

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.071



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



预制钢-混凝土组合楼梯抗弯性能与舒适度分析

何传民^{1,2}, 侯和涛^{1,3}, 张少远¹, 张秀璇¹, 房海波⁴, 李海生⁵

(1. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2. 山东大学第二医院, 济南 250033; 3. 山东省绿色建筑智能建造工程技术研究中心, 济南 250061; 4. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014; 5. 荣华建设集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:为推进组合材料在建筑结构中的应用,对预制钢-混凝土组合楼梯踏步的抗弯性能和楼梯整体的舒适度进行研究。进行6个楼梯踏步试件的四点弯曲试验,主要探究抗剪件形式和踏步与梯梁的连接方式对楼梯踏步承载性能的影响。试验结果表明,相对于角钢和栓钉抗剪件,槽钢抗剪件对楼梯踏步的承载力提升更为显著。此外,焊接试件的承载力受抗剪件的影响较小,并且高于简支试件的承载力,在今后的工程应用中,焊接可以作为钢-混凝土组合楼梯踏步与梯梁连接的主要方式。为了更准确地研究楼梯踏步的力学行为,使用ABAQUS有限元软件对其进行建模,该有限元模型能够准确模拟楼梯踏步的力学行为。在验证模型准确性的基础上,对整体楼梯进行舒适度分析。结果表明,在规范限值范围内,楼梯的自振频率和人致激励下的加速度响应均满足行走的舒适度要求,使用过程中不会引起明显不适,符合人体工程学的要求。试验和建模分析证明,槽钢抗剪件对楼梯踏步的承载力提升效果更好,焊接可以作为楼梯踏步与梯梁的连接方式,并且楼梯的舒适度满足规范要求。

关键词:钢-混凝土组合楼梯;抗弯试验;有限元模拟;舒适度

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0151-08

Analysis of flexural performance and comfort on prefabricated steel-concrete composite stair

HE Chuanmin^{1,2}, HOU Hetao^{1,3}, ZHANG Shaoyuan¹, ZHANG Xiuxuan¹,
FANG Haibo⁴, LI Haisheng⁵

(1. College of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China; 2. The Second Hospital of Shandong University, Jinan 250033, P. R. China; 3. Shandong Research Center for Green Building and Intelligent Construction, Jinan 250061, P. R. China; 4. The Second Construction Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250014, P. R. China; 5. Ronghua Construction Group Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, P. R. China)

Abstract: In order to promote the application of composite materials in building structures, a study was

收稿日期:2023-03-08

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2021CXGC011205);“海右名家”产业领军人才支持工程

作者简介:何传民(1980-),男,主要从事基建工程管理和建设研究,E-mail:cangs88@163.com.

张秀璇(通信作者),女,E-mail:202115005@mail.sdu.edu.cn.

Received: 2023-03-08

Foundation items: The Key R & D Plan of Shandong Province for Major Scientific and Technological Innovation Projects (No. 2021CXGC011205); Industrial Leading Talent Support Project Named “Haiyoumingjia”

Author brief: HE Chuanmin (1980-), main research interests: management and construction of infrastructure project, E-mail: cangs88@163.com.

ZHANG Xiuxuan (corresponding author), E-mail: 202115005@mail.sdu.edu.cn.

conducted on the flexural performance and overall comfort of prefabricated steel-concrete composite stair treads. Six stair tread specimens were tested using a four-point bending test, focusing on the influence of the shear reinforcement and the connection method between the tread and the stringer on the load-bearing performance of the stair treads. The test results showed that compared to angle steel and bolt shear reinforcement, channel steel shear reinforcement significantly improved the load-bearing capacity of the stair treads. Moreover, the load-bearing capacity of the welded specimens was less affected by the shear reinforcement and higher than that of the simply supported specimens. This indicates that welding can be considered as the primary connection method between the steel-concrete composite stair treads and stringers in future engineering applications. To accurately study the mechanical behavior of the stair treads, ABAQUS software was used to model the stair treads. The finite element model accurately simulated the mechanical behavior of the stair treads. Based on the validation of the model accuracy, a comfort analysis was conducted on the overall stairs. The natural frequency of the stairs and the acceleration response under human-induced excitation were within the specified limits, satisfying the comfort requirements for walking. The stairs will not cause any noticeable discomfort during use, meeting the requirements of ergonomics. The test and modeling analysis have proved that channel steel shear reinforcement provided a significant improvement in the load-bearing capacity of the stair treads. Welding can be considered as the primary connection method between the stair treads and stringers, and the comfort analysis showed that the stairs met the specified requirements.

