

模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板力学性能研究

苏信智¹, 李维超², 杨臻³, 邵华⁴, 乔文涛^{2*}

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 石家庄 050022; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 4. 河北汇智电力工程设计有限公司, 石家庄 050030)

摘要: 模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板是一种新型的装配式结构形式, 具有装配率高、预制率高、连接方便、自重轻等特点, 为研究该复合楼板的抗弯承载力和连接节点的力学性能, 对其进行了试验研究及有限元分析。通过试验发现模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板具有良好的变形能力且试件最终的破坏特征为弯曲破坏; 当加载至极限荷载时, 复合楼板和钢梁连接良好, 连接节点未出现明显塑性变形。之后在试验的基础上, 建立了精细化有限元模型, 进行了参数分析。结果表明, 纵筋配筋率从0.45%提升至1.39%时, 复合楼板的极限抗弯承载力提高了108.22%, 说明纵筋配筋率是影响复合楼板承载力的关键因素; 型钢厚度从1.2 mm增加至2.0 mm时, 复合楼板的极限抗弯承载力增加了16.17%, 说明型钢厚度对复合楼板承载力有一定影响; 混凝土强度从C25到C50时, 复合楼板的抗弯承载力仅提高了4.89%, 说明混凝土强度对复合楼板承载力的影响最小。

关键词: 装配式建筑; 冷弯薄壁型钢; 模块化复合楼板; 抗弯性能; 参数分析

中图分类号: TU398+.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0013-08

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240511001

Mechanical Performance Study of Modular Light Steel-Concrete Sandwich Composite Floors

SU Jizhi¹, LI Weichao², YANG Zhen³, SHAO Hua⁴, QIAO Wentao^{2*}

(1. State Grid Electric Power Co., Ltd. Economic and Technological Research Institute, Shijiazhuang 050022, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 4. Hebei Huizhi Electric Power Engineering Design Co., Ltd., Shijiazhuang 050030, China)

*Corresponding author: qwt@stdu.edu.cn

Abstract: Modular light steel-concrete sandwich composite floor is a new type of prefabricated structure, which has the characteristics of high assembly rate, high prefabrication rate, easy connection and light self-weight, etc. In order to determine the flexural bearing capacity and mechanical properties of the joint, the composite floor is tested and analyzed by finite element method. It is found that the composite floor with modular light steel-concrete sandwich has

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 河北省杰出青年科学基金项目(E2022210084), 国网河北省电力有限公司(河北汇智电力工程设计有限公司科技研发资助项目 HZHTCG2023-07)

作者简介:

苏信智(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事装配式建筑结构及绿色建造方面的研究。E-mail: sujizhi1989@163.com。

李维超(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式建筑方面的研究。

通信作者:

乔文涛(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事创新结构与智能建造方面的研究。E-mail: qwt@stdu.edu.cn。

good deformation ability and the specimens show bending failure characteristics. When the composite floor is loaded to the ultimate load, the connection between the composite floor and the steel beam is good, and the joint does not have obvious deformation. On the basis of experimental results, a refined finite element model is established and a variable parameter analysis is carried out. The results show that increasing the longitudinal reinforcement ratio from 0.45% to 1.39% leads to a 108.22% improvement in the ultimate flexural capacity, which indicates that the longitudinal reinforcement ratio is the key parameter affecting the bearing capacity of composite floors. Increasing the thickness of the section steel from 1.2 mm to 2.0 mm results in a 16.17% improvement in the ultimate flexural capacity, indicating that the section steel thickness has a certain influence on the bearing capacity. Increasing the concrete strength from C25 to C50 improves the flexural capacity by only 4.89%, demonstrating the concrete strength has the least influence on the bearing capacity.

Keywords: prefabricated construction; cold-formed thin-walled steel; modular composite floor; flexural performance; parameter analysis

相比传统现浇混凝土结构,装配式结构因建造过程节能低碳、绿色环保,在全球许多国家得到广泛应用^[1]。近年来,在政策引导和市场需求的推动下,我国装配式建筑得到空前快速发展。国内外越来越多的学者对装配式建筑结构开展深入研究,并不断优化传统装配式结构部件,使其整体连接受力更合理、工厂加工制作更快捷、现场装配施工更高效^[2-4]。

在装配式建筑结构领域,对竖向承重构件的研究较多,FU等^[5]对装配式剪力墙的连接方式进行了创新,提出了一种新的装配式钢筋混凝土剪力墙连接方式,并对影响新型装配式钢筋混凝土剪力墙的关键因素进行了参数分析,为后续设计提供了依据。DI等^[6]针对装配式柱与基础的连接方式,提出了两种柱基连接形式的预制混凝土填充钢管柱体系,通过对比分析了不同柱基连接形式、钢管厚度等对预制混凝土填充钢管柱体系的影响情况。

