

# 地铁预制装配式车站结构榫槽式预应力接头抗剪性能研究<sup>\*</sup>

严佳佳<sup>1</sup> 臧延伟<sup>1</sup> 刘长宝<sup>1</sup> 章天杨<sup>1</sup> 王博川<sup>2</sup> 狄宏规<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 311122, 杭州;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海)

**摘 要** [目的]在沉井法预制装配式地铁车站下沉施工过程中,包络车站主体的链刀设备会对已拼合的装配式结构接缝产生较大的横向剪切作用。因此,需设计一种新型接头形式,并对其抗剪性能关键指标进行重点研究,以保障施工及运营阶段的安全性与耐久性。[方法]以长春地铁某预制装配式车站侧墙横向接头为研究对象,建立了新型榫槽式预应力接头的精细化数值模型,针对预应力钢绞线和预应力螺栓连接的榫槽接头构件进行了四点剪切试验,对接头构件的变形、混凝土的损伤规律进行了系统分析。[结果及结论]在剪力加载过程中,两种预应力接头均先表现为凹侧构件榫槽底部和斜向延伸的混凝土损伤,随后手孔位置出现应力集中现象和贯通构件的直线损伤。在接头连接件长度相同的工况下,当剪力增加到 1 100 kN 时,预应力螺栓接头最大位移小于 0.5 mm,相比预应力钢绞线接头表现出更强的抗剪刚度。接头连接件长度较短时未完全参与接头构件的整体抗剪受力或导致构件提前破坏。

**关键词** 地铁; 预制装配式车站结构; 榫槽式预应力接头; 抗剪性能

**中图分类号** U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.20230549

## Shear Performance of Mortise-and-Tenon Prestressed Joints in Prefabricated Metro Station Structures

YAN Jiajia<sup>1</sup>, ZANG Yanwei<sup>1</sup>, LIU Changbao<sup>1</sup>, ZHANG Tianyang<sup>1</sup>, WANG Bochuan<sup>2</sup>, DI Honggui<sup>2</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, 311122, Hangzhou, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] During the sinking construction process of prefabricated metro stations using the caisson method, the chain cutter equipment enclosing the station main structure imposes significant transverse shear forces on the assem-

bled structural joints. To ensure safety and durability during both construction and operational phases, it is necessary to design a new type of joints and conduct focused research on its critical shear performance indicators. [Method] Using the transverse joint in the side wall of a prefabricated metro station in Changchun City as the research subject, a refined numerical model for the new type of mortise-and-tenon prestressed joint is established. Four-point shear tests are conducted on the mortise-and-tenon joint components connected by prestressed steel strands and prestressed bolts. A systematic analysis is carried out on the deformation of the joint components and the damage patterns of the concrete. [Result & Conclusion] During shear loading, both types of prestressed joints initially exhibit concrete damage at mortise bottom and on diagonal propagation of concave-side component. Subsequently, stress concentration and linear damage through the component are observed at the hand hole locations. Under working conditions with equal joint connector lengths, when the shear force reaches 1 100 kN, the maximum displacement of prestressed bolt joint remains below 0.5 mm, indicating higher shear stiffness compared to the prestressed steel strand joint. When the joint connector length is relatively short, it would neither fully participate in the overall shear resistance of the joint component nor lead to premature failure of the component.

**Key words** metro; prefabricated station structure; mortise-and-tenon prestressed joint; shear performance

近年来,预制装配技术在我国地铁车站中的应用越来越广泛。截至 2021 年底,我国采用预制装配技术的已建和在建的地铁车站已达到 41 座<sup>[1]</sup>。目前,我国大部分预制装配式车站均采用明挖法施工。预制构件的装配作业在已开挖的基坑内部进行,但该工法存在弃土量大、作业空间狭小、支撑体系与构件装配相互干扰等问题。文献[2]提出了一