Keywords: steel-concrete composite stairs; flexural test; finite element simulation; comfort analysis

日益紧张的能源与环境形势推动建筑业朝着节能环保、技术先进、施工高效的装配式建筑产业化方向发展。作为建筑结构中不可或缺的构件,楼梯的发展对推动装配式建筑发展意义重大。其中,预制混凝土楼梯在工厂中完成主体制作,作业人员水准高,标准化程度高,产品质量相对于现浇有很大提高^[1],且通过合理的构造可得到较好的抗弯^[2]和抗震性能^[3-4]。但自重大以及现场装配的特点对安装提出较高要求,预制楼梯如何与结构主体精准、有效地连接也是研究的重点^[5]。钢楼梯采用轻质高强度的钢材为主材料,体轻量柔,安装便捷^[6],与结构主体的连接形式多样且可靠,结构形式也更加丰富^[7],抗震^[8]和承载^[9]性能优秀,但防腐耐火性能差,轻柔的结构形式很容易因人致激励产生振动^[10],需要保证人行走的舒适度。钢-混凝土组合楼梯充分发挥两种材料的性能优势并规避了各自缺陷,具备较大刚度的同时减轻了自重,解决了预制混凝土楼梯构件自重大而影响连接和吊装的难题,有效避免了钢楼梯舒适性差、噪声扰民的情况。

Marcinkiewicz等^[11]提出了一种新型钢-混组合螺旋楼梯,在踏步内填充超高性能混凝土,并进行现场荷载试验,验证了楼梯满足规范的强度刚度要求。任旭红等^[12]提出了一种焊接型装配式钢板填充混凝土组合楼梯,钢板内焊有栓钉或者钢筋以保证与混凝土的锚固作用。李新星等^[13]在预制装配式L型楼梯板中增加了钢纤维,并进行了抗弯性能试验,发现钢纤维直径对试件延性影响较大。目前研

究大多集中在钢-混凝土组合楼梯整体承载性能上,对踏步局部的优化和舒适度的重视略有不足。

笔者通过钢-混凝土组合楼梯踏步的四点弯曲试验,研究抗剪件形式和踏步与梯梁连接方式对踏步承载性能的影响,建立可准确模拟踏步力学行为的ABAQUS模型,并在此基础上对整体楼梯的舒适度作出评价。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验设置了6个钢-混凝土楼梯组合踏步试件,编号分别为T1~T6,试件主要参数见表1。根据踏步与梯梁连接方式的不同分为简支试件和焊接试件两组,图1为楼梯踏步示意图。如图1(a)所示,简支试件两端支承在梯梁内侧预先焊好的挑耳上,挑耳两端各折起1 cm以确保踏步在水平方向上不发生较大偏移。现场施工时仅需简单安放,极大地节省了机械成本及时间,提高了施工效率。6个踏步试件跨度均为1 500 mm,踏步截面如图2所示。钢材采用Q235B钢,2 mm厚的上钢板经过弯折后与4 mm厚下钢板进行焊接,钢板围成的空腔内部灌注C30细石混凝土。4 mm厚的下钢板上焊有抗剪件,在保证抗剪件自身刚度与稳定性的前提下,选用了角钢、槽钢和栓钉3种不同的抗剪件形式,其中,栓钉直径为13 mm,高度为30 mm。角钢和槽钢均由Q235B钢板轧制而成,角钢截面为L30×15×4,槽钢截面为[30×15×4,长度均为40 mm。抗剪

件的布置情况和截面图见图 3。在工程使用中,因上钢板一直处于踩踏状态,防腐防火涂料难以起到维持上钢板原始力学性能的作用,故上钢板没有布设抗剪件。依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[14]的规定,制作 6 个边长 150 mm 的混凝土立方体试块,相同条件下养护 28 d 后进行抗压强度试验,材性试验所得混凝土立方体平均抗压强度为 30.33 MPa。依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[15]的规定,测得踏步试件的钢材力学性能,见表 2。

表 1 试件参数

Table 1 Design parameters of the specimens

试件编号	连接形式	有无抗剪件	抗剪件形式	体积含钢率/%	抗剪件间距/mm
T1	简支	有	角钢	14.22	150
T2	简支	有	槽钢	14.28	150
T3	简支	有	栓钉	14.13	150
T4	简支	无		13.98	
T5	焊接	无		14.13	
T6	焊接	有	栓钉	13.98	150

