

预制钢筋桁架水泥纤维板受力性能试验研究

鲁志雄¹, 曾静茹¹, 薛国峰^{1,*}, 梅洁萍²

(1. 佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 佛山 528225; 2. 上华建筑科技(广州)有限公司, 广州 510640)

摘要:目前我国预制楼板主要应用的是叠合楼板, 预制钢筋桁架水泥纤维板的使用尚未得到推广。通过传统的静力堆载法对两块尺寸相同的预制钢筋桁架水泥纤维板的破坏模式、承载能力和变形能力进行探究。结果表明, 在施工工况中, 预制钢筋桁架水泥纤维板满足承载能力极限状态的设计要求; 跨中最大挠度约为 2.61 和 2.77 mm, 远小于挠度计算值且符合相关规范限值要求。说明预制钢筋桁架水泥纤维板在施工阶段具有较好的承载能力和整体变形能力, 可作为叠合楼板的底模使用。

关键词: 钢筋桁架; 水泥纤维板; 堆载试验; 受力性能

中图分类号: TU521.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)01-0045-07

Experimental study on the mechanical behavior of precast reinforcement truss cement fiberboard

LU Zhixiong¹, ZENG Jingru¹, XUE Guofeng^{1,*}, MEI Jieping²

(1. School of Transportation, Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China;
2. Shanghua Construction Technology (Guangzhou) Co. Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: At present, the prefabricated floor slab is mainly applied to composite floor slab in China, and the use of prefabricated steel truss cement fiber board has not been popularized. In this study, the failure mode, bearing capacity and deformation capacity of two prefabricated steel truss CFRP slabs of the same size are investigated by using the traditional static surcharge method. The results show that the prefabricated steel truss CFRP meets the design requirements of the ultimate bearing capacity state under the construction conditions; the maximum deflection in the middle of the span is about 2.61 mm and 2.77 mm, which is far less than the calculated value of deflection and meets the limit requirements of relevant specifications. It shows that the prefabricated steel truss cement fiber board has good bearing capacity and overall deformation capacity in the construction stage and can be used as the bottom formwork of the composite floor.

Key words: reinforcement truss; cement fiberboard; surcharge loading test; mechanical behavior

收稿日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808146)

作者简介: 鲁志雄(1979-), 男, 湖北天门人。博士, 高级工程师, 主要从事新型建筑材料与结构方面的研究。

E-mail: luzx@fosu.edu.cn。

* 通信作者: 薛国峰(1984-), 男, 山西吕梁人。讲师, 主要从事工程结构可靠性方面的研究。E-mail: guofengxue_hit@163.com。

与传统建筑相比,预制建筑以低劳动力成本、快速建设和资源节约的优势在全球得到积极推广^[1-2],是减少建筑业碳排放的有效解决方案。实际工程中装配式水平预制构件运用较多的是叠合楼板,其具有良好的整体性和连续性^[3],且施工时不需要支模^[4],有效地节省了人工,减少了建筑材料的消耗。国内外学者已针对多种形式的预制叠合楼板进行了大量的相关研究,吴方伯等^[5]对一种预应力带肋混凝土叠合板的整体受力性能进行研究,结果表明连续叠合楼板与现浇板的整体受力性能相似。武立伟等^[6]提出一种新型的预制叠合空心楼板,研究表明现浇层与预制底板的协同作用性能良好。于敬海等^[7]分析了预应力混凝土钢管桁架叠合板“二阶段受力”^[8]对叠合板整体受力性能的影响及该楼板沿预应力方向的工作性能。张泽超等^[9]对不同厚度的植物纤维增强水泥压力板在水平风荷载作用下的受力及变形情况进行了试验分析。

目前国内外学者主要集中在浇筑后叠合楼板整体力学性能的研究^[10-14],且叠合板在使用过程中一般需要 60 mm 厚的预制板,使装配式建筑中楼板厚度往往大于现浇楼板。笔者采用超高韧性混凝土制作的水泥纤维板作为装配式楼板的固定免拆模板,板厚仅为 12 mm,可减小叠合楼板的厚度。对两块尺寸相同的钢筋桁架水泥纤维板开展静力加载试验,结合试验结果,分析其裂缝开展、承载能力、挠度等性能,为该钢筋桁架水泥纤维板在装配式项目中的运用提供参考。