<sup>\*</sup> 沉井式装配地铁车站结构的接头性能及施工控制措施研究

种预制装配式地下建筑下沉施工装置,主要包括链刀驱动装置、链刀本体及吊架等。其施工工序为:在地面通过横纵向接头拼装预制构件,并将链刀设备包络于主体结构上;基于沉井法原理,通过链刀转动挖掘底部岩土使结构整体下沉,同时利用链刀自下而上的运动将渣土输送至地面。该技术尤其适用于软土地区预制装配式车站施工,具备无基坑、无支护、无降水的高效特点。沉井法预制装配式车站结构施工装置示意图如图 1 所示。

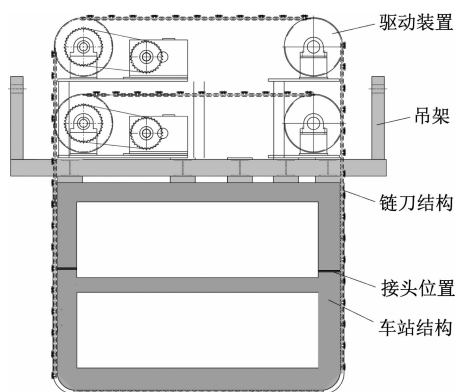


图 1 沉井法预制装配式车站结构施工装置示意图  
Fig. 1 Diagram of structural construction equipment for prefabricated stations by caisson method

受吊装设备高度和起吊质量的限制,沉井法预制装配式车站需要在结构侧墙设置相应的横向接头进行分段下沉施工。目前,国内外对于预制装配式地铁车站横向接头力学性能的研究主要采用模型试验、足尺试验和数值模拟等方法,已付诸实践的预制装配式地铁车站接头形式包括注浆樁槽式、灌浆套筒式、钢筋搭接+现浇混凝土等<sup>[3-9]</sup>。文献[10]通过足尺试验分析了樁头长度、注浆范围、轴力大小等参数对接头抗弯性能的影响,并提出将樁头裂缝贯通时的偏心距作为相应的评价指标。文献[11]采用有限元方法模拟了樁槽接头在不同轴力和剪切力加载作用下接触面摩擦力及剪切位移的变化规律。文献[12]进行了 1:2 的接头模型加载试验,分析了分别采用灌浆套筒和螺栓连接的樁槽接头在受弯作用下裂缝的张开量以及钢筋和混凝土的应力变化规律。文献[13]采用足尺试验研究了叠合装配式车站矩形框架结构不同位置的灌浆套筒连接节点(预制柱节点、预制侧墙节点、预制梁-板-柱中间节点)在横向振动作用下的力学性能。文献[14]制作了 CHC(C 型钢+H 型钢+C 型钢)型钢-混凝土组合接头模型并对其进行抗弯加载试

验,通过有限元模拟了预制装配式车站施工和服役等不同工况下接头的位移及混凝土应变规律。

目前既有预制装配式地铁车站结构接头研究大多以明挖法为主,且集中于接头抗弯承载力与抗震性能,而对接头抗剪性能的相关研究仍比较缺乏。沉井法预制装配式车站下沉施工过程中包络车站主体的链刀设备会对已拼合预制结构的接缝位置产生较大的横向剪切作用,接头位置亦需要足够的接触面应力以获得较好的抗水压性能。因此,本文提出一种新型预应力接头以满足沉井法预制装配式车站更严格的接头结构性能要求。

本文以沉井法预制装配式车站结构侧墙横向接头为研究对象,基于长春地铁某装配式车站采用的接头樁槽尺寸<sup>[15]</sup>,分别采用预应力钢绞线和预应力螺栓两种连接方式,通过有限元软件对接头四点剪切试验进行精确模拟,对接头的受力及变形特征进行分析,比较两种预应力连接件的抗剪性能并分析其抗剪刚度的变化规律,以期类似接头的设计提供参考。

## 1 预应力接头构件有限元模型

沉井法预制装配式车站结构侧墙实际厚度为 0.7 m,为简化计算,接头构件沿车站纵向截取 0.8 m,因此确定接头试件尺寸为 2 700 mm × 700 mm × 800 mm。其中,樁头长度和深度均为 200 mm,樁头宽度为 300 mm,且不考虑接缝间注浆的影响。此外,预应力螺栓手孔与预应力钢绞线锚固端需占用一定空间,因此接头构件的纵向受力钢筋需被内移约 100 mm。以接头连接件长度为 400 mm 的工况为例,预应力接头构件有限元模型示意图如图 2 所示。

