X_a$ 、 $X_b$ 分别为接头虚拟转动轴到受压侧和受拉侧的距离(m)。

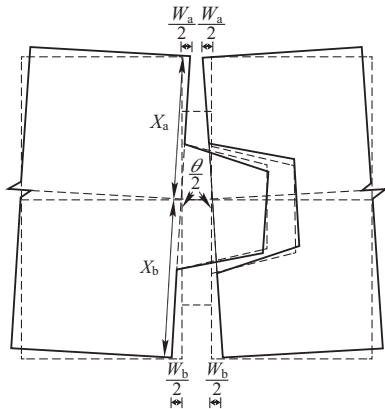


图3 接头张开量测量方法及转角计算简图示意  
Fig. 3 Measurement method and calculation model for rotation angle of joints

## 2 接头抗弯刚度经验公式

接头抗弯刚度( $k_\theta$ )是指接头发生单位转角的作用弯矩。针对试验数据计算出转角 $\theta$ ，作出各工况下单榀接头承载 $M-\theta$ 曲线。以实际工程应用的接头参数为例，单榀长接头、灌注改性环氧、注浆范围 $b$ ，在轴力1600kN和500kN作用下描绘的 $M-\theta$ 曲线见图4。从

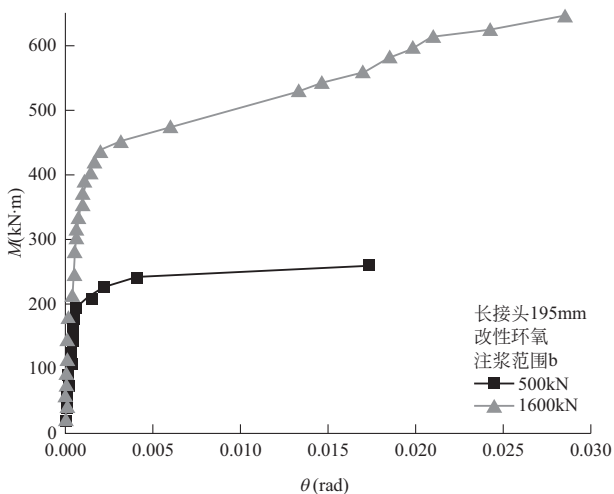


图4 不同轴力工况下单榀长接头 $M-\theta$ 曲线示意  
Fig. 4  $M-\theta$  relationship curves for long joint with single-tenon under different axial forces

给出的 $M-\theta$ 曲线及其他各工况下接头的 $M-\theta$ 曲线形态<sup>[11]</sup>可以看出，接头的抗弯刚度并非如常规盾构隧道工程惯用的接头刚度为定值，而是呈现在整个加载过程中不断变化的状态，而且受轴力和弯矩的大小、注浆范围、榫头长度等参数的影响。

下面以图4轴力1600kN工况试验曲线为例，介绍抗弯刚度曲线的拟合过程及所得到的抗弯刚度经验公式。

如图5所示， $M-\theta$ 曲线经历了线性→类线性→非线性→失稳破坏四个阶段<sup>[11]</sup>，结合曲线特征，将曲线划分为两段分别拟合，即承载阶段(线性段+类线性段+非线性段)，以及失稳破坏段。对 $M-\theta$ 曲线进行拟合后，再通过微分得到接头的抗弯刚度表达式。

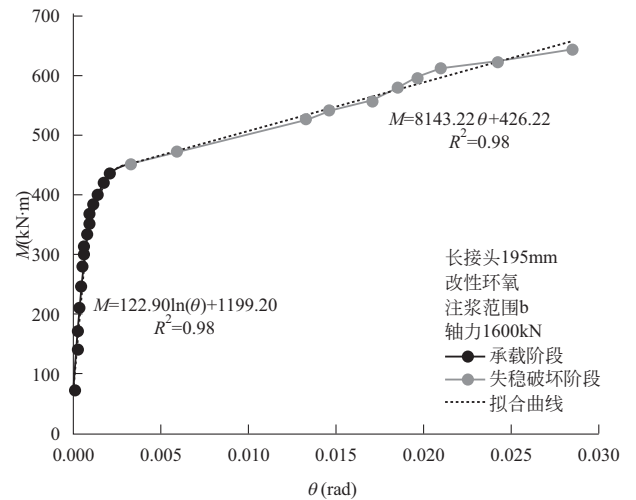


图5 单榀长接头 $M-\theta$ 曲线拟合情况示意  
Fig. 5 Fitting formula of  $M-\theta$  relationship curve for long joint with single-tenon

