

用于装配式车站的十字形榫槽接头承载性能研究

项炳泉¹, 秦旺², 崔林钊¹, 唐文栋¹

¹安徽省建筑科学研究设计院, 绿色建筑与装配式建造安徽省重点实验室, 安徽 合肥

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年1月20日; 录用日期: 2024年3月11日; 发布日期: 2024年3月19日

摘要

装配式地铁车站整体结构由各个预制部件通过榫槽接头拼装而成, 但现有的梯形截面榫槽结构在受弯过程中接触面易产生滑动分离, 削弱接头部位的承载能力, 从而进一步影响车站整体结构的安全性能。为了加强榫槽接头的力学承载性能, 在原有梯形榫槽的基础上增加一道垂直于主榫的次榫, 形成一种新型的十字形榫槽接头。对两种榫槽接头开展有限元数值模拟, 结果表明: 较于梯形榫槽, 十字形榫槽次榫能够有效抵抗接触面的滑脱作用, 保护接头模型的上部混凝土不受拉破坏; 十字形榫槽抵抗弯曲变形和接头张开作用的能力优于梯形榫槽, 呈现出更稳定的承载变形和更强的抗弯承载极限。以上结果证明了十字形榫槽在改善接头破坏、提升接头承载能力和保持结构稳定性上表现优良, 可以提升结构性能, 延长结构使用寿命, 为装配式地铁车站榫槽接头的优化改良设计提供了参考。

关键词

装配式车站节点, 榫槽接头, 有限元模拟, 抗弯承载

Study on the Load-Bearing Performance of Cross-Shaped Tongue-and-Groove Joints for Assembled Stations

Bingquan Xiang¹, Wang Qin², Linzhao Cui¹, Wendong Tang¹

¹Anhui Province Key Laboratory of Green Building and Assembly Construction, Anhui Institute of Building Research & Design, Hefei Anhui

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Received: Jan. 20th, 2024; accepted: Mar. 11th, 2024; published: Mar. 19th, 2024

Abstract

The overall structure of the assembled metro station consists of various prefabricated parts assembled through tongue-and-groove joints, but the existing trapezoidal section tongue-and-groove structure is prone to sliding separation of the contact surfaces during bending, weakening the load-bearing capacity of the joints, which further affects the safety performance of the overall structure of the station. In order to strengthen the mechanical bearing performance of the tongue-and-groove joints, a secondary mortise perpendicular to the main mortise is added on the basis of the original trapezoidal mortise and groove to form a new type of cross-shaped mortise and groove joint. The finite element numerical simulation of the two types of tongue-and-groove joints shows that, compared with the trapezoidal tongue-and-groove, the secondary mortise of the cruciform tongue-and-groove is able to effectively resist the sliding effect of the contact surface, and protects the upper concrete of the joint model from tensile damage. The ability of cross-shaped mortise and groove to resist bending deformation and joint opening is better than that of trapezoidal mortise and groove, which shows more stable load-bearing deformation and stronger bending load limit. The above results demonstrate that the cross-shaped tongue-and-groove has an excellent performance in improving joint damage, enhancing the joint bearing capacity and maintaining structural stability, which can improve the structural performance and prolong the service life of the structure, and provide a reference for the optimization of the design of tongue-and-groove joints in assembled metro stations.

Keywords

Assembled Station Joint, Tongue-and-Groove Joints, Finite Element Simulation, Flexural Load Bearing

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城市地下交通建设的飞速发展,在国家绿色发展战略的要求下,装配式地铁车站以其高效率、低污染的优势得到了大力发展,已经在长春地铁、青岛地铁、深圳地铁和济南地铁的许多站点取得了成功的建设与应用。装配式地铁车站主体结构由各部分预制构件连接组装而成(如图1所示),其中最常见的连接方式是注浆式榫槽连接。榫槽连接是在两个构件上采用凹凸部位相结合的一种连接方式,凸出部分叫榫头;凹进部分叫榫槽,早在中国古代就被广泛应用于木制建筑以及家具制造领域[1]。现如今,在钢筋混凝土制作的装配式房屋、装配式地下车站以及隧道衬砌等场景中也常能看到榫槽接头在发挥作用[2][3]。中国首座全预制装配式地铁车站长春地铁二号线袁家店站便采用了注浆式榫槽接头连接。