相比竖向承重构件,对水平受力构件(如楼板)的研究相对较少。当前工程中应用较多的装配式楼板形式仍然以钢筋桁架叠合板为主^[7-9]。庞瑞等^[10]提出了分布式连接全装配RC楼盖,并对楼盖竖向承载力计算方法进行了研究,提出了新型楼盖横向刚度计算方法。LEAL等^[11]提出了钢筋桁架结构和混凝土板复合系统以及该系统的抗剪连接件,并对连接件和复合楼板系统进行了研究,试验证明抗剪连接件和复合楼板系统的抗弯能力均较好。LU等^[12]对一种新型U型钢-混凝土组合楼板进行了试验及有限元分析,证明了该组合楼板具有较好的抗震性能,可用于大跨度楼板系统。PANTELIDES等^[13]对一种由钢筋混凝土T形截面组成的新型预制复合楼板系统进行了研究,并展望了该系统在模块化建筑中的应用前景。

上述装配式楼板形式仍然存在现场需要浇筑大量混凝土、干法连接的方式容易开裂和适用性不够广泛等问题。为了改善上述问题,学者们提出了一种新型模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板结构,并对其开展了抗弯

承载力研究^[14-16]。该复合楼板与周边梁采用方钢管套筒连接,然而上述研究中未考虑套筒连接的影响,仅按照两端铰接进行分析。因此,本文将在已有研究基础上,考虑组合楼板与钢梁连接的相互作用,通过试验和有限元分析对该复合楼板及套筒的力学性能开展深入研究。

1 试验概况

1.1 试件设计及材料性能

模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板构造如图1所示。型钢骨架由4根3700 mm冷弯薄壁C型钢和2根1300 mm冷弯薄壁C型钢组成,C型钢截面为80 mm×30 mm×10 mm×1.8 mm,C型钢采用开口相对的布置方式,并在中间填充聚苯乙烯泡沫板(EPS)。复合楼板上、下两侧布置纵筋和分布筋,层间钢筋由拉结筋连接,最后浇筑混凝土。复合楼板整体跨度为4000 mm,板厚为180 mm。

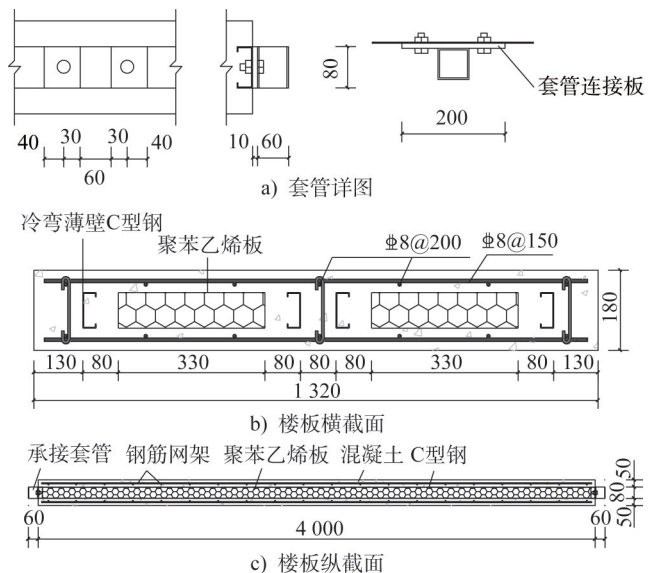


图1 复合楼板详细构造(单位:mm)

Fig. 1 Detail of composite floor (unit: mm)

复合楼板与钢梁通过承插套管连接,钢梁插接套管采用长50 mm、宽50 mm、高180 mm、厚度为3 mm的方钢管,方钢管的横截面焊接在钢梁上。复合楼板承插套管采用长60 mm、宽60 mm、高80 mm、厚度为3 mm的方钢管。将承插套管与连接板焊接,然后整体栓接到复合楼板的C型钢上。在复合楼板两侧各设置两个承插套管,并在钢梁的对应位置设置两个插接套管,保证构件准确连接,最后用混凝土浇筑。C型钢、方钢管均采用Q235钢,复合楼板构件的其他参数详见表1。

表1 构件参数

Table 1 Parameters of component

试件编号	钢材牌号	钢筋直径	钢筋型号	混凝土强度
CL-1	Q235	8 mm	HRB400	C30

按照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)进行金属材料性能试验和混凝土强度试验,试验结果如表2、表3所示,材料性能试验的现场照片如图2所示。

表2 钢材材料性能

Table 2 Material properties of steel

材料名称	直径或厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
型钢	1.8	243.62	315.51
钢筋	8.0	438.87	624.20

