

地铁地下车站大跨度预制带肋混凝土叠合板受弯性能研究^{*}

颜 慧¹ 徐前卫¹ 路林海² 武朝军² 韩宇峰¹ 龚 杰³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 济南轨道交通集团有限公司, 250013, 济南; 3. 中交路桥北方工程有限公司, 102600, 北京)

摘 要 [目的] 地铁地下车站大跨度预制带肋混凝土叠合板存在板厚、跨度大、自重大的问题, 且目前相关研究较少, 对此有必要对其力学性能及其影响因素进行研究。[方法] 针对济南地铁 8 号线某装配式地铁车站叠合顶板, 采用试验和数值模拟相结合的方式进行研究。设计了 2 块叠合板试件和 1 块整浇板试件进行静力加载试验, 对试件的裂缝分布和发展、荷载-跨中挠度曲线等进行了分析。对试验工况进行了数值模拟, 在验证有限元模型可行性的前提下对影响叠合板受力性能的关键因素进行了扩展分析。[结果及结论] 3 块试件在加载过程中的受力状态类似, 叠合板试件在加载过程中未出现沿着叠合面滑移的情况, 板侧裂缝贯通发展, 叠合面黏结性能和试件整体工作性能良好; 底板肋板上部钢筋承担了部分受拉钢筋的作用, 提高了叠合板的承载能力; 设置桁架钢筋对于叠合板的承载力提升效果有限, 可根据实际情况降低桁架钢筋的密度或取消桁架钢筋的设置; 通过采用空心底板可有效减少叠合板自重且对其受力性能影响不大。

关键词 地铁; 地下车站; 叠合板; 受弯性能; 数值模拟; 室内试验

中图分类号 U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.032

Study on Flexural Behavior of Large-Span Precast Ribbed Concrete Composite Slabs for Underground Subway Stations

YAN Hui¹, XU Qianwei¹, LU Linhai², WU Chaojun², HAN Yufeng¹, GONG Jie³

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Jinan Railway Transportation Group Co., Ltd., 250013, Jinan, China; 3. CCCC Road & Bridge Northern Engineering Co., Ltd., 102600, Beijing, China)

Abstract [Objective] The large-span precast ribbed concrete composite slabs for underground subway stations have

problems of thick slabs, large spans, and heavy self-weight. And there are few related researches at present, necessitating studies on the mechanical properties of the slabs and factors that affect them. [Method] The composite roof slab of a pre-fabricated subway station on Jinan Metro Line 8 is studied with combination of experiments and numerical simulations. Two composite slab specimens and one cast-in-place slab specimen are designed for static loading tests, and the crack distribution and development of the specimens, as well as the load-midspan deflection curves are analyzed. Numerical simulation of the test conditions is carried out. An extended analysis of key factors affecting the mechanical properties of the composite slabs is carried out on the premise of verifying the feasibility of the finite element model. [Result & Conclusion] The stress state of three specimens in the loading process are similar. During the loading process, the composite slab specimens do not slip along the composite surface, penetrating development of the cracks on the slab side occurs, the bond performance of the composite surface and the overall specimen working performance are good; the upper reinforcement of the bottom slab rib assumes part of the tensile reinforcement role, which improves the load carrying capacity of the composite slab. Because the setting of truss reinforcement has limited effect on the load carrying capacity improvement of the composite slab, the density of truss reinforcement can be reduced or the setting of truss reinforcement can be canceled according to actual conditions; the use of a hollow bottom slab can effectively reduce the self-weight of the composite slab without having much effect on its stress performance.

Key words subway; underground station; composite slab; bending performance; numerical simulation; indoor test

近年来, 装配式建筑不断发展, 尤其是在地上建筑结构中发展迅速, 但在地铁地下车站工程中的

^{*} 山东省重点研发计划项目(2021CXGC011203); 国家重点研发计划项目(2023YFC3009400)

应用还处于发展初期^[1-2]。装配式地铁地下车站技术的发展符合绿色建筑的要求,有利于城市建设的可持续发展^[3]。目前已有许多学者对装配式地铁车站的结构形式和预制构件进行了相关研究^[4-5]。装配式地铁车站应用初期为全预制拼装结构,而这种形式存在施工成本高、自重较大等问题。为了降低结构自重,方便构件的运输和安装,提出了“预制+现浇”的叠合设计^[6]。目前关于地下车站叠合顶板的相关研究较少,且涉及的叠合板厚度集中在200 mm以内,跨度大多为3 m左右^[7-9]。而济南地铁8号线一期工程的青年政治学院站(以下简称“青院站”)预制带肋叠合板板厚达900 mm,跨度达9 m,相较于常见的预制叠合板存在板厚、跨度大、自重大的问题,因此有必要研究其受力性能。