榫槽接头部位是车站整体结构中最薄弱的节点,研究接头结构的力学性能对于车站整体受力稳定性分析具有重要意义。一些学者依托于实际工程,利用模型试验与数值模拟的方法对榫槽接头的抗弯刚度和承载能力进行了研究,取得了一系列成果:杨秀仁等基于长春地铁二号线工程[3][4][5],对不同长度单榫接头、双榫接头的承载特性与破坏形态开展了模型试验研究,提出了抗弯刚度通用计算公式,并总结出榫槽接头的变刚度特性,给该领域的研究奠定了基础。李兆平等开展模型试验研究了双榫槽式接头部位的混凝土结构裂缝演变规律和抗弯刚度变化规律[6],并通过试验结果和拟合曲线得到了接头抗弯刚

度的经验公式。陶连金等考虑预制构件之间的接触关系[7], 建立“地层-实体-接触”计算模型, 研究了不同支撑方式对于结构内力、应力及变形的影响。李习伟等利用数值模拟对单榫接头抗弯刚度的影响因素进行了研究[8], 总结出了不同轴力、榫槽长度、宽度、倾角以及是否注浆等条件下接头抗弯刚度的变化规律。以上研究对象均为梯形榫槽, 并且得出了梯形榫槽接头几何构造对承载能力的影响规律: 榫槽接头的高度对承载能力的影响最大, 高度过小会导致榫槽接触面更易滑脱失稳, 高度过大会增强榫头的受剪作用, 榫槽更易发生剪切破坏, 削弱了接头的承载能力。因此, 需要设计一种新型的榫槽接头样式提高接头部位的承载能力和稳定性。

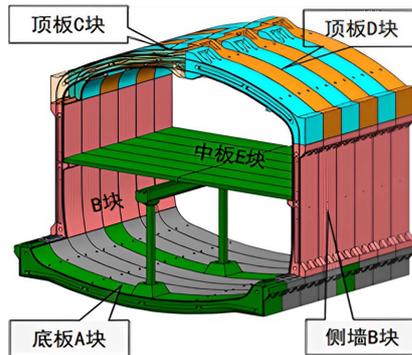


Figure 1. Schematic diagram of structure of assembled metro station
图 1. 装配式地铁车站结构示意图

本文从中国传统榫卯结构插肩榫得到启发, 同时考虑到现有梯形榫槽能够有效解决应力集中和易于大型试件拼装的优点, 提出了一种改进的十字形榫槽接头。建立梯形榫槽接头和十字形榫槽接头有限元模型, 研究在轴力弯矩共同作用下接头模型的抗弯承载能力变化规律, 对比两种榫槽的最大挠度和接缝张开量随弯矩的变化曲线, 分析十字形榫槽接头抗弯承载性能的特点。

2. 数值模拟

2.1. 数值模型建模

使用有限元分析软件 Abaqus 建立足尺三维模型进行数值模拟计算。梯形榫槽的具体尺寸参数参考文献[9]; 十字形榫槽以梯形榫槽为主榫保持尺寸不变, 在此基础上增加一道垂直于主榫的矩形次榫, 用于加强榫头的嵌固作用, 减小小接触面相对滑动, 增强接头的承载能力。梯形榫头和十字形榫头有限元模型如图 2 所示。

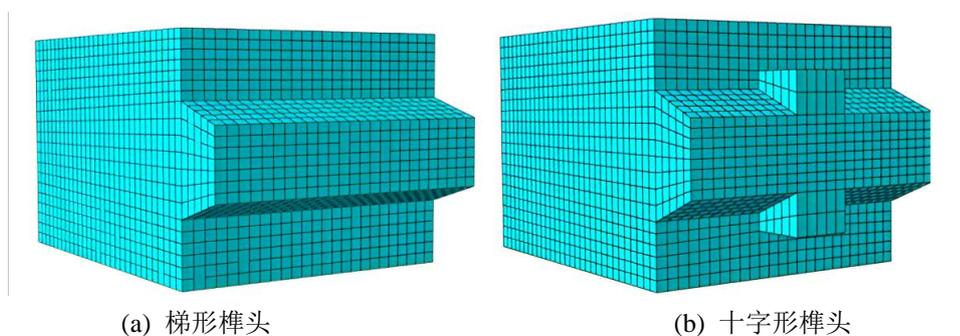


Figure 2. Schematic diagram of trapezoidal mortise and cross mortise
图 2. 梯形榫槽和十字形榫槽示意图