表3 混凝土试验测试结果

Table 3 Test results of concrete

混凝土强度等级	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
C30	28.9	29 546

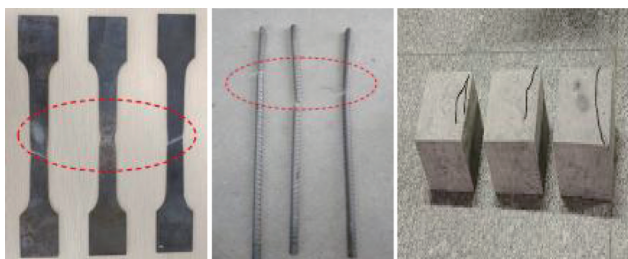


图2 材料性能试验现场照片

Fig. 2 On-site photos of material property test

1.2 加载装置及加载方案

试验装置主要由液压作动器、分配梁和复合楼板试件组成。试验采用两点对称加载的方式,首先在试件的两个三分点设置二级分配梁,其次在二级分配梁上放置一根工字钢梁,作为一级分配梁,最后通过液压作动器进

行加载,加载装置如图3所示。



图3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading setup

在正式加载之前,首先对复合楼板进行预加载,消除试件与加载装置之间的缝隙。正式加载从0开始,初期以10 kN为单位进行分级加载,每级加载时记录复合楼板的跨中竖向位移与裂缝出现时的荷载和开裂位置。加载至极限荷载的80%后,调整为5 kN为单位继续加载,并记录竖向位移和裂缝发展情况,直到复合楼板达到极限承载力时停止加载。

1.3 测点布置

为了更好地观察板内纵筋和C型钢在试验过程中的应变情况,在跨中部位的上部纵筋位置和跨中C型钢上翼缘、腹板中部以及下翼缘位置,沿板长方向布置应变片,具体测点布置如图4、图5所示。

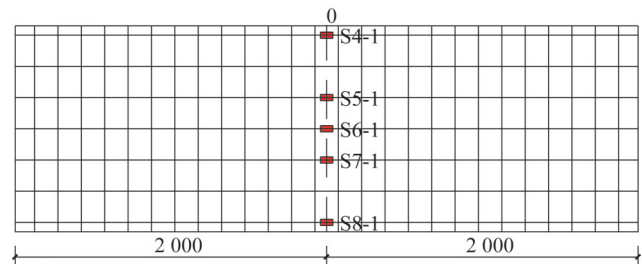
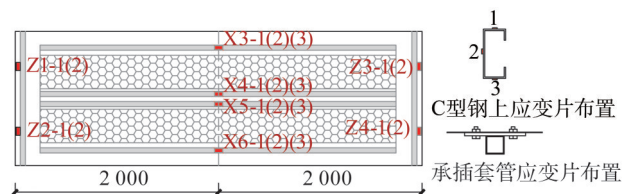


图4 纵筋应变片布置示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of longitudinal reinforcement strain gauge arrangement (unit: mm)



注:应变片编号末位“1”表示布置于型钢上翼缘,“2”表示布置于腹板中部,“3”表示布置于下翼缘。

图5 C型钢应变片布置示意图(单位:mm)

Fig. 5 Schematic diagram of C-section steel strain gauge arrangement (unit: mm)

2 试验结果分析

2.1 试件破坏分析

模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板的试验破坏现象如图6所示。当荷载加至极限荷载的11%时,在板底部位开始出现裂缝,并迅速向板的两端延伸,复合楼板侧面及后期浇筑的承插套管部位也逐渐出现细小的竖向裂缝,而跨中竖向变形并不明显;当加载至极限荷载的75%时,板底部和侧面裂缝数量缓慢增加,跨中位移继续增大,板端的承插套管位置出现较大裂缝;当加载至极限荷载时,板底混凝土与型钢之间的黏结界面开裂,端部混凝土与型钢之间,以及与承插套管之间的界面几乎完全开裂,并出现细微混凝土掉落现象,竖向变形已超过规范规定的极限值,此时复合楼板达到极限承载力。

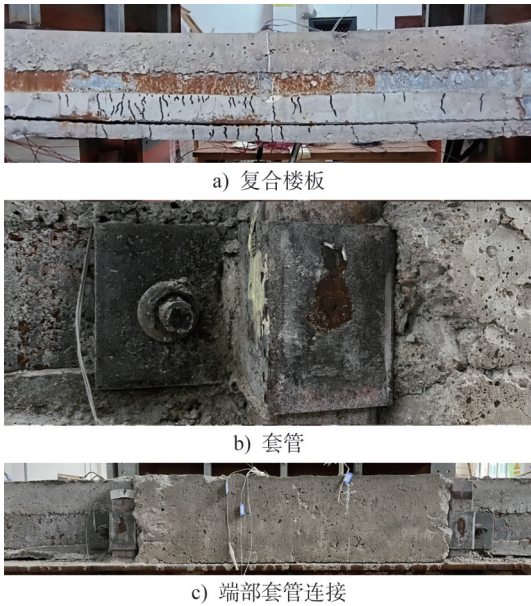


图6 试件破坏现象

Fig. 6 Failure phenomena of specimen

从加载开始到加载至极限荷载的过程中,复合楼板裂缝及位移均缓慢发展,未发生脆性破坏,复合楼板试件呈弯曲破坏形态,裂缝主要集中出现在板底跨中区域,说明复合楼板的变形能力较好。尽管复合楼板已达到极限荷载,并发生了较大位移,最终破坏,但是通过观察板内套管位置,发现套管未发生屈曲,表明复合楼板和钢梁连接效果较好,达到了刚性连接的效果。