### 1.1 物理模型

混凝土材料取与实际工况相同的 C50 等级,混凝土本构关系采用 ABAQUS 软件中的 CDP(混凝土塑性损伤)模型<sup>[16-17]</sup>。混凝土结构在弹性阶段遵循线弹性模型的描述方式。在混凝土结构进入损伤阶段后,其弹性模量  $E_{\text{hnt}}$  的关系式变为:

$$E_{\text{hnt}} = (1 - d)E_{\text{hnt},0} \quad (1)$$

式中:

$E_{\text{hnt},0}$ ——混凝土的初始弹性模量;

$d$ ——混凝土拉伸或压缩时的塑性损伤因子,其中  $d_c$  表示受压损伤因子,  $d_t$  表示受拉损伤因子,  $d$  的取值范围为 0 ~ 1, 0 表示材料未出现塑性损伤, 1

表示材料强度完全丧失。

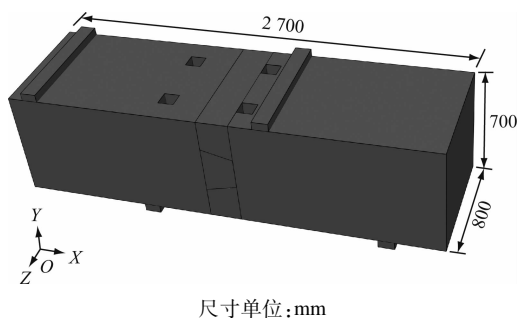


图 2 预应力接头构件有限元模型示意图

Fig. 2 Diagram of prestressed joint component finite element model

表 1 C50 混凝土塑性损伤模型主要力学性能参数取值

Tab. 1 Value of main mechanical performance parameters of C50 concrete plastic damage model

密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	弹性模量/ MPa	泊松比	膨胀角/ ( $^\circ$ )	偏心率	双轴与单轴 抗压强度比	不变量应力比	黏性参数
2 500	34 500	0.2	38	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

## 1.2 加载方式与边界条件

预应力接头构件抗剪试验采取四点剪切的加载方式<sup>[18]</sup>。在此试验中,樨头根部所在的截面为纯剪切截面。预应力接头构件四点剪切试验示意图如图 3 所示。预应力接头构件有限模型简化了接头构件顶部的钢垫板,而直接通过对垫块逐级加载模拟接头逐渐受到的剪切作用。接头凹凸侧构件下侧支撑点分别设置 1 块垫块,在接缝正上方加载竖向力  $F$  时,约束一侧垫块下方表面  $Y$ 、 $Z$  方向的位移,同时约束另一垫块下方表面  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的位移。预应力接头构件接缝部位承受的剪力  $Q$  为  $0.467F$ 。

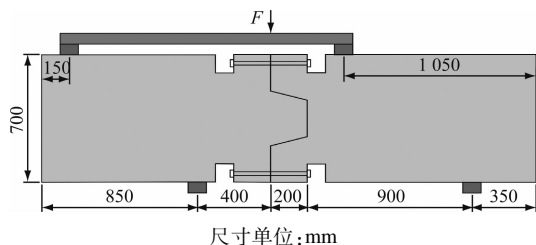


图 3 预应力接头构件四点剪切试验示意图

Fig. 3 Diagram of four-point shear test for prestressed joint components

1) 预应力钢绞线采取降温法施加预应力,即在分析步中降低材料温度使其收缩,从而达到对其施加预应力的效果。预应力钢绞线降温值  $\Delta T$  为:

C50 混凝土塑性损伤模型主要力学性能参数取值见表 1。

钢筋(包括受力钢筋和箍筋)采用弹塑性硬化模型,型号为 HRB400;预应力钢绞线选用 7 股  $\phi 15.2 \text{ mm}$  型号,线膨胀系数为  $1.0 \times 10^{-5}$ ,截面积为  $140 \text{ mm}^2$ 。预应力高强螺栓采用理想弹塑性本构模型,不考虑钢材料达到极限强度后的下降段,简化为双折线本构模型。本文采用的 8.8 级 M16 高强螺栓屈服强度为 640 MPa,极限抗拉强度为 800 MPa。垫块为线弹性模型,考虑其刚性体的约束特征,将其弹性模量放大 10 倍,泊松比保持不变,即取弹性模量为  $2.0 \times 10^6 \text{ MPa}$ ,泊松比取 0.3。

$$\Delta T = N / (E_{\text{gix}} A \alpha) = \sigma / (E_{\text{gix}} \alpha) \quad (2)$$