由曲线型式判断，承载阶段的线型符合对数函数型式，失稳破坏阶段的线型符合线性函数型式，由此， $M$ 与 $\theta$ 的关系可以表示为：

$$M = \begin{cases} A_1 \ln \theta + B_1 & (\text{承载阶段}) \\ A_2 \theta + B_2 & (\text{失稳破坏阶段}) \end{cases} \quad (2)$$

根据试验曲线，通过式(2)两段函数拟合，得到 $A$ 和 $B$ 两个特征常量，即可得出拟合的 $M-\theta$ 曲线两段表达式：

$$M = \begin{cases} 122.90 \ln \theta + 1199.20 & (M \leq 440 \text{ kN} \cdot \text{m}) \\ 8143.2 \cdot \theta + 426.22 & (M > 440 \text{ kN} \cdot \text{m}) \end{cases} \quad (3)$$

由图可以看出，拟合曲线与试验曲线的相关度高达0.98。

结合上式求得特定工况下试验接头的转角刚度

经验公式为：

$$k_{\theta} = \frac{dM}{d\theta} = \begin{cases} 122.90e^{\frac{1199.20-M}{122.90}} & (M \leq 440\text{kN} \cdot \text{m}) \\ 8143.2 & (M > 440\text{kN} \cdot \text{m}) \end{cases} \quad (4)$$

上式即为单榫长接头试件，在灌注改性环氧浆液、注浆范围 b、1600kN 轴力工况下的抗弯刚度的经验公式。采用此方法对注浆式单榫接头的其他各组试验数据进行拟合，拟合后的相关度也都在 0.9 以上。

### 3 抗弯刚度的变化规律及影响因素分析

为研究各类接头在不同受力条件下的刚度变化规律及影响因素，利用上述方法得出的不同轴力作用下、不同注浆范围、不同榫头长度等工况下的接头刚度和弯矩的关系曲线进行了描绘。

(1) 图 6 是其中某一类接头轴力-弯矩-抗弯刚度三因素关系三维图，其组合面是一个曲面形式，各因素之间非线性关系表明了接头的变刚度特性。

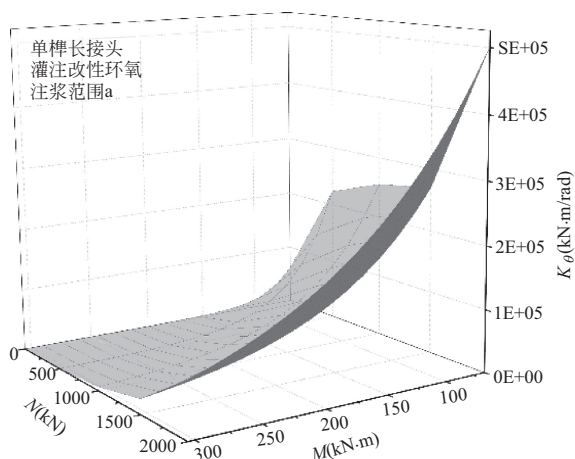


图 6 轴力-弯矩-抗弯刚度三因素关系三维图示意  
Fig. 6 Three-dimensional graph of relationship of axial force-bending moment-flexural rigidity

(2) 图 7(a)为不同轴力条件下的接头弯矩-抗弯刚度曲线组。轴力作用对注浆式榫槽接头抗弯刚度的影响最大，接头的抗弯刚度随轴力的增加而增大；在轴力保持不变的条件下，随弯矩的加大，接头的抗弯刚度逐渐减小，在接头软化阶段之后，接头呈现近似于“铰”的状态。