2.2 荷载-挠度曲线

图7是复合楼板跨中部位荷载-挠度曲线。由图可知,模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板受力过程经历了弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。

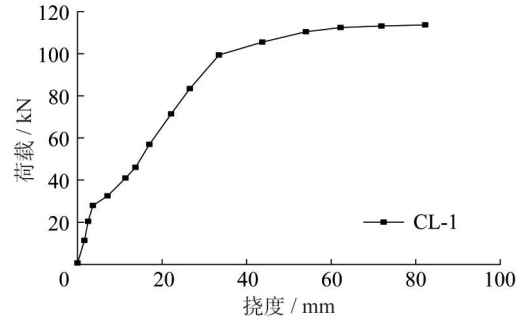


图7 跨中荷载-挠度曲线

Fig. 7 Mid-span load-deflection curve

由图7可知,试验加载初期,试件受力较小,整体处于弹性阶段;随着荷载的增大,受拉区混凝土开始出现裂缝,此时荷载主要由C型钢及下部纵筋承担,试件进入弹塑性阶段;当加载至试件屈服荷载时,混凝土、C型钢及钢筋协同作用减小,混凝土裂缝开始迅速扩展;之后继续加载,荷载增幅减小,直至试件破坏。在受力过程中,试件整体未发生突然破坏现象,说明复合楼板具有较好的延性。

2.3 应变曲线

2.3.1 纵筋

图8为板顶跨中部位纵筋应变曲线。混凝土开裂前,板顶纵筋应变缓慢增长,试件处于弹性阶段;随着荷载的增加,混凝土开裂,纵筋应变增幅变大;加载至屈服荷载时,纵筋应变快速增长,直至极限值。由试验数据可知,板中位置的纵筋应变较小,边缘位置的应变较大,整体发展趋势与试验现象基本一致。

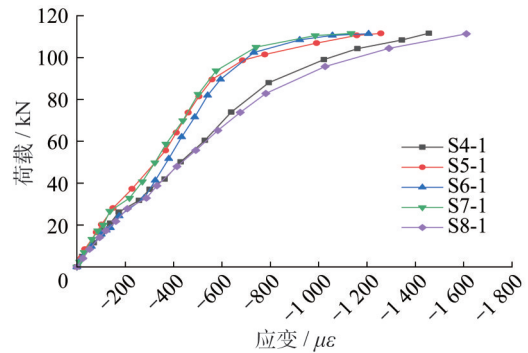


图8 板顶跨中部位纵筋应变曲线

Fig. 8 Strain curves of longitudinal reinforcement at the mid-span of the floor top

2.3.2 型钢

图9至图11分别为跨中部位C型钢下翼缘、腹板以及上翼缘荷载-应变曲线。在整个试验过程中,C型钢下翼缘、腹板一直处于受拉状态。混凝土开裂前,C型钢的

下翼缘及腹板的应变随荷载的增加缓慢增长,开裂后,C型钢的下翼缘及腹板应变迅速增长。初期复合楼板变形较小,C型钢上翼缘完全受压,随着复合楼板变形增大,中性轴上移,上翼缘的受力状态由受压转为受拉,直至复合楼板破坏。

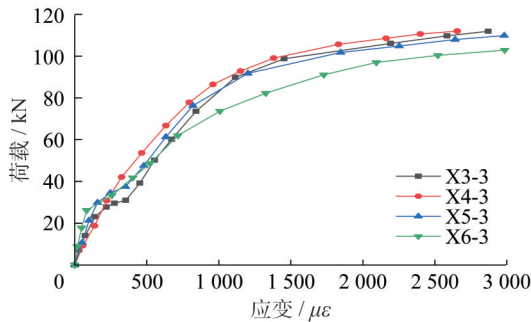


图9 跨中部位C型钢下翼缘应变曲线
Fig. 9 Strain curves of the lower flange of C-section steel at the mid-span

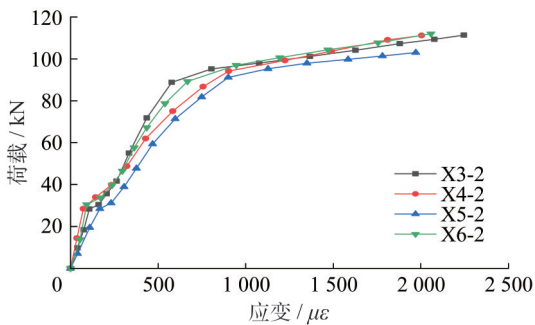


图10 跨中部位C型钢腹板应变曲线
Fig. 10 Strain curves of the web of C-section steel at the mid-span