1 模型尺寸

试验选取两块预制尺寸相同的水泥纤维板,钢纤维体积率为 2.1%,表观密度为 1460 kg/m³,具体型号为 TD3-90,混凝土力学性能见表 1。三个钢筋桁架与水泥纤维板通过螺栓连接件连接(图 1),编号分别为 SXB-1、SXB-2,尺寸为 2440 mm×610 mm×12 mm(长×宽×板厚)。上弦钢筋直径为 10 mm,下弦钢筋直径为 8 mm,腹杆钢筋直径为 4.5 mm,上弦和下弦钢筋均采用 HRB400,腹杆钢筋采用冷轧光圆钢筋。

2 试验方案

2.1 测点布置

本试验试件均采用钢梁作简支座,板两边的桁架钢筋伸入支座不应小于 25 mm,其端部横筋焊接在支座上,防止桁架钢筋与钢支座之间发生相对滑移。在支座底部布置位移计以测得支座处的沉降,在跨中及 1/4 跨度处板底布置位移计以测得水泥纤维板竖向挠度,位移测点布置如图 2 所示。

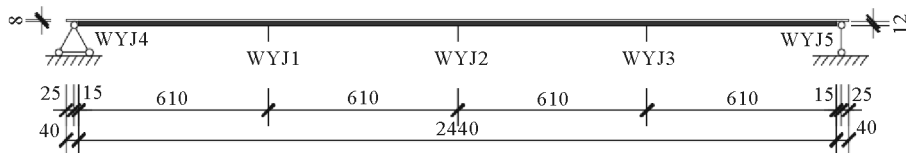


图 2 支座沉降及挠度测点布置(单位:mm)

在水泥纤维板下表面跨中粘贴电阻应变片,测量该标距内纤维混凝土沿纵横向的平均应变,以及混凝土开裂破坏时的极限应变。在纵向钢筋桁架的跨中和支座处预贴电阻应变片,以得到各弦杆钢筋的应变。具体测点布置如图 3 和图 4 所示。

表 1 28 d 混凝土力学性能

| 抗压强度/ MPa | 抗折强度/ MPa | 轴心抗压 强度/MPa | 弹性模量/ GPa | 轴向抗拉 强度/MPa |
|--------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| 168.5 | 33.8 | 130.5 | 46.2 | 12.0 |

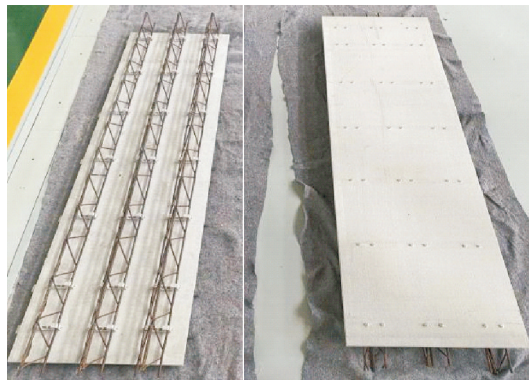


图 1 钢筋桁架水泥纤维板实物

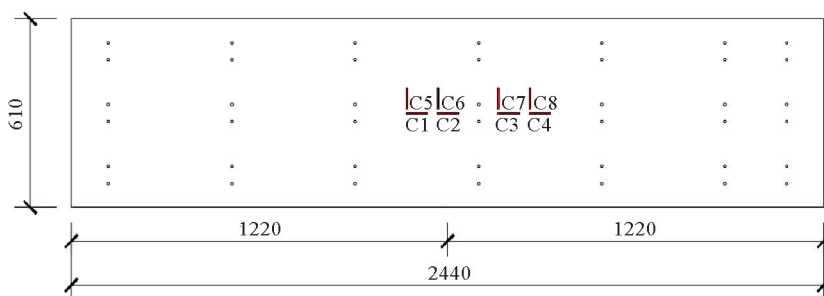


图 3 混凝土测点布置(单位:mm)

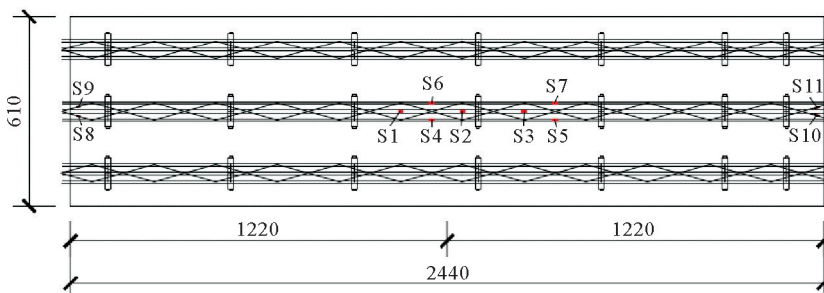


图 4 钢筋桁架测点布置(单位:mm)