本研究制作了2块不同预制底板形式叠合板和1块整浇板进行静力加载试验,对比分析其受力性能;并进一步对试验工况进行了数值模拟,分析有无桁架钢筋,以及带肋底板形式对叠合板力学性能的影响,以期为大跨度预制带肋混凝土叠合板的设计提供参考。

1 工程概况

青院站为地下二层岛式车站,标准段宽20.1 m,车站中心里程处的车站覆土厚度约为3.1 m,基坑深度约为17.5 m。车站采用明挖法施工,基坑采用桩+内支撑的支护体系,车站顶板、中板及中柱均采用预制+现浇的叠合结构。其中,顶板尺寸为9.0 m(长)×1.5 m(宽)×0.9 m(高),预制底板厚0.5 m,后浇层厚0.4 m。

2 静力加载试验方案

2.1 试件设置与参数

按构造形式不同,共设计了3个试验试件。由于试件原型尺寸过大,不便进行室内试验,因此按照配筋率相似的原则将原试件按3:1比例缩尺。缩尺后的试件截面尺寸为3.0 m(长)×0.5 m(宽)×0.3 m(高)。试件编号及构造见表1,试件配筋图见图1。3块试件均采用C45混凝土,并采用HRB400钢筋作为受力筋和箍筋。

2.2 试验加载与测试方案

试验加载现场如图2所示。试件两端支承方式为简支。采用在板跨度三分点位置施加2个相等的竖向集中荷载来等效实际的均布荷载,在试验正式

表1 试件编号及构造

Tab.1 Specimen number and structure

试件编号	构造形式	叠合面处理方式
DHB-T	倒T形预制底板	凿毛+桁架钢筋
DHB- π	倒 π 形预制底板	凿毛+桁架钢筋
ZJB	整浇板	

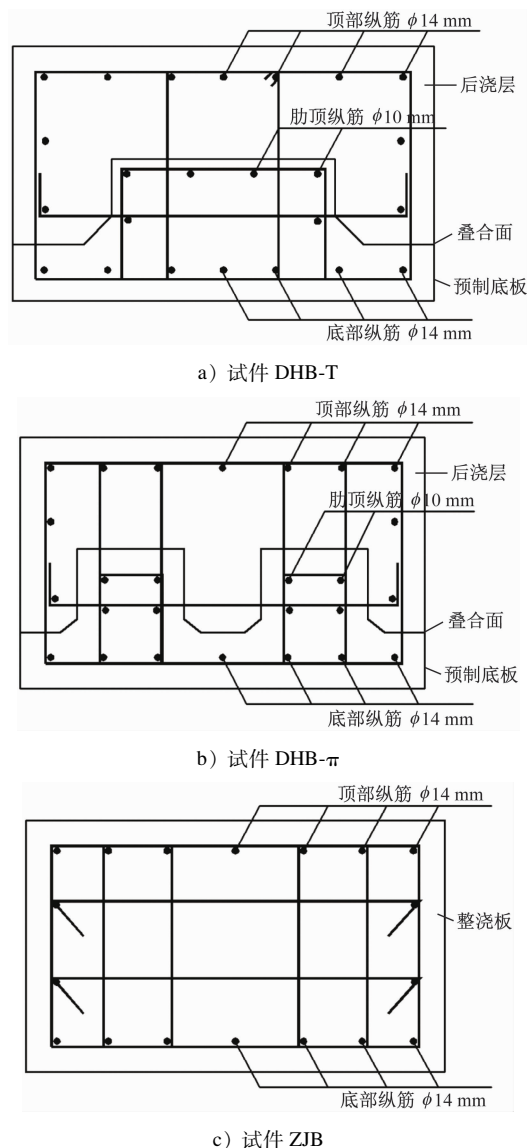


图1 试件配筋图

Fig.1 Reinforcement diagram of each specimen

加载时以10 kN为一级,每一级加载结束后静载3 min,以便观察试验现象。

试验重点考察试件的受弯性能,主要采集荷载、挠度及混凝土应变等数据。此外,在每级加载结束后的持续静载阶段,还对试件所出现的裂缝发展情况进行观察。



图2 试验加载现场

Fig. 2 Test loading site

3 静力加载试验结果与分析

3.1 裂缝发展与破坏特征

3 块试件在加载过程中的裂缝发展情况基本相似,开裂前试件挠度较小;开裂后随着荷载的增加,裂缝数量逐渐增多并沿着板侧向上延伸。试件 DHB-T、试件 DHB- π 、试件 ZJB 的开裂荷载分别为 27 kN、18 kN、50 kN。可见,整浇板开裂荷载大于叠合板开裂荷载,说明整浇板的抗裂性能更好。