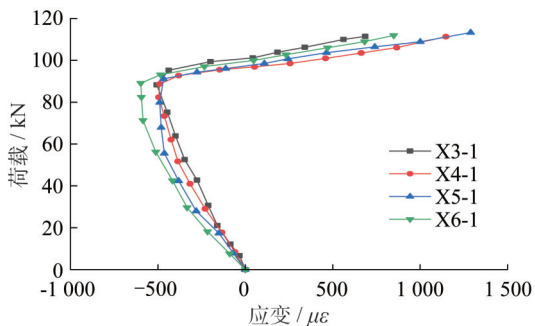


图11 跨中部位C型钢上翼缘应变曲线
Fig. 11 Strain curves of the top flange of C-section steel at the mid-span

2.3.3 承插套管

图12为承插套管的荷载-应变曲线。由图可知,套管始终处于受拉状态,在复合楼板由弹塑性阶段到塑性阶段时,复合楼板变形幅度增大,导致套管应变随荷载变

化较快,但套管整体变形较小。当复合楼板达到极限荷载时,套管未发生屈曲,复合楼板和钢梁连接效果较好。

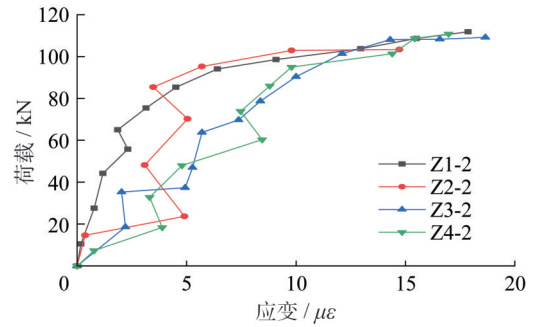


图12 承插套管应变曲线
Fig. 12 Strain curves of socket bushing

3 有限元模型的建立

3.1 型钢复合楼板变参数试件设计

以试验中试件的变形破坏模式和初步模拟分析结果为依据,并考虑试验及有限元模拟中承插套管受力性能及变形特点,选择混凝土强度等级、纵筋配筋率和C型钢厚度3个影响因素进行参数分析。其中CL-1为试验复合楼板的仿真模型,CL-2至CL-10为在CL-1基础上的变参数模型。上述试件均通过ABAQUS软件进行有限元分析,得到10个试件的荷载-挠度曲线,各模型的详细参数见表4。

表4 模型参数

Table 4 Model parameters

试件编号	混凝土强度	型钢厚度 t/mm	钢筋直径/mm	复合楼板厚度/mm
CL-1	C30	1.8	8	180
CL-2	C30	1.2	8	180
CL-3	C30	1.5	8	180
CL-4	C30	2.0	8	180
CL-5	C30	1.8	10	180
CL-6	C30	1.8	12	180
CL-7	C30	1.8	14	180
CL-8	C25	1.8	8	180
CL-9	C40	1.8	8	180
CL-10	C50	1.8	8	180

3.2 复合楼板建模

根据试验构件建立精细化有限元模型,混凝土本构模型采用混凝土塑性损伤模型来模拟,并选用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的混凝土本构模型对

混凝土塑性阶段的应力-应变关系进行计算,损伤因子根据李兆霞^[17]提出的描述材料损伤的应变等效原理来确定。冷弯薄壁型钢弹性模量 $E_s=2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比为0.3,其应力-应变关系采用ABDEL-RAHMAN等^[18]提出的四折线本构模型。钢筋的本构关系模型采用双折线模型,其中钢筋弹性模量 $E_s=2.00 \times 10^5$ MPa,泊松比为0.3。

模型包括混凝土、C型钢、钢筋、承插套管和钢垫板5部分。在模型单元选择上,混凝土、承插套管以及钢垫板采用实体单元C3D8R模拟,钢筋采用桁架单元T3D2模拟,C型钢采用S4R壳单元模拟。钢垫板和复合楼板主体采用绑定约束,分别设置在板顶的三分点处和板底的端部,并将C型钢和钢筋采用内置方式嵌入到混凝土中,在钢垫板上、下表面分别建立耦合点,根据实际情况对边界进行约束,一端设为 $U_1=U_2=U_3=U_{R2}=U_{R3}=0$,另一端设为 $U_1=U_2=U_{R2}=U_{R3}=0$ 。

在测试复合楼板各项性能时,采用静力通用模式,并选择非线性模式,在板顶三分点处施加竖向65 mm的位移荷载,最后根据应力云图和构件的应力-应变曲线对构件的失效进行判定。由于初始缺陷对此类钢-混凝土组合楼板结构影响较小,为了便于计算,在有限元模型中忽略初始缺陷的影响。有限元模型如图13所示。