2.2 加载方案及步骤

水泥纤维板主要起模板作用,承受自重、120 mm 厚的混凝土质量和施工活荷载。本试验采用堆载法进行静力试验,采用沙袋和其他配重物以模拟施工阶段的均布荷载。采用两种不同加载方式:① SXB-1 先在板边围一圈沙袋(防止碎石掉落),然后在钢筋桁架间的板上面铺放一层高于钢筋桁架的碎石,避免荷载直接作用在钢筋桁架上,整平后在碎石上分级加载沙袋和其他重物;② SXB-2 则先在钢筋桁架间的板上铺放一层高于钢筋桁架的质量块,使其直接作用在水泥纤维板上,然后在质量块上分级加载沙袋和其他重物。

加载前将各仪器读数调零后进行预加载,检查各测试仪器是否正常工作,后将所有仪器调试至精确后卸载至零,并记录各仪表的初值。试验的整个加载过程均由荷载控制,逐级均匀加载,每级加载约 67 kg,加载前用天平称加载物质量并记录堆积累计荷载。每级加载持荷 10 min,观察裂缝出现、开展的试验现象,待变形稳定后记录各测点仪表的读数以及堆积累计荷载,然后进行下一级加载,直至水泥纤维板开裂破坏,方可停止加载。现场试验加载如图 5 所示。



(a) SXB-1



(b) SXB-2

图 5 现场试件堆载

3 试验结果与分析

3.1 试验现象

极限荷载作用下,水泥纤维板均表现为典型的脆性破坏,破坏时只在跨中出现一条主裂缝,如图6所示。由于对两块板采取不同的加载方式,板SXB-1荷载传递途径由荷载传至钢筋桁架与板,钢筋与板共同承担荷载,上弦钢筋受压屈曲,水泥纤维板仅在距跨中80 mm处出现一条主裂缝,裂缝与板边垂直并向板中间延伸至92 mm长,裂缝宽0.16 mm。由于加载时堆载不够平整,局部钢筋屈曲和板底开裂导致大幅晃动,考虑到试验安全,终止加载。桁架钢筋变形幅度稍小,连接件完好,板的整体性尚可。板SXB-2荷载传递路径为:荷载→板→节点→钢筋,在静力荷载作用下水泥纤维板首先出现裂缝,力通过连接件传至钢筋桁架,上弦钢筋屈曲,挠度瞬间增大,板呈脆性破坏。裂缝出现在距跨中25 mm处的螺栓连接件位置上,沿螺栓孔贯穿整块板,最大裂缝宽度为0.67 mm,其余连接件完好。桁架钢筋变形如图7所示。