(3) 图 7(b)为不同注浆范围接头弯矩-抗弯刚度曲线组。接头注浆范围的大小对接头的抗弯刚度影响较大，注浆范围加大，意味着抗弯截面的高度加大，抗弯刚度呈非线性增加。因此，从充分利用构件截面的角度考虑，注浆范围宜尽量加大。

(4) 图 7(c)为不同榫头长度接头弯矩-抗弯刚度曲线组。单榫长接头和单榫短接头的比较，长接头的抗弯刚度整体上比短接头要大，其主要原因是由于长接头的嵌固抗弯作用提供的抗弯刚度。

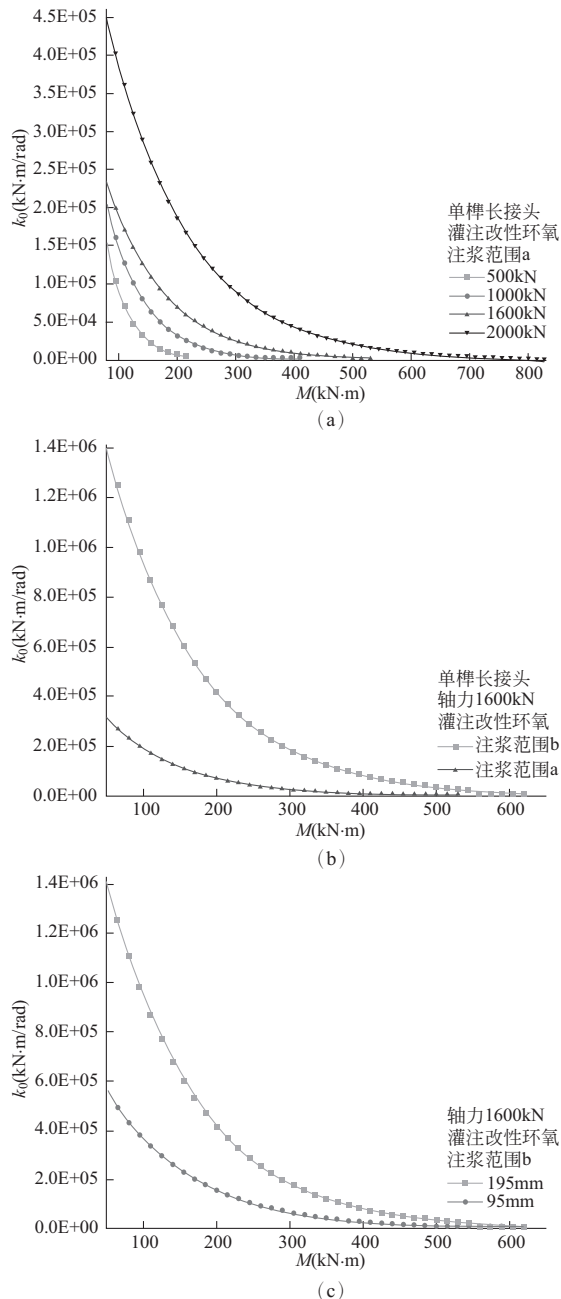


图 7 单榫接头不同影响因子抗弯刚度变化规律示意  
Fig. 7 Change laws of joint flexural rigidity for long joint with single-tenon with different influence factors

### 4 接头抗弯刚度通用计算公式

针对不同轴力和弯矩作用，抗弯刚度可利用经验公式计算(式(4))，并利用  $M-\theta$  曲线回归，研究轴

力因素对抗弯刚度曲线影响规律即可得出接头抗弯刚度通用计算公式如下:

$$k_{\theta} = Ae^{\frac{B-M}{A}} \quad (5)$$

针对实际工程应用的注浆范围  $b$  的单榀长接头, 结合轴力对抗弯刚度曲线参数值 ( $A$  和  $B$ ) 影响规律 (见图 8), 得出了可用于实际工程计算的接头抗弯刚度通用计算公式如下:

单榀长接头:

$$k_{\theta} = Ae^{\frac{B-M}{A}}, \begin{cases} A = 0.0629N + 22.28 \\ B = 0.5728N + 282.68 \end{cases} \quad (6)$$

单榀短接头:

$$k_{\theta} = Ae^{\frac{B-M}{A}}, \begin{cases} A = 0.0729N + 2.6467 \\ B = 0.4716N + 302.81 \end{cases} \quad (7)$$

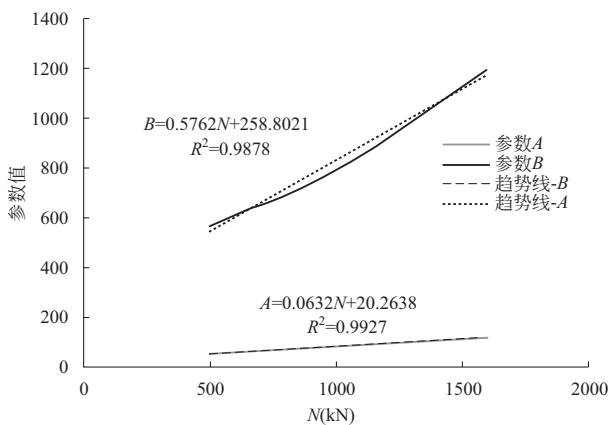


图 8 单榀长接头  $A$  和  $B$  参数与轴力关系曲线示意

Fig. 8 Relationship curve of parameter  $A$  &  $B$  and axial force for long joint with single-tenon

## 5 结 论

本文利用各类型注浆式单榀接头偏心受压状态下试验研究数据, 借助对  $M-\theta$  曲线和承载特征的分析, 揭示了注浆式单榀接头抗弯刚度特性的基本规律, 得到的主要结论如下:

(1) 研究揭示了在偏心受压状态下注浆式单榀接头典型的“变刚度特性”; 轴力大小是对接头抗弯刚度影响最大的关键因素, 轴力越大接头刚度越大; 在同一轴力作用下, 随弯矩的增加, 接头的抗弯刚度呈不断降低趋势。

(2) 由轴力对接头接触面压紧作用而产生的“抵抗矩”大致对应于承载曲线线性段末端的弯矩, 弯矩作用超过抵抗矩之后曲线进入非线性段, 接头变形加大, 刚度快速降低, 接头软化后呈现近似

“铰”的状态。

(3) 接缝注浆范围大小对接头抗弯刚度有较大影响。不注浆接头的抗弯刚度远小于注浆接头, 注浆范围的加大可加大抗弯截面高度, 显著提高接头抗弯刚度。实际工程宜尽量加大接头注浆范围。