式中:

$E_{\text{gix}}$ ——弹性模量;

$\alpha$ ——线膨胀系数;

$\sigma$ ——应力;

$A$ ——截面积;

$N$ ——法向力。

2) 高强螺栓的预应力通过 ABAQUS 软件的螺栓载荷功能实现,其中螺栓预紧力施加在螺栓中部。高强螺栓的预应力  $F_s$  为:

$$F_s = C_s \sigma_s A_s \quad (3)$$

式中:

$C_s$ ——安全系数,一般取 0.5 ~ 0.6,本文取 0.5;

$\sigma_s$ ——螺栓材料屈服极限强度;

$A_s$ ——螺栓公称应力截面积。

混凝土间的摩擦因数取 0.5,混凝土与螺母接触部位间的摩擦因数取 0.3。垫块与接头构件之间、预应力螺栓与预埋钢管之间均采用绑定约束,钢筋和预应力钢绞线采取 Embedded 嵌入约束。以预应力螺栓接头试件为例,有限元模型内部透视图如图 4 所示。其中,预应力钢绞线接头构件的钢绞线布设位置与预应力螺栓接头构件相同。

## 1.3 接头加载工况

为研究在相同加载条件下不同预应力形式接



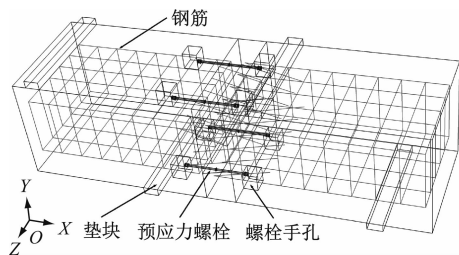


图4 预应力螺栓接头构件内部透视图

Fig. 4 Perspective diagram of the internal structure of a prestressed bolt joint component

头构件的抗剪性能,在符合工程实际的同时尽量使两种材料的直径或截面积相近。选择两种长度的接头并对其施加相同的有效预应力,接头构件两端轴力统一设置为0。不同预应力形式的接头构件加载工况见表2。

表2 不同预应力形式的接头构件加载工况

Tab. 2 Joint component load-applying working condition under different prestressed types

接头形式	有效预应力/ MPa	连接件直径/ mm	连接件长度/ mm
无预应力	0		
预应力螺栓	320	16.0	400
	320	16.0	200
预应力钢绞线	320	15.2	400
	320	15.2	2 700

## 2 数值模拟结果分析

由于混凝土受拉能力弱,拉裂破坏往往最先发生,因此,提取接头构件的接缝(加载)位置的水平、竖向位移和混凝土受拉塑性损伤因子 $d_t$ 的相关计

算结果进行分析。此外,对两种型式接头进行四点剪切加载前均施加了约320 MPa的有效预应力。

### 2.1 接头混凝土损伤规律

以连接件长度400 mm的接头工况为例,剪力作用下接头构件混凝土受拉损伤发展范围云图如图5所示。由图5可见:

1) 当剪力开始加载后,凹侧构件的榫槽底部和斜向60°处首先出现混凝土受拉损伤,随后手孔位置出现应力集中现象和贯通构件的直线损伤,进而混凝土损伤范围迅速扩展直至接头构件完全失稳破坏。其中,预应力钢绞线接头沿手孔贯通构件的直线损伤首先在凹侧构件的下部手孔处出现,而预应力螺栓接头凸侧构件上部手孔位置的直线损伤则率先发展,可以看出手孔的设置导致了接头构件截面的削弱,需要采取一定措施以避免预应力接头的承载性能无法充分发挥。