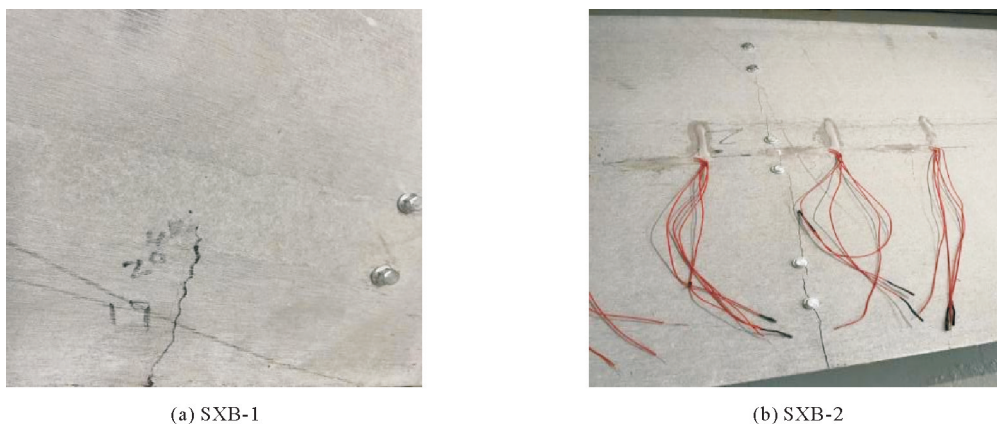


图6 水泥纤维板板底裂缝



图7 桁架钢筋变形

3.2 均布荷载-挠度曲线

试件的整体变形反映楼板的变形能力,整体变形通过布置在板底的位移计进行测量,图8给出了SXB-1和SXB-2在各级均布荷载作用下,水泥纤维板3个位移计测点的挠度变化情况和2个支座位移的变化情况,其中测点WYJ2是水泥纤维板的跨中挠度。由图8可知,两块水泥纤维板均是跨中挠度最大,且发展趋势大体相近,随着荷载的增加,挠度呈近线性增大。当荷载加载至 8.41 kN/m^2 时,SXB-1距跨

中 80 mm 处的裂缝开展至 9.2 cm,跨中及 1/4 跨度处的挠度快速增加,跨中最大挠度从 5.41 mm 增加到 7.71 mm;当荷载加载至 8.22 kN/m² 时,SXB-2 板底的主裂缝沿着螺栓孔迅速贯穿整个板宽,跨中最大挠度从 5.69 mm 突然增加到 10.05 mm,钢筋桁架水泥纤维底板破坏。

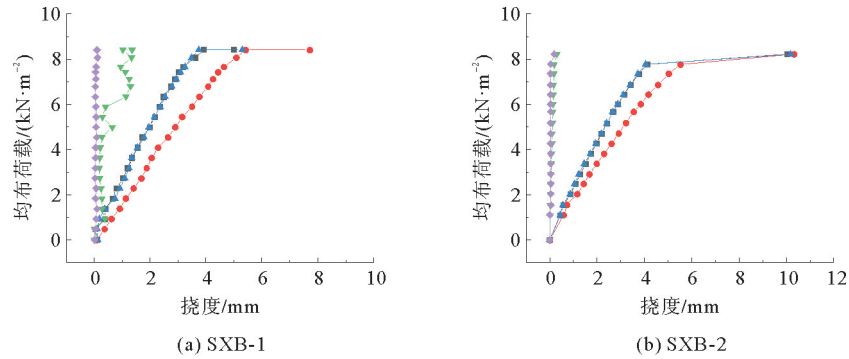


图 8 均布荷载-挠度曲线

—■— WYJ1; —●— WYJ2; —▲— WYJ3; —▼— WYJ4; —◆— WYJ5

根据极限荷载的取值方法:当加载过程中试件破坏,应取前一级荷载值作为结构构件的极限荷载实测值;当在荷载持续时间内试件破坏,应取本级荷载与前一级荷载的平均值作为极限荷载;荷载持续时间后试件破坏,取本级荷载为极限荷载。钢筋桁架水泥纤维板 SXB-1 极限荷载为 8.41 kN/m²,SXB-2 极限荷载为 8.00 kN/m²。

3.3 均布荷载-应变曲线

图 9 为试件上弦钢筋和水泥纤维板应变-荷载变化曲线。由图 9 可以看出,跨中上弦钢筋的荷载-应变曲线与荷载-挠度曲线(图 8)有较为相似的规律。水泥纤维板出现裂缝前,钢筋处于弹性阶段,钢筋和底板单位荷载下应变随荷载增加均匀增长,且增加幅度较小;跨中板底出现第一条裂缝时,钢筋达到屈服强度,整体板达到极限承载力,应变激增。

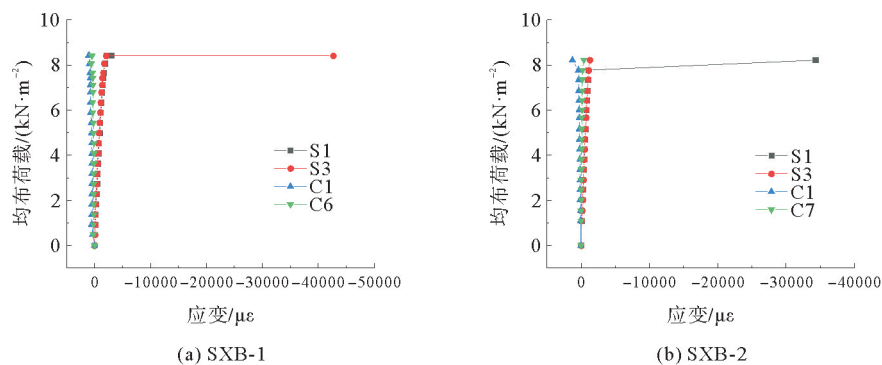


图 9 均布荷载-应变曲线

3.4 承载能力计算

根据《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273—2010)^[15]4.1.7 施工阶段,楼承板按承载力极限状态设计时,其荷载效应组合的设计值应按下式确定:

$$S = 1.2S_s + 1.4S_c + 1.4S_q$$

式中: S 为荷载效应设计值; S_s 为楼承板、钢筋自重产生的荷载效应标准值; S_c 为混凝土自重产生的荷载效应标准值; S_q 为施工阶段可变荷载产生的荷载效应标准值。