2.2. 参数取值及加载方式

数值模型采用塑性损伤本构模拟混凝土本构关系，该模型可以模拟硬度退化机制以及反向加载刚度恢复的混凝土力学特性，适用于混凝土的各种荷载分析。钢筋采用弹塑性硬化模型，钢筋笼与混凝土采用内置约束，忽略钢筋与混凝土的相对摩擦作用。混凝土采用正六面体实体单元，钢筋采用桁架单元。榫槽与榫头接触面采用“表面与表面”接触模型，其中法向接触行为采用硬接触，拉伸时直接产生分离，压缩时强度考虑接触面材料的压缩强度，单元和节点不可侵入到面内。切向接触行为采用罚摩擦，摩擦系数取 0.2。表 1、表 2 列出了钢筋混凝土材料的主要力学性能参数。

Table 1. Main mechanical property parameters of concrete plastic damage model

表 1. 混凝土塑性损伤本构主要力学性能参数

密度 kg/m^3	杨氏模量 N/m^2	泊松比	膨胀角/ $^\circ$	偏心率	f_b0/f_c0
2400	3.25×10^{10}	0.2	38	0.1	1.16

Table 2. Main mechanical property parameters of HRB400 rebar

表 2. HRB400 钢筋主要力学性能参数

密度 kg/m^3	杨氏模量 N/m^2	泊松比	屈服强度 N/m^2
7800	2×10^{11}	0.3	3.6×10^8

接头模型总长度 2400 mm，总宽度 800 mm，总厚度 1000 mm，混凝土标号为 C40，纵筋采用直径为 10 mm 的 HRB400 级热轧带肋钢筋，箍筋采用直径为 8 mm 的 HRB300 级光圆钢筋，按照工程实际情况进行配筋[10]。模型采用均布荷载作为加载方式，轴力为 1000 kN 的等效均布荷载，弯矩从 100 kN·m 逐级增加至 1500 kN·m，图 3 展示了模型承受荷载的情况。

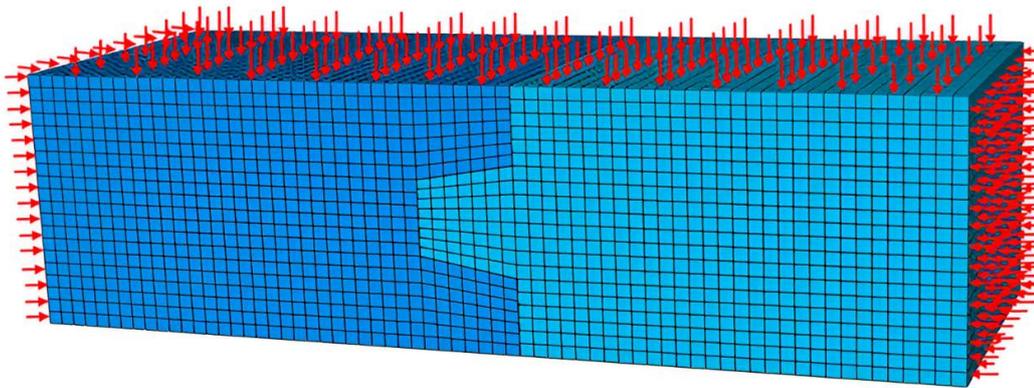


Figure 3. Schematic diagram of loading of tongue-and-groove joint model

图 3. 榫槽接头模型加载示意图

3. 模拟结果与讨论

3.1. 破坏部位及形态

在材料均匀的情况下应力分布一定程度上代表了变形分布，因此 ABAQUS 计算结果中的应力云图可以反映榫槽接头模型在轴力和弯矩共同作用下的破坏情况，梯形榫槽接头和十字形榫槽接头的破坏形态对比情况如图 4、图 5 所示。