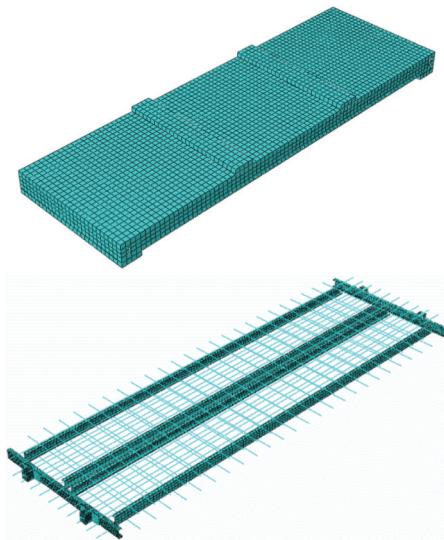


图13 有限元模型

Fig. 13 Finite element model

4 试验与有限元验证

4.1 破坏特征对比

图14为有限元应力云图与试验破坏特征对比。通过对比可知,CL-1的挠曲变形和试验试件的挠曲变形基本一致,复合楼板跨中应力较大,符合受弯破坏的特征。承插套管应力分布均匀,应变较小,试验和模型的破坏特征基本相同。

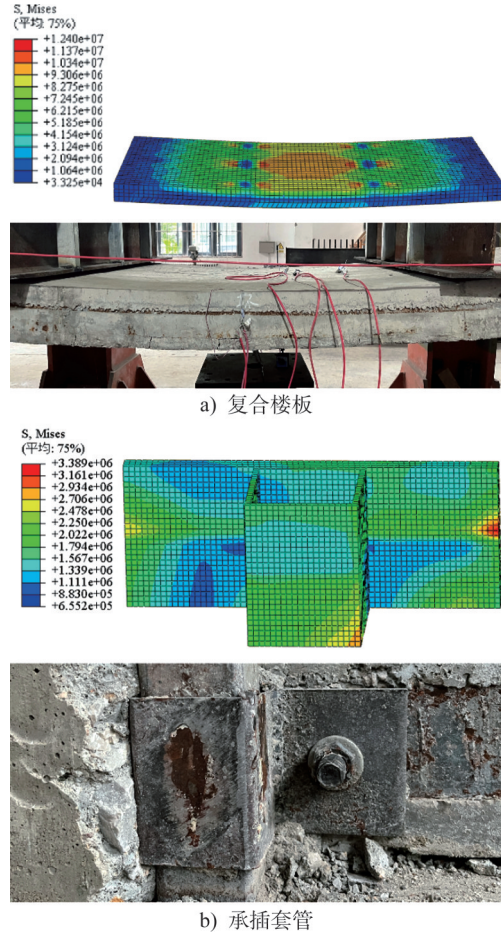


图14 有限元应力云图与试验破坏特征对比(单位:Pa)

Fig. 14 Comparison between stress contour of FEM and test failure characteristic (unit: Pa)

4.2 荷载-位移曲线验证

由图15可知,有限元软件计算曲线和试验数据曲线变化趋势一致,极限位移和极限荷载值相近,验证了有限元模型的可靠性。有限元模拟时试件的材料属性、边界条件均为理想状态,而在实际浇筑过程中试件不可避免会存在一定的加工误差,另外,试件的几何缺陷也会对试验结果造成一定影响,从而导致试验中试件的挠度更大,但总体上有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

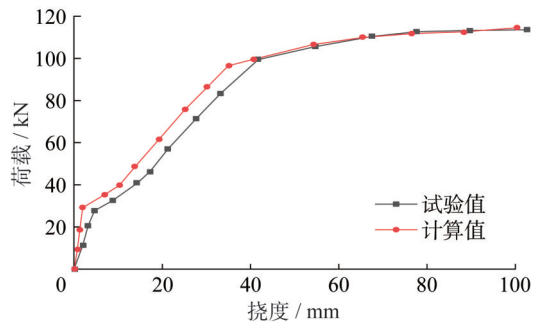


图15 有限元计算结果与试验荷载-挠度对比

Fig. 15 Comparison of load-deflection curves between FEA and test

5 参数分析

5.1 混凝土强度等级

不同混凝土强度等级下复合楼板荷载-挠度曲线如图16所示,经分析可知,混凝土强度等级从C25到C30,复合楼板的抗弯承载力提高了1.52%,从C30到C40,复合楼板的抗弯承载力提高了1.66%,从C40到C50,复合楼板的抗弯承载力提高了1.63%,由于基数较小,所以C25到C50,复合楼板的抗弯承载力变化较小。不同强度等级的混凝土在受力过程中都经历了弹性、弹塑性和塑性三个阶段,受力情况较好。在实际应用中可以根据实际情况及经济效益选择适当等级的混凝土。



图16 不同混凝土强度等级的复合楼板跨中荷载-挠度曲线

Fig. 16 Mid-span load-deflection curves of composite floors with different concrete strength grades