理论上,相同试件的变形能力接近。由于试验加载过程中 SXB-2 的堆载相对平整,因此,相比同尺寸

的 SXB-1, SXB-2 的跨中最大挠度较大, 试验结果较为理想。根据材料力学均布荷载作用下的挠度计算公式:

$$\omega = \frac{5ql^4}{384y}$$

式中: q 为均布荷载标准值; l 为计算跨度, 取板两端支座竖筋之间的距离; y 为桁架钢筋的总抗弯刚度。

由表 2 可知, 水泥纤维板的承载力均已达到荷载设计值的 1 倍以上, 说明钢筋桁架水泥纤维板具有良好的承载能力。在均布荷载标准值 4.5 kN/m^2 情况下, 各试件跨中最大挠度远小于计算值, 符合《组合楼板设计与施工规范》(CECS 273—2010) 4.2.2 各项作用标准组合下, 楼承板施工阶段挠度不应大于板跨的 $1/180$, 且不应大于 20 mm 的要求, 说明水泥纤维板在施工阶段变形小, 可作为叠合板的底模使用。

表 2 水泥纤维板跨中挠度及承载力设计值与试验值对比

| 试件编号 | 试验值 | | 承载力设计值/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$) | 挠度计算值/ mm | 挠度限值/ mm | 承载力 试验值/设计值 |
|-------|---|-------|--|--------------|-------------|----------------|
| | 承载力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$) | 挠度/mm | | | | |
| SXB-1 | 8.41 | 2.61 | 6.51 | 8.83 | 13.72 | 1.29 |
| SXB-2 | 8.00 | 2.77 | 6.51 | 8.83 | 13.72 | 1.23 |

4 结论

1) 钢筋桁架水泥纤维板整体延性较好, 两块水泥纤维板均表现为典型的脆性破坏, 其余连接件完好。

2) 在施工工况下, 水泥纤维板满足承载能力极限状态的设计要求, 均已达到荷载设计值的 1 倍以上, 楼板具有较好的承载能力。

3) 在施工可变荷载 1.5 kN/m^2 和 120 mm 厚混凝土等效荷载作用下, 各试件跨中最大挠度远小于计算值且符合相关规范限值, 说明水泥纤维板在施工阶段具有较好的整体变形能力, 可作为叠合楼板的底模使用。

参考文献 (References):

- [1] DU Qiang, PANG Qiaoyu, BAO Tana, et al. Critical factors influencing carbon emissions of prefabricated building supply chains in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124398. 1-124398. 12.
- [2] YU Sisi, LIU Yanfeng, WANG Dengjia, et al. Review of thermal and environmental performance of prefabricated buildings: Implications to emission reductions in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110472. 1-110472. 12.
- [3] 马相, 黄炜, 罗斌, 等. 混凝土叠合板研究综述: 受力性能和设计方法[J]. 混凝土, 2020(2): 129-133.
MA Xiang, HUANG Wei, LUO Bin, et al. Summary of research on concrete composite slabs: Mechanical properties and design methods[J]. Concrete, 2020 (2): 129-133.
- [4] 聂琳. 混凝土叠合楼板在高层住宅中的应用[J]. 建筑结构, 2013, 43(S2): 542-544.
NIE Lin. Application of concrete composite floor slab in high-rise residence[J]. Building Structure, 2013, 43 (S2): 542-544.
- [5] 吴方伯, 黄海林, 陈伟, 等. 预制带肋薄板混凝土叠合板件受力性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 7-12.
WU Fangbo, HUANG Hailin, CHEN Wei, et al. Experimental study on mechanical behavior of precast ribbed thin slab concrete composite slab[J]. Civil Architecture and Environmental Engineering, 2011, 33 (4): 7-12.
- [6] 武立伟, 陈海彬, 刘亦斌. 混凝土预制叠合空心楼板静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 36-42.
WU Liwei, CHEN Haibin, LIU Yibin. Experimental study on static performance of concrete precast composite hollow slab[J]. Journal of Building Structure, 2018, 39 (S2): 36-42.
- [7] 于敬海, 何梦杰, 张树辉, 等. 二阶段受力作用下预应力混凝土钢管桁架叠合板受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(5): 80-85.
YU Jinghai, HE Mengjie, ZHANG Shuhui, et al. Experimental study on mechanical behavior of prestressed concrete filled steel tubular truss composite plate under two-stage stress[J]. Building Structure, 2021, 51(5): 80-85.
- [8] 卢家森, 徐海兵, 郑振鹏. 钢筋桁架混凝土叠合楼板设计方法[J]. 建筑结构, 2016, 46(18): 99-103.
LU Jiasen, XU Haibing, ZHENG Zhenpeng. Design method of reinforced truss concrete composite floor[J]. Building Structure,