2) 此外,剪力800 kN工况下两类接头连接件混凝土受拉塑性损伤因子 $d_t$ 均为0.95左右,但预应力螺栓接头仅出现榫槽底部的斜向混凝土损伤;当剪力增加到1 000 kN时,预应力钢绞线接头的 $d_t$ 最大值已经超过0.99,且受拉损伤范围已在接缝附近迅速扩展;而剪力1 200 kN工况下预应力螺栓接头的混凝土受拉损伤范围仍局限于榫槽底部和手孔附近。可以看出,采用预应力螺栓接头的混凝土受拉损伤发展速度显著小于后者,表现出相对更佳的抗剪性能。

### 2.2 接头连接件内部应力

接头连接件内部应力随剪力的发展规律如图6

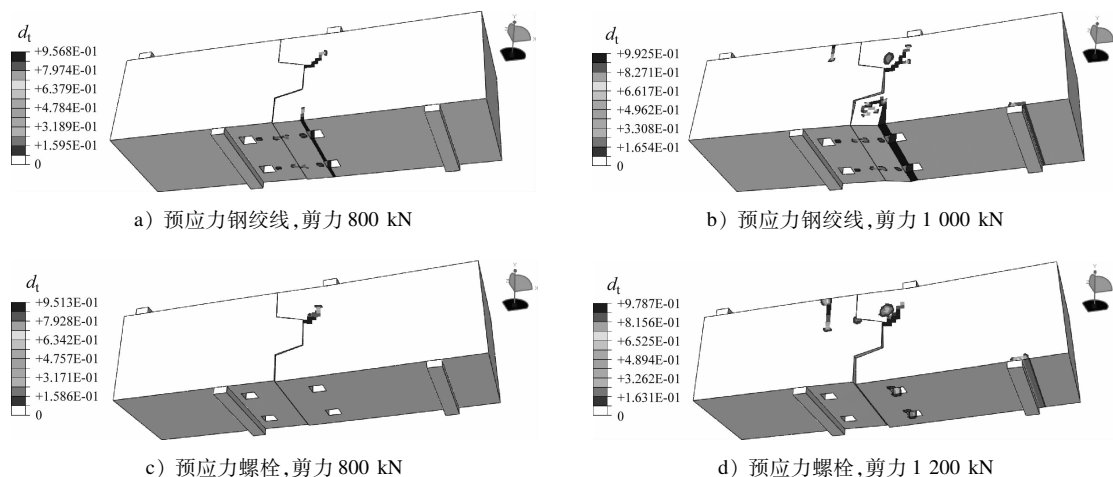


图5 剪力作用下接头构件混凝土受拉损伤发展范围云图

Fig. 5 Nephogram of concrete tensile damage development range in joint components under the shear force action

所示。由图6可见:接头连接件内部应力随剪力的发展可分为两阶段。当剪力较小时,接头构件接缝位置紧密贴合,此时钢筋混凝土承受初始的剪力,接头连接件内部应力保持不变;当剪力增加到400 kN时,接缝位置逐渐出现错位量,此时预应力连接件开始参与接头整体的抗剪受力,除螺栓长度200 mm工况外接头连接件的内部应力均随着剪力的增加逐渐增加。

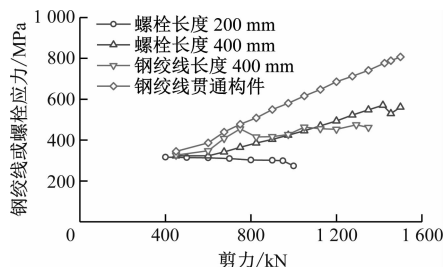


图6 接头连接件内部应力随剪力的发展规律

Fig. 6 Development law of internal stress in joint connection components with the shear force