注:体积含钢率为试件所用钢材的体积与试件总体积的比值。

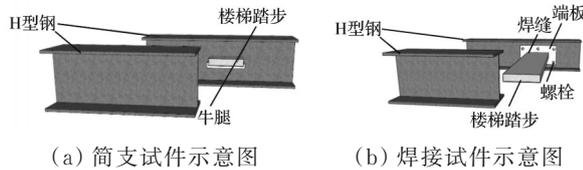


图 1 楼梯踏步示意图

Fig. 1 Stair step diagram

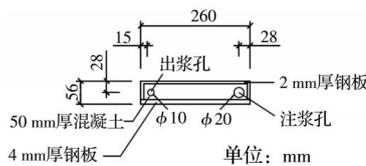


图 2 试件截面构造图

Fig. 2 Cross-sectional configuration of the specimens

1.2 试验加载及测点布设

试验通过伺服液压作动器进行加载,作动器位于试件与反力架之间,通过分配梁将力传递到试件的三分点处,相应荷载由力传感器测得。加载示意图 4。简支试件支承在铰支座上,允许试件在支座处发生弯矩作用方向上的自由转动。焊接试件即在踏步端部焊接端板,如图 4(b)所示,试验时端板通过螺栓与预留螺栓孔的支承装置紧密连接;在保证等效连接作用的同时,避免了焊接对支承装置性能的影响,有利于支承装置的重复利用和试验结果的准确性。

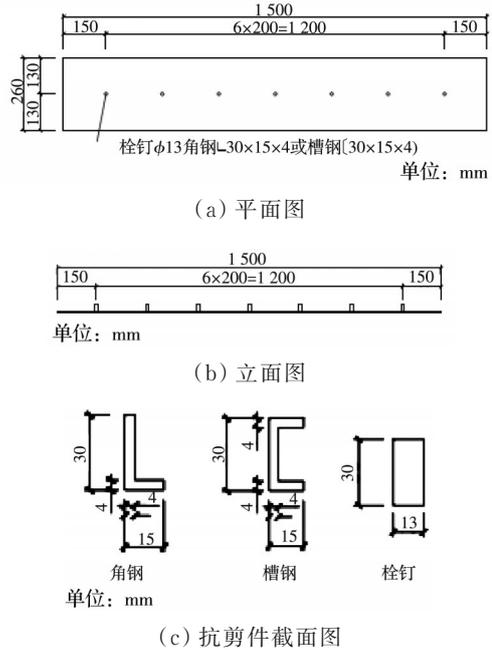


图 3 抗剪件布置图及截面图

Fig. 3 Configuration and layout of shear-resistant parts

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

钢材牌号	屈服强度 f_y / MPa	极限强度 f_u / MPa	弹性模量 E_s / MPa
Q235B	303	407	1.98×10^5

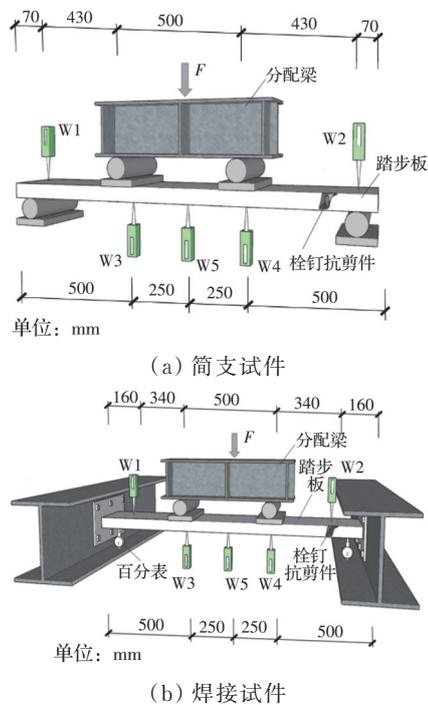


图 4 加载装置及位移计布设图

Fig. 4 Loading device and displacement meter layout diagram

采用先荷载控制、后位移控制的加载制度。加载初期加载级为 2 kN,每级持荷 5 min;试件底部钢

板接近屈服时,加载级减小为1 kN;底部钢板屈服以及单位加载级下跨中挠度增量明显变大时,转为位移加载;位移加载初始加载级为1 mm;荷载-挠度曲线进入平台段后,更改加载级至2 mm;在跨中挠度达到40 mm后,加载级增大至5 mm直至试验结束。

试验主要测量内容为:1)跨中、加载点及两端支座处挠度;2)纯弯段截面应变。应变片布设如图5所示,简支试件与焊接试件应变片布设方案一致。

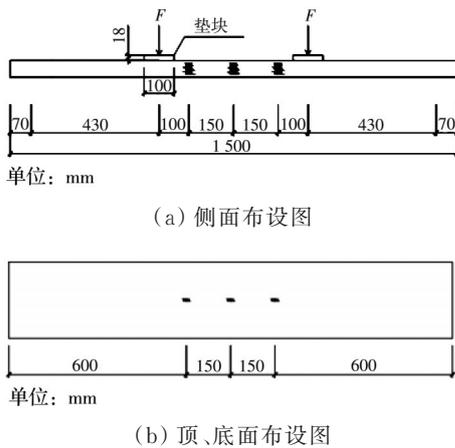


图5 应变片布设图

Fig. 5 Strain gauge layout diagram

试件加载终止条件为:1)试件断裂或钢板大面积撕裂;2)试件的跨中挠度达到 $L/20$ (L 为跨度)。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试验发现,所有的试件均发生弯曲破坏,试件在加载点附近弯折。