试件 DHB-T 和试件 DHB- π 最终破坏指标为跨中最大挠度超过限值,以及受压区混凝土压碎;试件 ZJB 最终破坏指标为板底纯弯段内最大裂缝宽度及跨中最大挠度超过限值。

3 块试件初始裂缝及加载结束后的板侧最终裂缝分布如图 3—图 5 所示。由图 3—图 5 可见:与试件 ZJB 相比,试件 DHB-T 和 DHB- π 初始裂缝分布更为稀疏;3 块试件最终裂缝分布与数量情况均相似,说明 3 块试件在加载过程中的受力状态类似。另外,整个加载过程中叠合板均未出现沿着叠合面发展或断层的情况,说明叠合面黏结性能良好,采用桁架钢筋加凿毛的叠合面处理方式可以保证预制底板与后浇层间的整体工作性能。

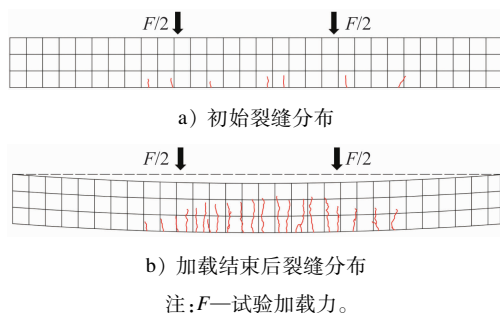


图3 试件 DHB-T 加载裂缝分布

Fig. 3 Post-loading crack distribution in specimen DHB-T

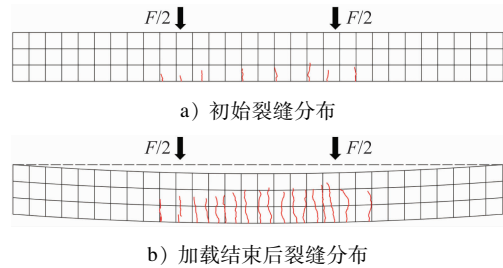
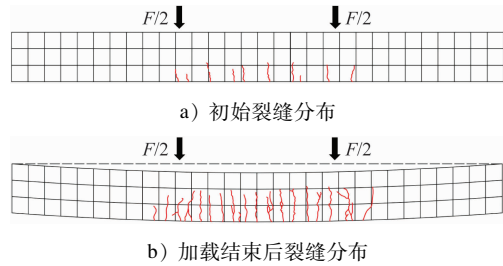
图4 试件 DHB- π 加载裂缝分布Fig. 4 Post-loading crack distribution in specimen DHB- π 

图5 试件 ZJB 加载裂缝分布

Fig. 5 Post-loading crack distribution in specimen ZJB

3.2 荷载-跨中挠度关系

依据试验数据,绘制各试验试件荷载-跨中挠度曲线如图 6 所示。

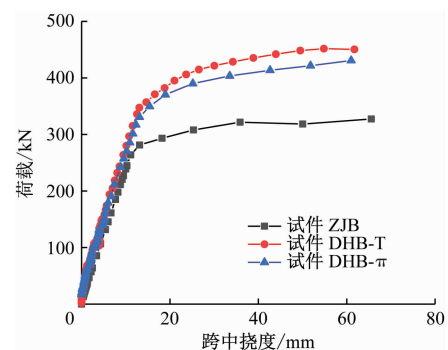


图6 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load-midspan deflection curves

由图 6 可见,3 块试件的荷载-跨中挠度曲线可大致分成 3 个阶段:①阶段 1——从加载到出现第一条裂缝,挠度和荷载呈线性关系,试件刚度最大;②阶段 2——混凝土开裂后,挠度-荷载曲线偏离线性关系;③阶段 3——受拉钢筋逐渐屈服后,板底与板侧裂缝贯通并发展迅速,试件刚度迅速下降,挠度-荷载曲线趋于水平。

试件 DHB-T、试件 DHB- π 、试件 ZJB 的极限荷载值为 455 kN、430 kN、327 kN。对比分析可知,两块叠合板试件的极限承载力均大于整浇板,分析其原因可能是在带肋预制底板肋上部布置了更多的