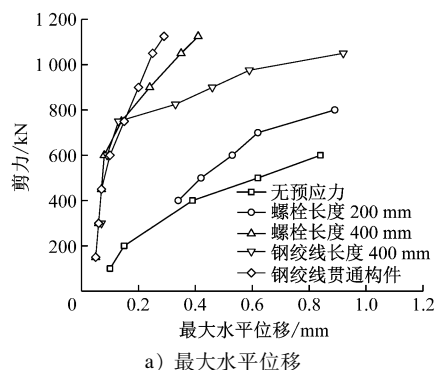
在钢绞线长度为400 mm工况下,当剪力达到750 kN时钢绞线应力达到峰值;随后构件下部锚固端的手孔位置出现应力集中且沿手孔的混凝土损伤贯通整个构件(见图5 a)),此时预应力钢绞线的应力由于锚固端的混凝土损伤而发生突变;最后接头构件无法承受更大的剪力而进入塑性变形阶段,钢绞线应力基本不再增加并趋于稳定。对于相同长度的螺栓接头工况,当剪力继续增加到1400 kN后,螺栓应力发生突变,相较于钢绞线接头,其应力突变值增大约550 kN。

针对螺栓长度为200 mm的工况,随着剪力的增加,螺栓应力反而呈减小趋势。这表明预应力螺栓由于长度较短未能参与接头构件整体抗剪受力,无法充分发挥其承载性能。

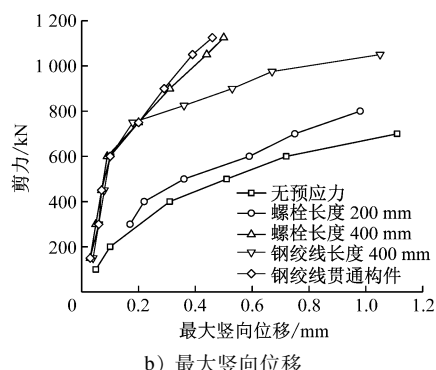
### 2.3 接头构件位移

图7为接头构件位移随剪力的变化曲线。由图7可知:接头构件最大水平位移和竖向位移均随着剪力的增加而增加。以钢绞线长度为400 mm的接头工况为例,当剪力小于600 kN时,剪力-位移关系基本符合线性关系,此时接头构件的最大水平位移和竖向位移均小于0.1 mm,且每100 kN剪力引起的位移变化速率均小于0.013 mm;当剪力增加到800 kN时,由于手孔位置的混凝土损伤已贯通结构并进入塑性变形阶段,接头构件的最大水平位移和竖向位移发展速率明显加快,此时接头构件剪力-位移关系仍基本为线性,每100 kN剪力引起的最大水平位移和最大竖向位移变化速率分别为0.204 mm

和0.218 mm,呈现出明显的变刚度特性;当剪力大于1000 kN后,接头构件混凝土损伤范围已迅速扩展并逐渐失稳破坏。



a) 最大水平位移



b) 最大竖向位移

图7 接头构件位移随剪力的发展规律

Fig. 7 Development law of displacement of joint components with the shear force

对于钢绞线贯通接头与螺栓长度为400 mm的接头试件工况,剪力小于1200 kN时的剪力-位移曲线基本遵循对数函数规律;剪力大于600 kN后接头构件位移变化速率在本试验加载全程均未发生明显的突变,每100 kN剪力引起的位移变化速率均小于0.080 mm。由此表明,与相同长度的钢绞线接头构件相比,螺栓接头构件具有更好的抗剪刚度。

对于螺栓长度为200 mm的工况,预应力螺栓未完全参与结构整体抗剪受力,导致构件剪力-位移曲线与无预应力工况曲线相似且位移发展速率较快。因此,在接头设计中需明确连接件参与结构承载的临界长度,以避免结构过早破坏。

## 3 结论

1) 随着剪力的逐渐施加,两种预应力接头均先表现为凹侧构件榫槽底部和斜向延伸的混凝土受拉损伤,随后手孔位置出现应力集中现象和贯通构件的直线损伤,进而受拉损伤范围迅速扩展直至接头完全失稳破坏。因此需及时浇筑浆料填充手孔,以避免预应力接头的抗剪性能无法充分发挥。

2) 在施加相同有效预应力 320 MPa, 相同接头连接件长度 400 mm 的条件下, 手孔在应力集中破坏前预应力钢绞线与预应力螺栓对接头的抗剪性能提升幅度相近, 且具有显著的变刚度特性; 预应力螺栓相较于预应力钢绞线具有更大的抗剪截面积, 在 1 100 kN 的剪力加载下, 预应力螺栓接头最大位移仍小于 0.5 mm, 表现出更强的抗剪刚度。