简支试件 T1~T4 破坏过程相似:随着加载的进行,试件内部发出混凝土开裂声响;加载到85%左右的峰值荷载时,试件一侧加载点处出现图6(a)所示的鼓曲现象;随着加载继续进行,混凝土持续压溃;在达到峰值荷载时,试件另一侧加载点附近出现图6(b)所示的鼓曲现象;之后,随着混凝土不断退出工作,试件承载力逐渐下降,当跨中挠度达到80 mm($L/20$, L 为试件长度)时,加载结束,试件破坏状态如图6(c)所示。

焊接试件 T5、T6 的破坏过程大致如下:加载到45%左右的峰值荷载时,混凝土发出开裂声响;加载到约85%的峰值荷载时,试件端部出现图7(a)所示侧边鼓曲和底板焊缝变形现象;加载到约90%的峰值荷载时,试件顶部钢板与端板间焊缝继续撕裂,如图7(b)所示;随着加载继续,焊缝继续撕裂,当跨中

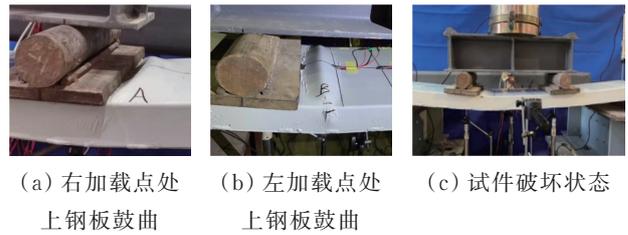


图6 简支试件试验现象

Fig. 6 Test phenomenon of simple support specimens

位移挠度为80 mm时,T5试件达到极限承载力130.4 kN,T6试件达到极限承载力133 kN,焊缝撕裂严重,停止加载。图7(c)为焊接试件停止加载后状态。



图7 焊接试件试验现象

Fig. 7 Test phenomenon of welding specimen

2.2 荷载-挠度曲线

图8(a)为简支试件 T1~T4 的跨中荷载-挠度曲线对比,可以看到:在加载初期,荷载-挠度曲线基本呈线性变化;随着加载进行,混凝土开裂以及顶部钢板鼓曲现象的出现使得试件刚度减小,荷载-挠度曲线斜率减小,直至进入平台段。之后随着试件破坏的继续,承载力逐渐降低,但挠度仍在继续发展;跨中挠度达到 $L/20$ 时,试件仍残余50%以上的承载力,表明试件具有优良的延性能力。

简支试件前期荷载-挠度曲线发展基本一致。相较于其他两种形式,含钢率最高的槽钢抗剪件试件 T2 极限承载力最高;含钢率最低的未布设抗剪件试件 T4 初始刚度要小于其他3个试件,相对于试件 T2 来说,其极限承载力仅降低了5%,残余强度仅降低了23%,承载性能相差并不明显。含钢率较低的试件 T1、T3 与含钢率最高的试件 T2 初始刚度基本相同,但极限承载力低于试件 T2,残余强度与含钢率最低的试件 T4 基本相同。

焊接试件 T5、T6 的跨中荷载-挠度曲线见图8(b),加载初期,试件承载力保持线性增长;随着加载进行,试件端部出现侧边鼓曲和底板焊缝变形现象,进入屈服状态,荷载-挠度曲线缓慢过渡到平台段;之后的加载过程中,尽管端部焊缝开始撕裂,两个焊接试件并未出现承载力降低的情况,直到试验结束。从荷载-挠度曲线的平稳变化可以看出,焊缝的

撕裂是一个缓慢开展的过程,且在试件端部焊缝彻底断开之前,试件的承载力一直在小幅上涨,证明焊接型钢-混凝土组合楼梯踏步在实际工程应用中具有足够的延性和可靠性。

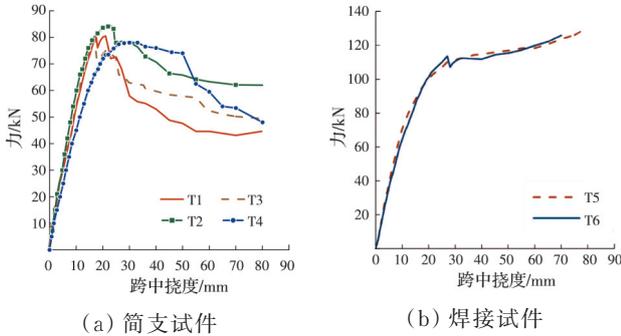


图 8 试件荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves of specimens

焊接试件的承载性能基本不受抗剪件的影响,且优于简支试件。推测原因是踏步两侧的焊接端板起到了较强的约束作用,保证了混凝土与钢材的协同工作。简支试件的抗弯承载力主要由底部钢板抗拉、上部钢板和混凝土抗压提供。焊接试件的端部刚接使得楼梯踏步的抗弯性能提升了很多,上下钢板与填充混凝土性能得到了充分发挥。