钢筋,该部分钢筋承担了部分受拉钢筋的作用,提高了试件的承载能力。这也说明叠合板的整体工作性能良好,在配筋设计时可以适当减少底部受力钢筋的配置。

4 数值模拟与分析

建立与静力加载试验工况相同的试件有限元模型,进行模拟计算,并对比模拟结果与静力加载试验结果,在验证有限元模型参考价值的基础上进一步分析叠合板关键特征参数对其受力的影响。

4.1 建立有限元模型

叠合板有限元模型包含预制底板、后浇层、纵向受力钢筋与分布钢筋,并按照试件的实际情况,组装成整体试件有限元模型。

为了加快求解速度,静力加载试验中所用的上部加载钢垫片和下部支座垫板采用在三分点处添加荷载和板端添加边界条件进行模拟。混凝土采用塑性损伤模型,混凝土本构采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中的混凝土单轴受压应力-应变公式,钢筋本构采用二折线模型。不考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移,采用嵌入命令进行约束。对于叠合面,采用设置接触对的方式来模拟:预制底板和后浇层接触采用面面离散方法,将后浇层定义为主面,预制底板定义为从面;法向接触属性采用硬接触,加强接触约束方式采用罚函数方法,切向摩擦公式采用基于罚函数附近约束条件的库伦摩擦模型,摩擦因数根据文献[10]取值为0.6。

4.2 有限元模型模拟结果验证

根据有限元数值模拟结果(以下简称“模拟值”)与静力加载试验结果(以下简称“试验值”),绘制荷载-跨中挠度曲线如图7—图9所示。

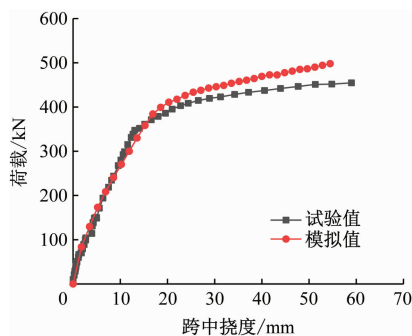


图7 试件 DHB-T 荷载-跨中挠度曲线对比图

Fig. 7 Comparison of load-midspan deflection curves for specimen DHB-T

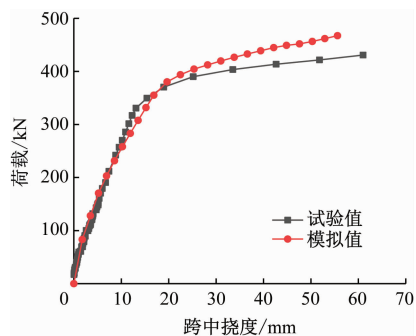


图8 试件 DHB- π 荷载-跨中挠度曲线对比图

Fig. 8 Comparison of load-midspan deflection curves for specimen DHB- π

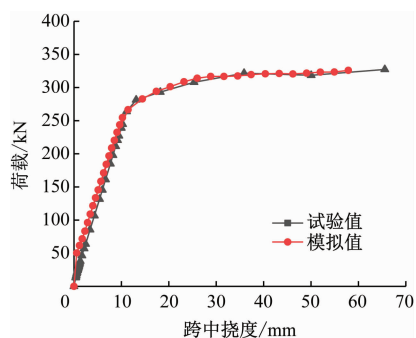


图9 试件 ZJB 荷载-跨中挠度曲线对比图

Fig. 9 Comparison of load-midspan deflection curves for specimen ZJB

由图7—图9可以看到,模拟值与试验值的荷载-跨中挠度曲线发展趋势一致:在弹性阶段,模拟值与试验值基本吻合;进入弹塑性阶段,随着荷载的增大,模拟值略大于试验值,但两条荷载-跨中挠度曲线趋势相同,说明模拟值与试验值吻合良好,有限元分析方法具有可行性,可用于分析影响因素。

4.3 影响因素分析

4.3.1 有无桁架钢筋

根据分析,倒T形带肋底板叠合板虽整体工作性能良好,但因其带肋预制底板上分布有大量桁架钢筋,存在构件制作过程较复杂和不便于运输、安装的问题,因此,在有限元模型中将有无桁架钢筋作为变量,建立了2块倒T形带肋底板叠合板模型进行模拟计算的对比分析。