- 2016, 46 (18): 99-103.
- [9] 张泽超, 曹喜, 陈放宜, 等. 钢结构房屋外围护墙预制水泥纤维板力学性能试验研究[C]// 第十四届全国现代结构工程学术研讨会. 2014:709-713.
ZHANG Zechao, CAO Xi, CHEN Aoyi, et al. Experimental study on mechanical properties of prefabricated cement fiber board for peripheral retaining wall of steel structure house[C]// The 14th National Symposium on Modern Structural Engineering. 2014:709-713.
- [10] 杨正俊. 轻质装配式叠合楼板拼接处受力性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(2):65-70.
YANG Zhengjun. Experimental study on the mechanical properties of the joint of lightweight prefabricated composite slabs[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(2):65-70.
- [11] 陈骁, 李海生, 高梦起, 等. 钢肋预应力混凝土叠合板试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构, 2021, 51(5):98-103.
CHEN Xiao, LI Haisheng, GAO Mengqi, et al. Experimental study and numerical simulation on prestressed concrete composite slab with steel ribs[J]. Building Structure, 2021, 51(5):98-103.
- [12] 廖智强, 倪家贵, 俞大有, 等. 新型预制整浇拼合楼板的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(5):92-97.
LIAO Zhiqiang, NI Jiagui, YU Dayou, et al. Experimental study on flexural performance of new type of precast cast-in-situ composite floor slab[J]. Building Structure, 2021, 51(5):92-97.
- [13] 雷强, 孙彤彤, 艾明星, 等. 一种新型钢筋桁架夹芯叠合板设计及性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(3):93-97.
LEI Qiang, SUN Tongtong, AI Mingxing, et al. A new type of truss sandwich laminated floor slab design and performance studies[J]. Building Science, 2021, 37(3):93-97.
- [14] 张敏, 秦稳, 卢旦, 等. 预制混凝土叠合楼板新型连接构造的力学性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(6):26-31.
ZHANG Min, QIN Wen, LU Dan, et al. Research on mechanical properties of prefabricated concrete composite floor with new connection[J]. Building Structure, 2022, 52(6):26-31.
- [15] CECS 273—2010, 组合楼板设计与施工规范[S].
CECS 273—2010, Code for design and construction of composite floor slab[S].

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)

(上接第 44 页)

- [12] QIANG H L, FENG P, STOJADINOVIC B, et al. Cyclic loading behaviors of novel RC beams with kinked rebar configuration[J]. Engineering Structures, 2019, 200:109689.
- [13] QIANG H L, YANG J X, FENG P, et al. Kinked rebar configurations for improving the progressive collapse behaviours of RC frames under middle column removal scenarios[J]. Engineering Structures, 2020, 211:110425.
- [14] 樊源, 陈力, 任辉启, 等. 起波配筋 RC 梁抗爆作用机理及抗力动力系数的理论计算方法[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(3):123-134.
FAN Yuan, CHEN Li, REN Huiqi, et al. Blast-resistant mechanism of RC beam with kinked rebar and calculation method of dynamic resistance coefficient[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(3):123-134.
- [15] 陈力, 任辉启, 樊源, 等. 强动载作用下起波配筋梁抗力性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10):1-8.
CHEN Li, REN Huiqi, FAN Yuan, et al. Experimental study on the resistance of RC beam with kinked rebar under severe dynamic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(10):1-8.
- [16] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2010, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature[S].

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)