所有布设抗剪件的试件 T1~T3、T6 在接近极限承载力时会出现荷载突降后回升的情况。分析原因可能是:在试件达到极限承载力前,与混凝土、钢板接触面积不同的抗剪件有效地保证了混凝土与下钢板协同工作,混凝土与下钢板的相对滑移很小;当试件达到极限承载力后,由于抗剪件的作用减弱,承载力出现突降;同时,随着加载位移增大,抗剪件周边混凝土中的剪切裂缝部分闭合,荷载出现小幅回升。而未布置抗剪件的试件 T4、T5 承载性能则较为稳定,不会出现荷载突降后回升现象。体积含钢率与极限承载力、初始刚度和残余强度之间不具备明显联系。

2.3 应变分布

简支试件在达到极限承载力之前都近似符合平截面假定。以试件 T1 为例,纯弯段截面的应变分布如图 9(a) 所示,横坐标为应变,纵坐标为截面高度, P_u 为试件的极限承载力。从图 9(a) 可以看出,试件截面应力分布近似线性,试件基本能保持协调变形。

焊接试件以 T5 为例,由图 9(e) 可以看到,承载力达到 $0.7P_u$ 之前,试件符合平截面假定。由于边界条件对内力分布的改善,试件达到屈服状态后其承载力仍一直提升。当承载力达到 $0.9P_u$ 时,截面应变已经远大于简支试件截面应变,钢材性能得到

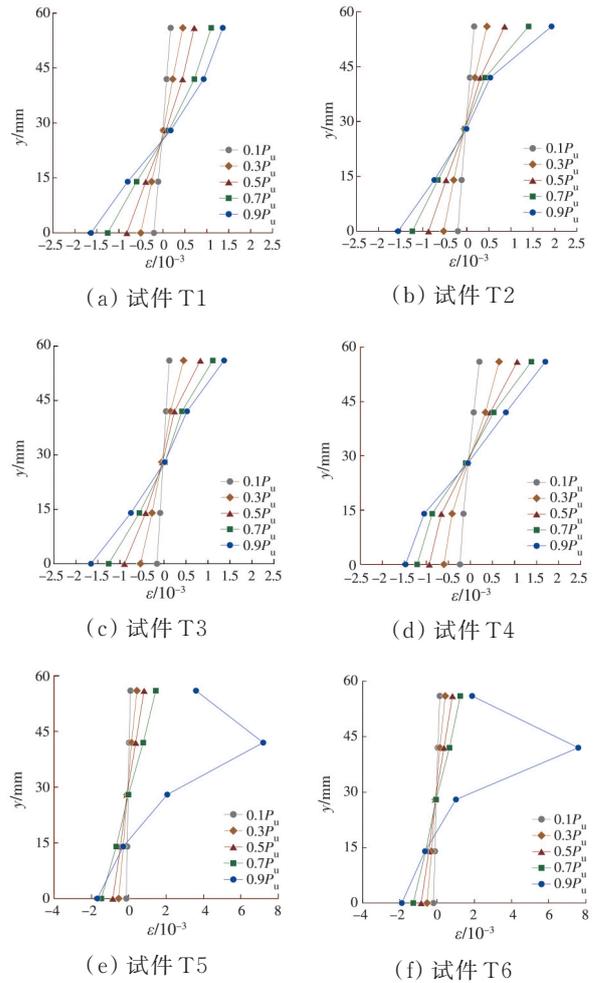


图 9 试件应变分布图

Fig. 9 Strain distribution of the specimens

充分利用。截面中间部分已经接近应变极限,与侧面鼓曲的试验现象吻合。

3 有限元模拟

3.1 模型建立

采用 ABAQUS 软件对预制钢-混凝土组合楼梯踏步进行模拟分析。钢板和混凝土均采用实体单元建模,单元类型为 C3D8R。抗剪件与底部钢板之间采用 Tie 连接,抗剪件与混凝土之间采用内置区域模拟嵌入作用,钢板与混凝土之间设置面面接触。面面接触界面的法向采用“Hard”接触,设置允许接触后分离;界面的切向采用“Penalty”,摩擦系数设为 0.3。在构件跨中位置上沿 Y 方向偏移 30 mm 定义一个参考点 RP,并施加集中荷载。对两个顶部垫块的加载面进行耦合约束,以避免加载过程中的应力集中。刚性支座与下钢板底面设置面面接触,同时将刚性支座的底面完全固定以模拟固定铰支座。