模拟计算得到荷载-跨中挠度对比曲线如图10所示。由图10可知,未设置桁架钢筋的叠合板试件的极限承载能力为466 kN,较有桁架钢筋的叠合板试件承载力降低了6.42%。此外,在加载过程中并未出现叠合面滑移的情况,说明对叠合面进行凿毛就可以满足受力需求。

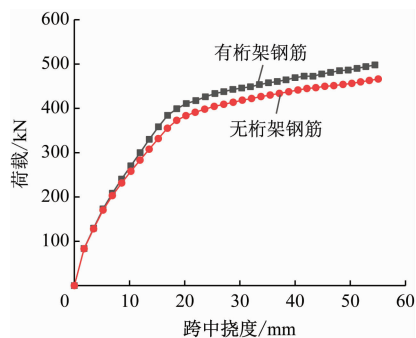


图 10 有无桁架钢筋叠合板荷载-跨中挠度曲线对比图

Fig. 10 Comparison of load-midspan deflection curves for composite slabs with and without truss reinforcement

4.3.2 带肋底板形式

为减少结构自重,在倒 T 形带肋预制底板的基础上提出空心倒 T 形带肋预制底板(以下简称“空心底板”)的设计,底板空心部分为 2 个直径为 60 mm 的圆柱体。

建立相关有限元模型进行模拟计算,得到荷载-跨中挠度对比曲线如图 11 所示。由图 11 可见,采用空心底板的叠合板试件的极限承载力为 502 kN,仅比较原试件极限承载力提高了 0.8%,说明空心底板与原倒 T 形带肋预制底板的整体受力性能差异不大。由此可见,采用空心底板的叠合板既能有效减少结构自重,又具有良好的受力性能。

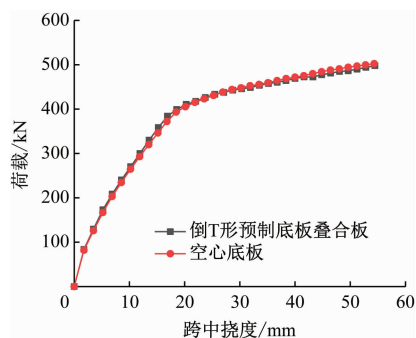


图 11 预制底板形式对叠合板承载力的影响

Fig. 11 Influence of precast bottom slab form on the bearing capacity of composite slabs

5 结语

本文通过试验加载和数值模拟分析方法对地下车站大跨度叠合板受弯性能进行了研究,得到结论如下:

1) 2 块叠合板和 1 块整浇板的缩尺静力加载试验结果表明:3 块试件在加载过程中的受力状态类似;叠合板板侧裂缝贯通发展,未出现沿着叠合

层发展或断层的情况,叠合面黏结性能良好,采用桁架钢筋加凿毛的叠合面处理方式可以保证预制底板与后浇层间的整体工作性能。

2) 底板肋板上部钢筋承担了部分受拉钢筋的作用,提高了试件的承载能力,在配筋设计时可以适当减少底部受力钢筋的配置。

3) 桁架钢筋的设置对于叠合板的承载力提升效果较小,在对叠合板进行设计时可根据实际情况降低桁架钢筋的密度或取消桁架钢筋的设置。

4) 采用空心底板的叠合板试件的受力性能与原试件相比差异不大,在有效减少叠合板自重的同时受力性能良好,在设计中可考虑该形式。

参考文献

- [1] LUO Z, GUO J, HAN J, et al. Research on the construction safety risk assessment of prefabricated subway stations in China [J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2024, 31(4): 1751.
- [2] 邵莹, 胡双平, 高志宏, 等. 装配式混凝土地下车站结构应用与研究进展[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(4): 89.
SHAO Ying, HU Shuangping, GAO Zhihong, et al. Applications and investigations of precast concrete structures for underground metro station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(4): 89.
- [3] TAO L, DING P, SHI C, et al. Shaking table test on seismic response characteristics of prefabricated subway station structure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91: 102994.
- [4] 杜修力, 刘洪涛, 许成顺, 等. 装配整体式地铁车站纵断面方向梁板柱中节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 95.
DU Xiuli, LIU Hongtao, XU Chengshun, et al. Study on seismic performance of beam-column-slab interior joints in longitudinal section of assembled monolithic subway station [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9): 95.
- [5] 邢琼. 装配整体式地下车站钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁节点力学性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 59.
XING Qiong. Joint mechanical properties of concrete-filled steel tube columns and steel-concrete composite beams in assembled monolithic underground station [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(7): 59.
- [6] 杨勇. “预制+现浇”叠合拱壳工艺在地铁车站中的应用 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 203.
YANG Yong. Application of “prefabrication + cast-in-situ” superposition arch shell technology in metro station construction [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 203.