3) 预应力螺栓长度 (200 mm) 较短时, 由于未完全参与接头整体抗剪受力, 导致接头构件位移发展速率较快。因此, 在接头构件设计中需明确接头连接件参与结构抗剪的临界长度, 避免接头结构未达到设计承载性能而过早破坏。

## 参考文献

- [1] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1849.  
YANG Xiuren. Development status of and outlook for construction technology for prefabricated metro stations in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1849.
- [2] 臧延伟, 章天杨, 闫自海, 等. 用于装配式地下建筑物的下沉施工装置: 202122535289.5[P]. 2023-01-03.  
ZANG Yanwei, ZHANG Tianyang, YAN Zihai, et al. Caisson method construction equipment for prefabricated underground architecture: 202122535289.5[P]. 2023-01-03.
- [3] 张喻捷. 套筒连接装配式地铁车站结构三维抗震性能评价方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.  
ZHANG Yujie. Research on evaluation methodology of three dimensional seismic performance of fabricated subway station structure connected by sleeve[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [4] 杨秀仁, 黄美群, 林放. 地铁车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.  
YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang. Research on bending resistance characteristics of grouted mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 33.
- [5] LIU T, LU J, WANG D, et al. 3D nonlinear finite element modelling of mechanical behavior of a new wall-beam-strut joint for prefabricated underground construction and validation against experimental testing[J]. Structures, 2021, 33: 3202.
- [6] 叶亮, 丁先立, 项宝, 等. 装配式地下车站 CHC 型钢-混凝土组合接头受弯性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 120.  
YE Liang, DING Xianli, XIANG Bao, et al. Bending performance of CHC steel-concrete combined joint in underground prefabricated metro station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 120.
- [7] TAO L, DING P, YANG X, et al. Comparative study of the seismic performance of prefabricated and cast-in-place subway station structures by shaking table test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 105: 103583.
- [8] 张学龙, 高向宇, 杨秀仁, 等. 装配式地铁车站结构榫槽接头压弯性能研究[J]. 特种结构, 2018, 35(5): 73.  
ZHANG Xuelong, GAO Xiangyu, YANG Xiuren, et al. Mechanical performance of tongue and groove joints in assembled metro stations[J]. Special Structures, 2018, 35(5): 73.
- [9] 段壮. 装配式地铁车站榫槽节点环氧增韧材料力学试验与施工过程模拟[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
DUAN Zhuang. Mechanical test of reinforced epoxy for tenon groove joints and construction process simulation of prefabricated metro station[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [10] 苏会锋, 李习伟, 王臣. 全装配式地铁车站结构接头抗弯承载能力试验研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(9): 118.  
SU Huifeng, LI Xiwei, WANG Chen. Experimental study on flexural capacity of joints of structure of metro station with prefabricated concrete structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(9): 118.
- [11] 许学昭, 李兆平, 朱云超, 等. 装配式地铁车站结构榫槽式接头抗剪性能研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 141.  
XU Xuezhao, LI Zhaoping, ZHU Yunchao, et al. Study on shear property of tenon groove joint of prefabricated subway station[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 141.
- [12] 陈翔宇. 装配式地下车站结构力学性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
CHEN Xiangyu. Experimental study on mechanical properties of assembled underground station structures[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [13] LIU H, XU C, DU X. Seismic response analysis of assembled monolithic subway station in the transverse direction[J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110970.
- [14] 潘贤明, 吴居洋, 王书鹏. 新型装配式地铁车站缩尺模型静载试验研究[J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20(3): 5.  
PAN Xianming, WU Juyang, WANG Shupeng. Scaled model static load test of a new prefabricated subway station structure[J]. Traffic Engineering and Technology for National, 2022, 20(3): 5.
- [15] 李兆平, 王臣, 苏会锋, 等. 预制装配式地铁车站结构榫槽式接头力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 7.  
LI Zhaoping, WANG Chen, SU Huifeng, et al. Mechanical property of tenon-groove joints for metro station constructed by prefabricated structure[J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 7.
- [16] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [17] 秦浩, 赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 27.  
QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model[J]. Structural Engineers, 2013, 29(6): 27.