采用混凝土损伤塑性模型模拟混凝土的开裂和压溃等破坏行为,为平衡模型迭代的收敛性与准

确性,混凝土的黏滞系数取 0.001,其余参数取组合结构中的默认值。钢材本构采用三折线弹塑性模型^[16],相关参数根据实测材性试验取值。

3.2 模拟结果

图 10 为有限元模拟试件变形图,与试验结果吻合良好。

图 11 为有限元分析和试验所得荷载-挠度曲线的对比,可以看出,简支试件在达到极限承载力之前的模拟结果与试验结果吻合良好,证明模型具有足够的精确度。但在塑性阶段,试件的模拟结果与试验结果相差较大。这是因为在有限元模拟中,材料本构、边界条件、试件加工质量等均较为理想,与实际情况有一定差距。焊接试件中,试验结果和模

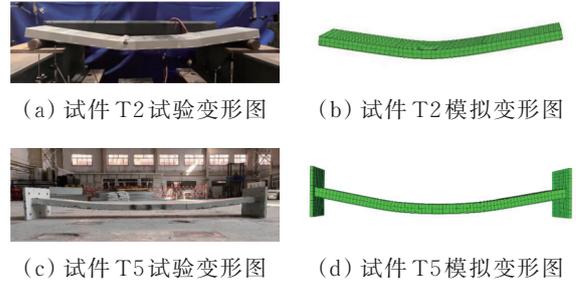


图 10 试件变形图

Fig. 10 Deformation diagrams of test pieces

拟结果吻合较好,试验中的焊缝撕裂在有限元模拟中并未出现;因此可以看到跨中挠度达到 70 mm,即焊缝开始撕裂时,承载力模拟值开始明显高于试验值。

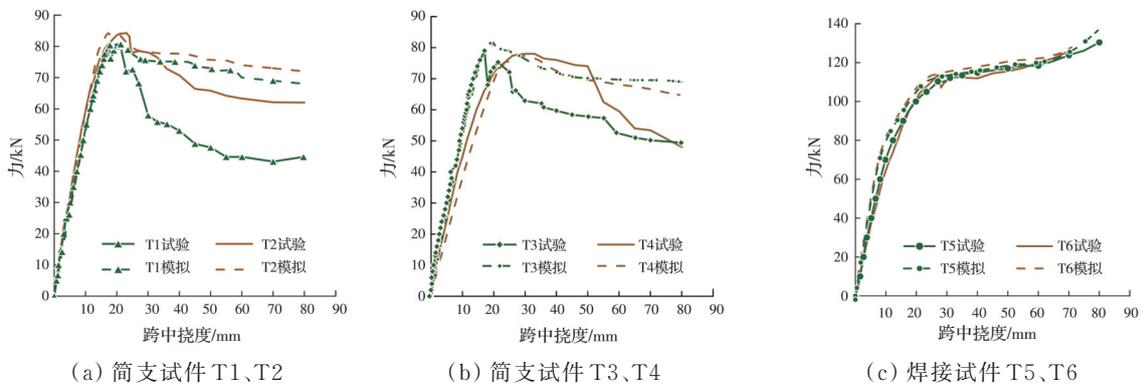


图 11 试验与模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulation results

试件变形和荷载-挠度曲线的良好吻合证明了所建模型能很好地模拟楼梯踏步的抗弯性能,可用于后续钢-混凝土组合楼梯的舒适度分析。

4 舒适度分析

楼梯的行走舒适度是衡量楼梯使用功能的一个重要标志。考虑到钢-混凝土组合楼梯以钢结构为主体且自重较轻的优势,本节从自振频率和峰值加速度响应两方面对其舒适度进行分析。

4.1 模态分析

采用 ABAQUS 软件对焊接型整体楼梯进行模态分析,图 12 为其前三阶振型图,各阶自振特性见表 3。可以看出,楼梯振动以竖向振型为主,在后续分析中可不考虑侧向及扭转因素。潘宁等^[17]提出楼梯振动响应以一阶振型为主,钢-混凝土组合楼梯一阶自振频率为 35.67 Hz,满足规范^[18]中竖向振动频率不宜小于 3 Hz 和文献^[19]中建议的楼梯一阶频率不小于 10 Hz 的要求。

4.2 振动分析

楼梯上一个周期内单人行走步行力时程曲线

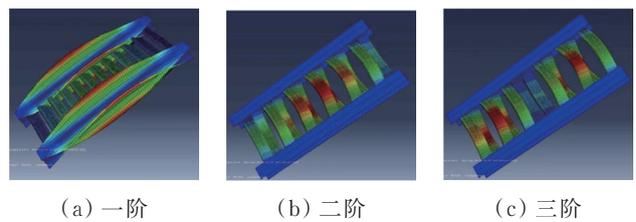


图 12 钢-混凝土组合楼梯振型

Fig. 12 The composite pattern of the steel-concrete combination staircase

表 3 钢-混凝土组合楼梯自振特性

Table 3 Self-vibration characteristics of steel-concrete composite stair

振型阶数	振型方向	振动频率/Hz
1	竖向振动	35.67
2	竖向振动	45.15
3	竖向振动	45.42

的傅里叶级数模型可由式(1)表示。

$$F(t) = G + G \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \sin(2i\pi p t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中:G 为行人体重;p 为行人步频; α_i 为第 i 阶动荷