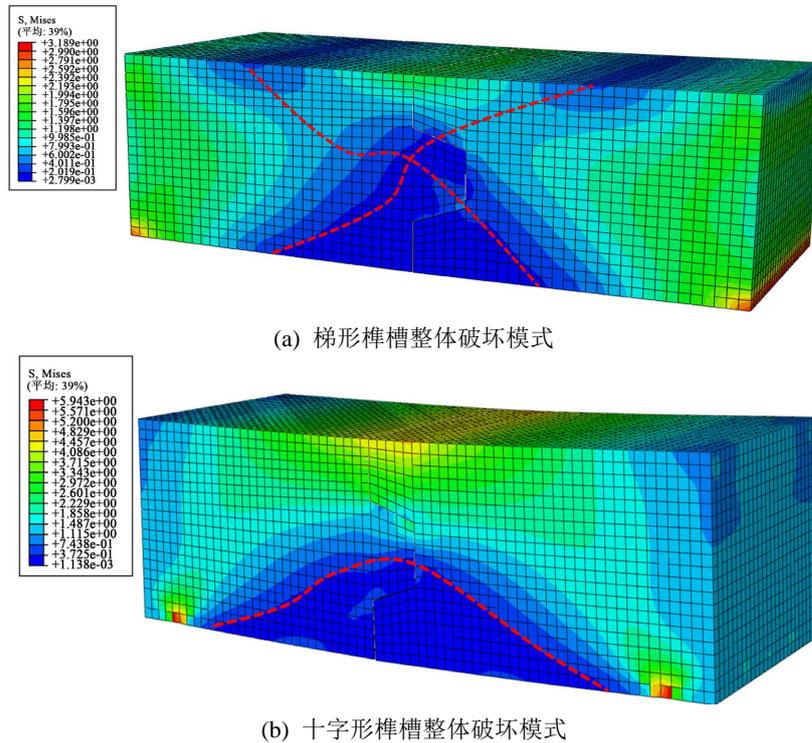


Figure 4. Overall damage pattern of trapezoidal mortise and cross mortise
图 4. 梯形榫槽和十字形榫槽整体破坏形态

由图 4 可知，梯形榫槽在弯矩作用下主要受压应力，榫头和榫槽两部分应力大致呈对称关系，并且一部分应力接近于 0 的区域呈“X”形贯通整个模型，连接点正好位于榫槽与榫头的接触中心。出现这种现象的原因是弯曲变形在不连续的榫槽接触面附近产生了应力重分布并达到了新的平衡，平衡点就在榫槽和榫头实际接触点。随着弯矩的增大，受拉区域拉应力逐渐增大，榫槽最终会在“X”中点以上的区域产生混凝土受拉开裂破坏，而中点以下的区域不会出现受拉开裂，会继续向两端产生水平位移，表现为接头下部不断张开，压应力为 0 的区域不断扩大。而十字形榫槽在弯矩作用下榫槽和榫头部分也主要受对称的压应力，且越接近下表面应力接近于 0 的范围越大。但值得注意的是，十字形榫槽模型的下半部分应力分布与梯形榫槽相似，但上半部分并未出现应力重分布后的受拉区域，这是由于接触面下部受弯产生张开后次榫发挥了嵌固作用，有效制止了接触面互相分离的趋势。

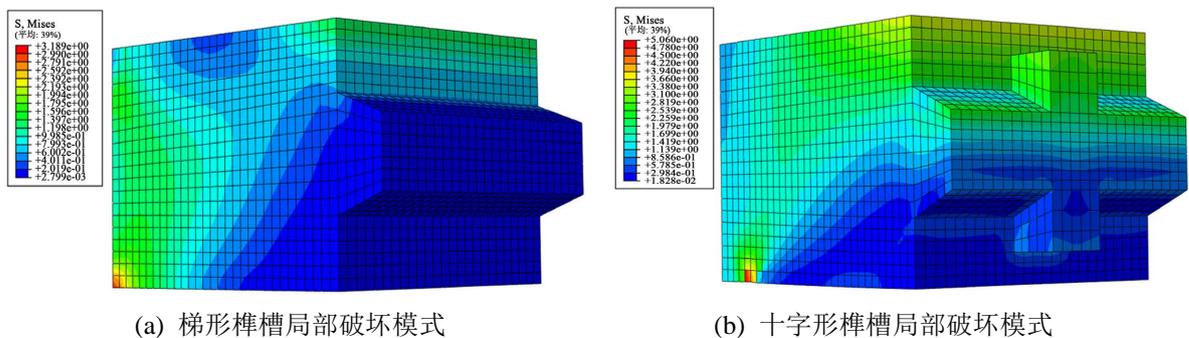


Figure 5. Localized damage patterns of trapezoidal mortise and cross mortise
图 5. 梯形榫槽和十字形榫槽局部破坏形态

如图 5 所示, 观察梯形榫槽的局部破坏模式可以发现, 榫头大部分区域的压应力接近于 0, 仅有上部小面积区域承受压应力。分析原因是由于受截面形状的影响, 榫槽和榫头接触面产生了相对滑动后逐渐分离, 接头内部受力情况发生改变, “X”形应力区即为应力重分布后的受拉区域, 因此该区域的压应力几乎为 0。而十字形榫槽的次榫出现了较大应力, 可以预见随着弯矩继续增大, 次榫首先发生破坏, 然后产生应力重分布后会与梯形榫槽产生相似的破坏形式。