(4) 单榀短接头抗弯刚度比长接头小, 承载曲线明显缺失非线性发展段, 呈现突然失稳破坏特征, 实际工程中不宜用于承受弯矩作用明显的部位。

(5) 给出了试验接头抗弯刚度的通用计算公式, 可用于实际工程接头刚度的计算。

## 参 考 文 献

- [1] 杨秀仁, 黄美群. 地铁车站预制装配新技术研究策略 [J]. 都市轨道交通, 2018, 31(1): 78-85 (Yang Xiuren, Huang Meiqun. Research strategies on new prefabricated technology of underground subway station [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(1): 78-85 (in Chinese))
- [2] Yang X, Shi Z, Lin F. Influence of geometrical parameters on performance of grouted mortise and tenon joints for application in prefabricated underground structures [J]. Advances in Civil Engineering. doi.org/10.1155/2019/3747982
- [3] Yang X, Huang M, Lin F. Research strategies on new prefabricated technology for underground metro stations [J]. Urban Rail Transit, 2019, 5(3): 145-154
- [4] 陈俊生, 莫海鸿. 盾构隧道管片接头抗弯刚度的三维数值计算 [J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 87-91 (Chen Junsheng, Mo Haiou. Three-dimensional fem analysis on flexural rigidity of segment joints in shield tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(4): 87-91 (in Chinese))
- [5] 钟小春, 朱伟, 郭涛, 等. 装配式管片接头受力平面有限元分析 [J]. 现代隧道技术, 2005, 42(6): 20-23 (Zhong Xiaochun, Zhu Wei, Guo Tao, et al. 2D finite element analysis on the behavior of joints of the segment lining of shield tunnels [J]. Modern Tunneling Technology, 2005, 42(6): 20-23 (in Chinese))
- [6] 曾东洋, 何川. 地铁盾构隧道管片接头抗弯刚度的数值计算 [J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(6): 744-748 (Zeng Dongyang, He Chuan. Numerical simulation of segment joint bending stiffness of metro shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(6): 744-748 (in Chinese))
- [7] 张厚美, 张正林, 王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4): 566-569 (Zhang Houmei, Zhang Zhenglin, Wang Jianhua. 3-D FEM analysis on prefabricated segment joints of shield tunnel [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(4): 566-569 (in Chinese))
- [8] 朱合华, 黄伯麒, 李晓军, 等. 盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2153-2160 (Zhu Hehua, Huang Boqi, Li Xiaojun, et al. Unified model for internal force and

- deformation of shield segment joints and experimental analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2153-2160 (in Chinese)
- [9] 吴全立, 王梦恕, 董新平. 盾构管片接头非线性转动刚度研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 109-114 (Wu Quanli, Wang Mengshu, Dong Xinping. Study on nonlinear rotational stiffness of shield segment joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 109-114 (in Chinese))
- [10] 杨秀仁, 黄美群, 林放, 等. 地铁站预制装配式结构注浆式榫槽接头试验方案研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 83-90 (Yang Xiuren, Huang Meiqun, Lin Fang, et al. Experimental method of grouted mortise-tenon joint for prefabricated metro station structure[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 83-90 (in Chinese))
- [11] 杨秀仁, 黄美群, 林放. 地铁站预制装配式结构注浆式榫槽接头弯曲抵抗作用特性研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 33-40 (Yang Xiuren, Huang Meiqun, Lin Fang. Research on bending resistance characteristics of grouted mortise-tenon joint for prefabricated metro station structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 33-40 (in Chinese))

杨秀仁(1964—), 男, 学士, 教授级高级工程师。主要从事城市轨道交通工程设计研究。

林放(1990—), 女, 博士, 工程师。主要从事城市轨道交通工程设计研究。

黄美群(1964—), 女, 学士, 教授级高级工程师。主要从事城市轨道交通工程设计研究。

(上接第 37 页)

- [10] 周颖, 张翠强, 吕西林. 振动台试验中地震动选择及输入顺序研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 32-37 (Zhou Ying, Zhang Cuiqiang, Lv Xilin. Method of ground motion selection and input in shaking table tests[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 32-37 (in Chinese))
- [11] 陆伟东. 基于 MATLAB 的地震模拟振动台试验的数据处理[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2011, 33(6): 1-4 (Lu Weidong. MATLAB-based data processing of shaking table test[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 33(6): 1-4 (in Chinese))
- [12] 张晋. 采用 MATLAB 进行振动台试验数据的处理[J]. 工业建筑, 2002, 32(2): 28-30, 65 (Zhang Jin. Using MATLAB to deal with data of the shaking table test[J]. Industrial Construction, 2002, 32(2): 28-30, 65 (in Chinese))

唐洋洋(1990—), 女, 博士研究生。主要从事结构抗震及防灾减灾研究。

李英民(1968—), 男, 博士, 教授。主要从事地震工程与工程抗震研究。

姜宝龙(1987—), 男, 博士研究生。主要从事结构抗震及防灾减灾研究。

姬淑艳(1967—), 女, 硕士, 副教授。主要从事工程抗震研究。

郑妮娜(1976—), 女, 博士, 副教授。主要从事工程抗震研究。