载系数,本文根据周彬等^[20]的建议,取前3阶动荷载系数为0.5、0.2、0.1; φ_i 为第*i*阶动荷载的谐波相位角,通常为0。

采用单人行走步行力模型,进行钢-混凝土组合楼梯在单人激励作用下的动力响应分析。忽略行人体重的随机性, G 统一取700 N。行人步频 p 取1.85 Hz。设置每一级踏步中点为加载点,根据式(1)确定单人步行力时程荷载,并按照行人行走时间间隔赋予每级加载点相应的起止时间。结合前三阶振型图,选取梯段顶部、跨中、底部作为加速度响应点,加速度时程曲线如图13所示。分析结果显示,楼梯中间踏步加速度响应最大,为0.194 m/s^2 ,小于规范中0.5 m/s^2 的限值。

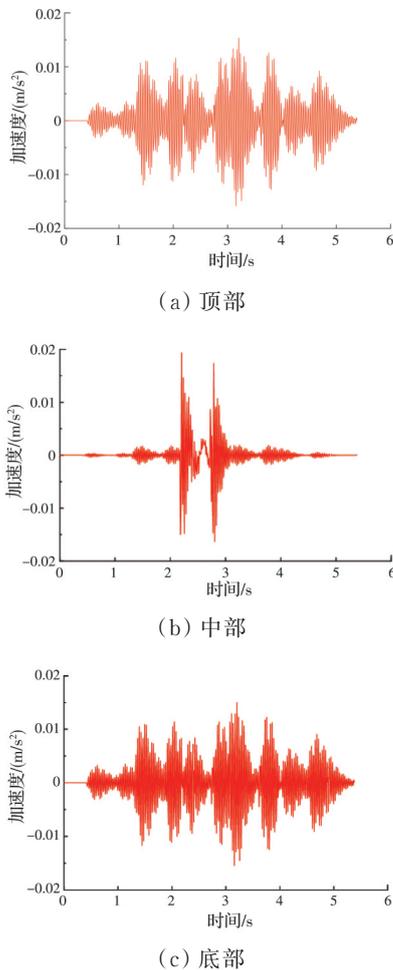


图13 楼梯加速度响应

Fig. 13 Stair acceleration response

采用简化后的移动多人步行力法^[21]对楼梯在人群荷载作用下的加速度响应进行分析。假设行人行走步频服从均值1.85 Hz、方差0.1 Hz的正态分布。以0.1 Hz为差值,截取5组步频,根据式(1)生成相应的步行力模型,施加在楼梯每级踏步中点上,并随机给予不同的起始时间。此种方法下楼梯振型反应最大点(楼梯中间踏步)处的加速度响应

如图14所示。峰值加速度响应为0.386 m/s^2 ,小于规范中0.5 m/s^2 的限值。

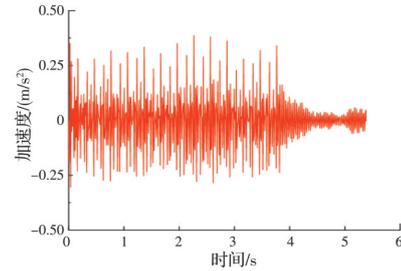


图14 加速度响应时程曲线

Fig. 14 Acceleration response time course curve

5 结论

进行了6个预制钢-混凝土组合楼梯踏步的四点弯曲试验,并开展了有限元模拟和舒适度分析,得出以下结论:

1)相比于栓钉和角钢抗剪件,带槽钢抗剪件的钢-混凝土组合楼梯踏步简支试件的抗弯承载力最大。

2)抗剪件的布设对焊接试件的承载性能基本没有影响,且焊接试件的承载力远高于简支试件,可作为钢-混凝土组合楼梯踏步与梯梁的主要连接方式。

3)舒适度分析结果表明,楼梯整体的自振频率和峰值加速度响应均在规范允许的限值之内,证明楼梯满足行走的舒适度需求。

参考文献

- [1] 房冬梅. 预制装配式混凝土楼梯设计与应用[J]. 建筑结构, 2016, 46(Sup1): 637-640.
FANG D M. Design and application of precast concrete staircases [J]. Building Structure, 2016, 46(Sup1): 637-640. (in Chinese)
- [2] 刘文政, 崔士起. 预制预应力混凝土楼梯抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(16): 8-15.
LIU W Z, CUI S Q. Experimental research on flexural behavior of precast prestressed concrete stairs [J]. Building Structure, 2021, 51(16): 8-15. (in Chinese)
- [3] CHOURASIA A, KAJALE Y, SINGHAL S, et al. Seismic performance assessment of two-storey precast reinforced concrete building [J]. Structural Concrete, 2020, 21(5): 2011-2027.
- [4] 吴韬, 蒋敏, 刘洋, 等. 分离式预制楼梯应用于装配式框架的抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2014, 44(13): 40-43, 101.
WU T, JIANG M, LIU Y, et al. Seismic performance analysis of separated prefabricated stairs used in the assembly frame [J]. Building Structure, 2014, 44(13):

- 40-43, 101. (in Chinese)
- [5] CHANG K K, SEO D W, CHUN Y S. Development of improved PC stair connections using U-rods [J]. LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs, 2011, 2 (4): 509-516.
- [6] 叶建长, 沈君冰, 赵泳锋, 等. 免模架钢混凝土组合楼梯的应用[J]. 建筑施工, 2022, 44(10): 2353-2355, 2367.
- YE J C, SHEN J B, ZHAO Y F, et al. Application of formwork-free steel-concrete composite stairs [J]. Building Construction, 2022, 44(10): 2353-2355, 2367. (in Chinese)
- [7] 王宇. “8”字型旋转钢楼梯设计与分析[J]. 工程建设, 2021, 53(9): 25-32.
- WANG Y. Design and analysis on an “8”-shaped rotating steel staircases [J]. Engineering Construction, 2021, 53(9): 25-32. (in Chinese)
- [8] 谈丽华, 常瀚, 路江龙, 等. 预应力交叉张弦钢楼梯的设计和研发[J]. 钢结构, 2015, 30(2): 30-33.
- TAN L H, CHANG H, LU J L, et al. Design and research on prestressed cross-string steel stair [J]. Steel Construction, 2015, 30(2): 30-33. (in Chinese)
- [9] KIM. Evaluation of vibration and structural performance of an innovative sliding step steel stair using full-scale mock-up test [J]. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2014, 26(6): 511.
- [10] 韩东晓. 既有钢结构旋转楼梯舒适度数值模拟分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(Sup1): 1501-1504.
- HAN D X. Numerical simulation of comfort improvement of existing steel structure revolving stairs [J]. Building Structure, 2021, 51(Sup1): 1501-1504. (in Chinese)
- [11] MARCINKIEWICZ K, WELLS M. Staircase showcase for ultra-high-strength fibre-reinforced concrete [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering, 2014, 167(3): 131-137.
- [12] 任旭红, 杨玉栋. 新型钢板填充混凝土组合楼梯的创新实践[C]//2020年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册), 北京, 2020: 473-475.
- REN X H, YANG Y D. Innovative practice of new type of Ssteel-box-tread filled concrete composite staircase in prefabricated buildings with steel structure [C]// Proceedings of 2020 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (Volume 2), 2020: 473-475. (in Chinese).
- [13] 李新星, 周泉, 李水生. 装配式L型UHPC楼梯板受弯性能试验研究 [C]//中国土木工程学会2021年学术年会论文集. 长沙, 2021: 69
- LI X X, ZHOU Q, LI S. Experimental study on bending performance of assembly L-type UHPC stair plate [C]//Proceedings of 2021 Annual Conference of China Civil Engineering Society, 2021: 69. (in Chinese).
- [14] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Standard for test methods of concrete physical, and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [16] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHAO H T. Steel and concrete composite structure [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [17] 潘宁, 方伟, 李刚强, 等. 人行荷载下楼板振动响应试验研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(13): 31-35, 62.
- PAN N, FANG W, LI G Q, et al. In-situ test study on floor vibration response under walking loads [J]. Building Structure, 2017, 47(13): 31-35, 62. (in Chinese)
- [18] 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准: JGJ/T 441—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- Technical standard for vibration comfort of building floor structures: JGJ/T 441—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [19] BISHOP N W M, WILLFORD M, PUMPHREY R. Human induced loading of flexible staircases [J]. Safety Science, 1995, 18(4): 261-276.
- [20] 周彬, 任晓崧, 吕西林. 行人激励作用下室内旋转钢楼梯振动分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 128-132.
- ZHOU B, REN X S, LV X L. Vibration analysis of indoor spiral steel stair under pedestrians' activity [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 128-132. (in Chinese)
- [21] 杨必峰. 大跨钢结构楼梯的舒适度分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(Sup2): 662-667.
- YANG B F. Vibration comfort analysis of long-span steel stair [J]. Building Structure, 2019, 49(Sup2): 662-667. (in Chinese)