(下转第 75 页)

- [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(S2): 83.
- [6] 柳献, 张雨蒙, 王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨[J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 118.  
LIU Xian, ZHANG Yumeng, WANG Rulu. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(5): 118.
- [7] 柳献, 唐敏, 鲁亮, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2300.  
LIU Xian, TANG Min, LU Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2300.
- [8] 柳献, 张浩立, 唐敏, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 半环加固法[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 131.  
LIU Xian, ZHANG Haoli, TANG Min, et al. Experimental study of the ultimate bearing capacity of a shield tunnel reinforced by a semi-ring steel plate[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(3): 131.
- [9] LIU X, JIANG Z, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(6): 685.
- [10] 任天宇, 刘树亚, 柳献. 波纹钢板加固盾构隧道衬砌管片抗弯性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 317.  
REN Tianyu, LIU Shuya, LIU Xian. Experimental study of bending capacity of shield tunnel lining segment strengthened by corrugated steel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 317.
- [11] LIU X, JIANG Z, ZHANG L. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded filament wound profiles[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(10): 1268.
- [12] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 78.  
LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(5): 78.
- [13] 陈仁朋, 鲁立, 张阳, 等. 盾构管片 UHPC 加固技术及力学性能分析[J]. 工程力学, 2019, 36(11): 41.  
CHEN Renpeng, LU Li, ZHANG Yang, et al. Reinforced technology and mechanical properties of shield tunnel lining with UHPC[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 41.
- [14] 柳献, 张蛟龙, 蒋子捷, 等. UHPC 加固盾构隧道衬砌结构试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 181.  
LIU Xian, ZHANG Jiaolong, JIANG Zijie, et al. Experimental investigations of a segmental tunnel ring strengthened by using UHPC[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 181.
- [15] 成煜, 谢剑, 于敬海. 二次受力下 UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2295.  
CHENG Yu, XIE Jian, YU Jinghai. Experimental study on axial compressive behavior of RC columns strengthened by UHPC under secondary load[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2295.
- [16] 柳献, 蒋子捷, 刘树亚. 钢板-混凝土组合结构加固盾构隧道衬砌结构极限承载力足尺试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 128.  
LIU Xian, JIANG Zijie, LIU Shuya. Experiment of deformed shield tunnels strengthened by steel plate-concrete composite structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 128.
- [17] ZHANG J L, LIU X, REN T Y, et al. Structural behavior of reinforced concrete segments of tunnel linings strengthened by a steel-concrete composite[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 178: 107444.
- [18] LIU X, JIANG Z, MANG H A. Experimental investigation of the bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by a special composite structure[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2023, 19(2): 147.
- [19] JIANG Y, WANG X, LI B, et al. Estimation of reinforcing effects of FRP-PCM method on degraded tunnel linings[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(3): 327.
- [20] 柳献, 张晨光, 张宸, 等. FRP 加固盾构隧道纵缝接头试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 316.  
LIU Xian, ZHANG Chenguang, ZHANG Chen, et al. Experimental study on the longitudinal joint in shield tunnel reinforced with FRP material[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 316.
- 收稿日期:2023-05-16 修回日期:2023-06-14 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-05-16 Revised:2023-06-14 Published:2025-06-10
- 第一作者:王金龙,正高级工程师,003180@crfsdi.com  
通信作者:柳献,教授,xian.liu@tongji.edu.cn
- ©《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 66 页)

- [18] 胡少伟, 胡亮. 两种不同加载方法下的混凝土剪切断裂过程对比研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 25.  
HU Shaowei, HU Liang. Comparative study on shear fracture process of concrete with two different loading methods[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 25.

- 收稿日期:2023-05-15 修回日期:2023-07-11 出版日期:2025-06-10  
Received:2023-05-15 Revised:2023-07-11 Published:2025-06-10
- 第一作者:严佳佳,高级工程师,yan\_jj@hdec.com  
通信作者:王博川,博士研究生,2310180@tongji.edu.cn
- ©《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