对比图 4 和图 5 可知, 在相同的荷载条件下, 十字形榫槽应力接近于 0 的区域高度只达到主榫的一半, 而梯形榫槽的榫头几乎被全覆盖。这个现象说明梯形榫槽接触面出现大面积分离, 而十字形榫槽相对来说分离程度较低。证明了次榫结构能够有效改善接头模型的应力分布, 避免榫槽接触面出现相对滑动和分离。次榫的存在提高了榫槽接头的承载能力, 改善了榫槽分离引起的不利于接头正常承载的应力重分布, 有效地解决了模型上部混凝土受拉破坏问题。

3.2. 挠度曲线与接触面张开量曲线

装配式地铁站榫槽连接节点不同于连续结构, 是由榫部件和槽部件两个独立部件在接缝位置嵌固连接而成, 因此其承受弯矩荷载时抵抗变形的作用机理也与连续结构不同。连续梁受弯时, 根据平面截面假设和单向受力假设, 整体产生挠度, 且挠度曲线为一条连续的二次函数曲线。但榫槽接头受弯时, 接触面位置是不连续的, 接触面上部会产生挤压作用、下部会产生张开作用, 导致两部件逐渐分离, 榫部件和槽部件的接触面分离后不再共节点, 挠度值发生不同的变化, 因此两者挠度曲线会在接触部位断开, 不再是一条连续曲线。榫槽接头在弯矩作用下的最大挠度和接触面张开量直观反映了抗弯承载能力, 接缝张开量和最大挠度越小, 代表榫槽接头抵抗变形的能力越强, 抗弯承载能力越优良。梯形榫槽和十字形榫槽挠度曲线和接触面最大张开量曲线如图 6 所示。

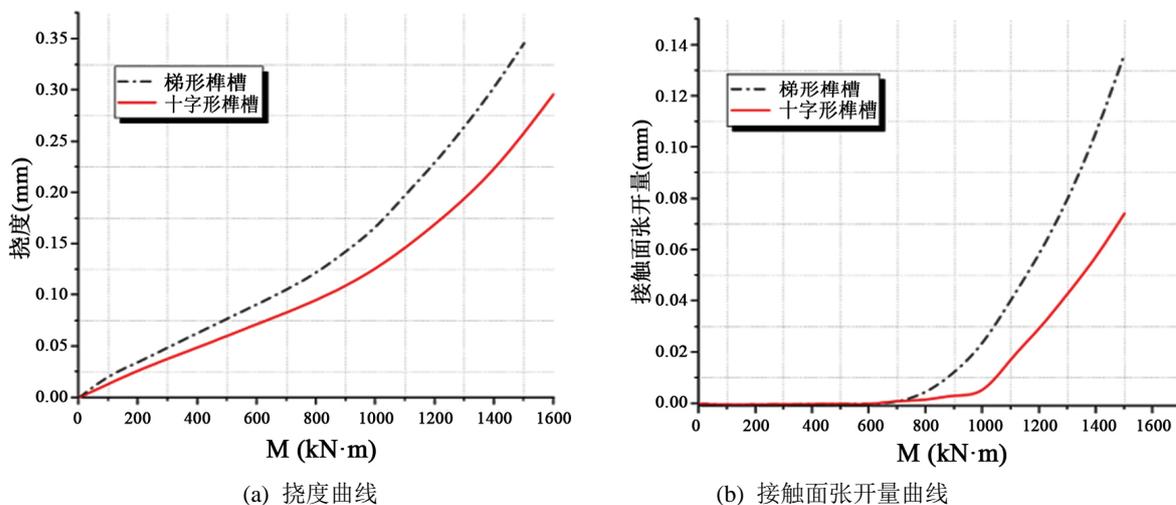


Figure 6. Deflection curve and contact surface tension curve

图 6. 挠度曲线与接触面张开量曲线

由图 6(a)可知, 梯形榫槽和十字形榫槽模型的挠度均近似呈线性增加, 但在相同弯矩下十字形榫槽的挠度总是小于梯形榫槽。梯形榫槽在弯矩达到 800 kN·m 后, 曲线的斜率明显增大, 说明此时达到接头刚度开始逐步减小, 对弯矩的抵抗能力不断减弱, 随着弯矩的增大接头的最大挠度加速增大; 而十字形榫槽在弯矩达到 1000 kN·m 后才达到该临界点。以上两点均说明十字形榫槽的抗弯承载能力强于梯形榫槽, 进一步证明了增加次榫可以极大改善榫槽接头的承载性能。由图 6(b)可知, 在初始加载阶段, 随着