(下转第 190 页)

- around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(1): 78.
- [15] 杨会军, 王梦恕. 隧道围岩变形影响因素分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 92.
- YANG Huijun, WANG Mengshu. Analysis on construction factors of surrounding rock deformation in tunneling works[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(3): 92.
- [16] 张朝强, 田乐, 刘博. 深埋软岩隧道开挖地应力场与围岩破坏机制分析[J]. 公路, 2016, 61(1): 228.
- ZHANG Chaoqiang, TIAN Le, LIU Bo. Analysis of deformation and failure mechanism of the high geotectonic stress soft rock tunnel during construction[J]. Highway, 2016, 61(1): 228.
- [17] 黄才华. 山区地铁隧道围岩开挖应力场及开挖方法研究[J]. 施工技术, 2014, 43(10): 131.
- HUANG Caihua. Research on excavation stress field and excavation method of subway tunnel surrounding rock in mountain area[J]. Construction Technology, 2014, 43(10): 131.
- [18] 李策, 王士民, 王承震, 等. 基于实测内力的大直径水下盾构隧道荷载反演分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 103.
- LI Ce, WANG Shimin, WANG Chengzhen, et al. Back analysis of load of large underwater shield tunnel based on measured internal force[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 103.
- 收稿日期:2023-02-06 修回日期:2023-10-03 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-06 Revised:2023-10-03 Published:2025-04-10
• 第一作者:何林根,无, helingen1997@163.com
通信作者:王士民,教授, wangshimin@swjtu.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 176 页)

- [7] 黄海林, 吴方伯, 祝明桥, 等. 板肋形式对预制带肋底板混凝土叠合板受弯性能的影响研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(10): 66.
- HUANG Hailin, WU Fangbo, ZHU Mingqiao, et al. Influence of rib details on flexural behavior of concrete composite slab with precast prestressed ribbed panel[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(10): 66.
- [8] 金凌志, 廉德铭, 李丽, 等. 钢筋桁架超高性能混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(3): 69.
- JIN Lingzhi, LIAN Deming, LI Li, et al. Experimental research on flexural behavior of UHPC composite slabs with steel truss[J]. Industrial Construction, 2020, 50(3): 69.
- [9] 赵广军, 赵雷, 李文杰, 等. 预应力混凝土带肋叠合板受弯性能试验与设计关键问题研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 171.
- ZHAO Guangjun, ZHAO Lei, LI Wenjie, et al. Experimental and design key problems study on bending behavior of prestressed concrete composite slab with concrete rib[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 171.
- [10] 曹任辉, 彭波, 任靖, 等. 双面叠合剪力墙水平接缝传力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 19.
- CAO Renhui, PENG Bo, REN Jing, et al. Experimental study on force transmission performance of double-sided superposed shear walls with horizontal joints[J]. Building Structure, 2023, 53(14): 19.
- 收稿日期:2024-06-21 修回日期:2024-11-06 出版日期:2025-04-10
Received:2024-06-21 Revised:2024-11-06 Published:2025-04-10
• 通信作者:颜慧, 硕士研究生, 2233413@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 181 页)

- GONG Dao, ZHOU Jinsong, DU Shuaimi, et al. Study on the effect of the underframe equipment on vibration transmissibility and modal frequency of the car body for high-speed emu trains[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 126.
- [5] 周立群. 基于 OSPA 方法的客室地板振动传递路径分析及控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- ZHOU Liqun. Transfer path analysis and control of floor vibration based on OSPA method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 姜旭东, 刘金龙, 史史, 等. 基于传递路径分析方法的动车组异常振动研究[J]. 铁道车辆, 2020, 58(5): 39.
- JIANG Xudong, LIU Jinlong, SHI Li, et al. Research on abnormal vibration of multiple units based upon the transfer path analysis method[J]. Rolling Stock, 2020, 58(5): 39.
- [7] 杨旭, 李冰, 陈少江. 传递路径分析方法用于农用车振动控制的研究[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 33.
- YANG Xu, LI Bing, CHEN Shaojiang. Research on transfer path analysis method on vibration control of agricultural vehicles[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 33.
- 收稿日期:2023-03-01 修回日期:2023-04-21 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-01 Revised:2023-04-21 Published:2025-04-10
• 通信作者:巩延庆, 高级工程师, 13814162048@163.com
• ©《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