5.2 纵筋配筋率

不同纵筋配筋率下的复合楼板荷载-挠度曲线如图17所示。经有限元分析,纵筋直径从8 mm到14 mm,即纵筋配筋率从0.45%到1.39%,复合楼板的极限抗弯承载力提高了108.22%,而纵筋直径从8 mm到10 mm、12 mm、14 mm,所对应的复合楼板极限抗弯承载力依次提高29.54%、27.77%、25.80%。复合楼板在弹性阶段到弹塑性阶段再到塑性阶段的过程中,纵筋配筋率的影响越来越大,故纵筋配筋率对复合楼板的承载能力影响很大。随着纵筋配筋率的增加,复合楼板抗弯承载力明显提高,说明纵筋配筋率是影响复合楼板承载力的关键参数。为满足结构设计规范要求,并结合试验分析,建议选取纵筋直径在8 mm到12 mm之间。

5.3 C型钢厚度

本文选取建筑结构中常用冷弯薄壁C型钢的厚度范围1.2~2.0 mm进行分析,不同C型钢厚度下的复合楼板荷载-挠度曲线如图18所示。C型钢厚度从1.2 mm到2.0 mm,复合楼板的极限抗弯承载力增加了16.17%。其中,C型钢厚度从1.2 mm到1.5 mm,复合楼板的极限抗弯承载力增加了6.78%,增长幅度最大;C型钢厚度从

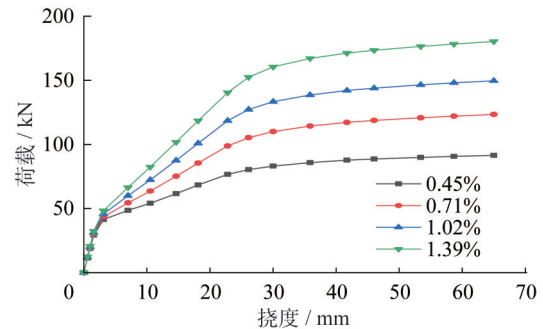


图17 不同纵筋配筋率的复合楼板跨中荷载-挠度曲线
Fig. 17 Mid-span load-deflection curves of composite floors with different longitudinal reinforcement ratios

1.5 mm到1.8 mm,复合楼板的极限抗弯承载力增加了6.07%;而C型钢厚度从1.8 mm到2.0 mm,复合楼板的极限抗弯承载力仅增加了2.57%,增长幅度较小。故本文所研究的C型钢厚度范围对复合楼板抗弯承载能力有一定的影响。当厚度从1.8 mm到2 mm时,复合楼板的极限抗弯承载力的提升有所减小,建议选择C型钢厚度不超过2 mm。

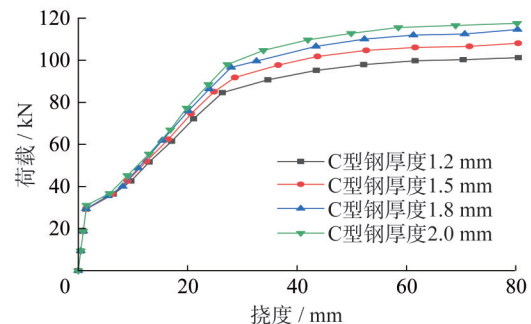


图18 不同C型钢厚度的复合楼板跨中荷载-挠度曲线
Fig. 18 Mid-span load-deflection curves of composite floors with different C-section thicknesses

6 结论

本文针对一种模块化轻钢-混凝土夹心复合楼板,在考虑实际套筒连接情况下,通过试验研究及有限元分析对该楼板进行了力学性能研究,得到的主要结论如下:

(1) 通过三分点加载抗弯承载力试验可知,复合楼板试件呈弯曲破坏形态,裂缝集中出现在板底跨中区域,说明复合楼板变形能力较好。

(2) 通过观察试件破坏后板内承插套管的位置,分析套管处应变曲线,在复合楼板承受极限荷载时,套管未发生屈曲,复合楼板和钢梁连接效果较好,起到了刚性连接的作用。

(3) 基于试验构件,建立了精细化有限元模型。与试验结果对比发现,模型和试验的破坏情况基本相同,说明本文建立的有限元模型具有较高的可靠性。

(4) 针对混凝土强度等级、纵筋配筋率、C型钢厚度三个主要因素进行了参数分析,发现提高混凝土强度后,复合楼板的极限抗弯承载力最大增幅为4.89%,变化较小;提高纵筋配筋率后,复合楼板的极限抗弯承载力最大增幅为108.22%,是影响复合楼板承载能力的关键因素;C型钢厚度对复合楼板的极限抗弯承载力有一定影响,增加C型钢厚度后,极限抗弯承载力最大增幅为16.147%。此外,在参数分析中,承插套管均未发生明显变形,表现出良好的刚性连接性能。

参考文献:

- [1] NAVARATNAM S, NGO T, GUNAWARDENA T, et al. Performance review of prefabricated building systems and future research in Australia [J]. *Buildings*, 2019, 9(2): 38. DOI:10.3390/buildings9020038.
- [2] CHAI Y, LIANG X F, LIU Y. Construction quality of prefabricated buildings using structural equation modeling [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(17): 9629. DOI: 10.3390/app13179629.
- [3] LI N, FENG Y, LIU J X, et al. Research on the modular design and application of prefabricated components based on KBE [J]. *Buildings*, 2023, 13(12): 2980. DOI: 10.3390/buildings13122980.
- [4] CHEN G, HUANG J Z, WANG J, et al. Optimal procurement strategy for off-site prefabricated components considering construction schedule and cost [J]. *Automation in Construction*, 2023, 147: 104726. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104726.
- [5] FU Y Q, FAN G L, TAO L, et al. Seismic behavior of prefabricated steel reinforced concrete shear walls with new type connection mode [J]. *Structures*, 2022, 37: 483-503. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.10.055.
- [6] DI J, HAN B, ZHOU X H, et al. Experimental investigation into cyclic working performances of prefabricated CFST columns with improved column-footing connections [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 46: 103772. DOI: 10.1016/j.job.2021.103772.
- [7] 冯鑫, 陈明, 田志昌. 混凝土叠合板分类及研究综述 [J]. *建筑结构*, 2024, 54(1): 138-144. DOI: 10.19701/j.jzjg.20211476. FENG Xin, CHEN Ming, TIAN Zhichang. Summary of classification and research on concrete composite slab [J]. *Building Structure*, 2024, 54(1): 138-144. DOI: 10.19701/j.jzjg.20211476. (in Chinese)
- [8] 章雪峰, 游安庆, 傅林峰, 等. 细石混凝土钢筋桁架楼承板多跨连续板受弯性能试验研究 [J/OL]. *建筑结构*, 2024: 1-7. (2024-04-29). <https://link.cnki.net/doi/10.19701/j.jzjg.20240200>. ZHANG Xuefeng, YOU Anqing, FU Linfeng, et al. Experimental study on bending performance of multi-span continuous slabs with fine stone concrete reinforced joist floor slabs [J/OL]. *Building Structure*, 2024: 1-7. (2024-04-29). <https://link.cnki.net/doi/10.19701/j.jzjg.20240200>. (in Chinese)
- [9] SHU X P, HE R, ZHANG Z H, et al. Estudio experimental sobre las propiedades mecánicas de un nuevo sistema de forjado de celosía prefabricada para grandes luces [J]. *Dyna Ingenieria E Industria*, 2019, 94(1): 189-196. DOI: 10.6036/9012.
- [10] 庞瑞, 许清风, 梁书亭, 等. 分布式连接全装配RC楼盖竖向承载力与变形分析 [J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 147-157. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.02.0092. PANG Rui, XU Qingfeng, LIANG Shuting, et al. Analysis of the vertical strength and deflection of discretely connected precast RC floor systems [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(4): 147-157. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.02.0092. (in Chinese)
- [11] LEAL L A A D S, BATISTA E D M. Experimental investigation of composite floor system with thin-walled steel trussed beams and partially prefabricated concrete slab [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106172. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106172.
- [12] LU Y Q, SHANG H K, LI Z N, et al. Dynamic behavior and serviceability analysis of a new type of U-shaped steel-concrete composite floor slab [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1): 8321836. DOI: 10.1155/2020/8321836.
- [13] PANTELIDES C P, BURKHART B A, REAVELEY L D, et al. Short-span and full-scale experiments of a prefabricated composite floor-building system [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(2): 04015018. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000758.
- [14] 乔文涛, 闫晓硕, 尹晓祥, 等. 一种应用于钢结构房屋的装配式钢砼组合楼盖: 201910117265.2 [P]. 2020-09-15. QIAO Wentao, YAN Xiaoshuo, YIN Xiaoxiang, et al. A prefabricated steel-concrete composite floor system applied to steel structure buildings: 201910117265.2 [P]. 2020-09-15. (in Chinese)
- [15] QIAO W T, YAN X S, ZHU R J, et al. Flexural properties of new cold-formed thin-walled steel and concrete composite slabs [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 31: 101441. DOI: 10.1016/j.job.2020.101441.
- [16] QIAO W T, HUANG Z Y, YAN X S, et al. Research on flexural bearing capacity of cold-formed thin-walled steel and reinforced concrete sandwich composite slabs [J]. *Steel and Composite Structures*, 2022, 45(2): 219-230. DOI: 10.12989/scs.2022.45.2.219.
- [17] 李兆霞. 损伤力学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. LI Zhaoxia. *Damage mechanics and its application* [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [18] ABDEL-RAHMAN N, SIVAKUMARAN K S. Material properties models for analysis of cold-formed steel members [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(9): 1135-1143. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:9(1135).