弯矩增大, 接触面张开量基本为 0, 造成这种现象的原因是弯矩对榫槽接头下部的拉应力被模型两端轴力所产生的压应力抵消, 因此接触面几乎不发生张开现象。但继续加载直至弯矩增大到 800 kN·m 后, 梯形榫槽接头的张开量开始逐渐增大并且增速越来越快, 此时轴力的影响逐渐减小, 榫槽接头之间的嵌固摩擦力发挥作用, 接头结构自身的抗弯承载能力逐步释放。而十字形榫槽接头出现张开量迅速增长的临界弯矩在 1000 kN·m, 在此之前, 随着弯矩的增长张开量几乎保持在 0 左右不变。在产生张开现象后, 相同弯矩下十字形榫槽的接触面张开量远小于梯形榫槽, 仅占梯形榫槽张开量的 50%。说明十字形榫槽的稳定性能优于梯形榫槽, 受弯矩荷载时不易产生张拉变形, 有利于最大程度地发挥榫槽接头的承载性能。

4. 结论

基于现有工程中常用的梯形榫槽接头存在的滑脱失稳风险, 考虑便于施工拼装, 在保持梯形榫槽主要受力结构不变的情况下增加一道垂直于主榫的次榫, 形成一种新型的十字形榫槽接头。对两种榫槽接头开展有限元数值分析, 从接头破坏模式、抗弯承载能力和结构稳定性等角度进行对比分析, 得出以下结论:

- 1) 相对于梯形榫槽接触面大面积分离, 十字形榫槽次榫能够有效抵抗接触面的滑脱作用, 避免因滑脱出现的不利于接头承载的应力重分布, 保护接头模型的上部混凝土不受拉破坏。
- 2) 十字形榫槽抵抗弯曲变形的能力优于梯形榫槽, 呈现出更稳定的承载形变和更强的抗弯承载极限。
- 3) 十字形榫槽抵抗接头张开作用的能力远远优于梯形榫槽。保持接触面不发生张开现象的临界弯矩在梯形榫槽基础上提升了 25%, 出现接触现象后相同弯矩下张开量只有梯形榫槽的 50%。
- 4) 十字形榫槽在改善接头破坏、提升接头承载能力和保持结构稳定性上表现优良, 可以提升结构性能, 延长结构使用寿命。

基金项目

绿色建筑与装配式建造安徽省重点实验室开放基金课题资助项目(No. 2022-JKYL-005)。

参考文献

- [1] Yu, P., Li, T.Y. and Yang, Q.S. (2023) Inelastic Behavior of Mortise-Tenon Jointed Traditional Timber Frame with Free-Standing Columns. *International Journal of Architectural Heritage*. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2203669>
- [2] Bai, H.W., Huang, Z., Qin, M.J., Ma, S.K. and Zhang, C.L. (2023) Nonlinear Static Behavior Analysis of Single/Double-Layer Frame Tunnels with Mortise and Tenon Joint. *Structures*, **55**, 876-890. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.06.074>
- [3] Lin, F. and Yang, X.R. (2023) Mechanical Properties Analysis of Joints for Prefabricated Metro Station Structure Based on Whole-Process In-Situ Monitoring. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **138**, Article ID: 105202. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105202>
- [4] 杨秀仁, 林放, 黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫长接头抗弯承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 111-118+128.
- [5] 林放, 杨秀仁, 王臣. 注浆式榫槽接头关键构造参数影响研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(2): 34-44.
- [6] 李兆平, 李守庆, 苏会锋. 装配式地铁车站结构双榫槽接头抗弯刚度研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(s1): 14-18.
- [7] 陶连金, 李卓遥, 杨秀仁, 丁鹏, 单鑫玉. 基于 ABAQUS 的预制装配式地铁车站结构拼装成环后力学行为研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 115-123.
- [8] 李习伟, 刘强. 预制装配式地铁车站单榫槽式接头抗弯刚度影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(8): 113-117.
- [9] Qiu, T., Su, D., Chen, X.S., et al. ((2023)) A Novel Interfaces Contact Model for Analyzing Assembled Joints of Prefabricated Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **133**, Article ID: 104936. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104936>
- [10] 杨秀仁. 明挖地铁车站预制装配式结构理论与实践[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.