

引用格式:彭亚萍,周怡祖,夏佑渊.下贴纤维复材的增强型板边不出筋混凝土叠合板受弯性能试验研究[J].工业建筑,2025,55(10):47-54.
PENG Yaping, ZHOU Yizu, XIA Jiuyan. Experimental Research on the Flexural Performance of FRP-Reinforced Composite Concrete Slabs Without Protruding Rebars[J]. Industrial Construction, 2025, 55(10):47-54 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyzG25062604

下贴纤维复材的增强型板边不出筋混凝土叠合板受弯性能试验研究^{*}

彭亚萍¹ 周怡祖¹ 夏佑渊²

(1. 上海应用技术大学城市建设与安全工程学院, 上海 201418; 2. 上海弘昊建材有限公司, 上海 201416)

摘 要 为解决板边不出筋混凝土叠合板承载能力降低、变形大的问题,提出在预制底板边设置凹槽和在板底跨缝处粘贴纤维复材的增强方式。通过1块整浇板和8块板边不出筋混凝土叠合楼板的静载试验,对试件的受弯特征、破坏形态、承载特性和变形能力进行了对比分析。结果表明:密拼叠合板试件的承载力、刚度和延性均明显小于整浇板;上述增强方式可以在一定程度上增强叠合板底部的应力传递和整体性,提高叠合板的受力性能;拼缝位置叠合面设置附加钢筋的配筋率和锚固长度对叠合板的受力性能有明显影响;增加凹槽深度的试件表现出相对突出的承载能力和变形性能,且延性相对较大;加载过程中纤维复材对板底的约束作用提高了叠合板的开裂荷载,增强了板底拼缝两侧的应力传递,减小了板缝“变形集中”的程度,提高了叠合板的刚度和延性。

关键词 装配式;叠合板;纤维复材;受弯性能;承载力;变形

Experimental Research on the Flexural Performance of FRP-Reinforced Composite Concrete Slabs Without Protruding Rebars

PENG Yaping¹ ZHOU Yizu¹ XIA Jiuyan²

(1. School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;
2. Shanghai Honghao Building Materials Co., Ltd., Shanghai 201416, China)

Abstract: In order to solve the problems of reduced bearing capacity and large deformation of concrete composite slabs without protruding rebars, reinforcement methods such as setting grooves at the edges of the prefabricated bottom slabs and pasting fiber-reinforced composites at the cross-seam positions of the slab bottom are proposed. Through the static load tests of one monolithic cast slab and eight concrete composite floor slabs without protruding rebars, a comparative analysis was carried out on the flexural characteristics, failure modes, bearing characteristics, and deformation capacities of the specimens. The results showed that the bearing capacity, stiffness, and ductility of the closely spliced composite slab specimens were significantly smaller than those of the monolithic cast slab. Through the strengthening measures such as grooving at the edge of the slab and pasting fiber composites across the cracks at the bottom of the slab, the stress transfer and integrity at the bottom of the composite slab were enhanced to a certain extent, and the mechanical properties of the composite slab were improved. The reinforcement ratio and anchorage length of the additional rebars set at the composite surface of the splicing joint had a significant impact on the mechanical properties of the composite slab. The specimens with increased groove depth exhibited relatively outstanding bearing capacity and deformation performance, with good

^{*} 上海市自然科学基金项目(23ZR1462400)。

第一作者:彭亚萍,工学博士,教授,主要从事纤维复材增强混凝土结构方面的研究。

电子邮箱:pengyp@sit.edu.cn

收稿日期:2025-06-26

ductility. During the loading process, the restraining effect of the fiber composite materials on the bottom of the slab increased the cracking load of the composite slab, enhanced the stress transfer on both sides of the splicing joint at the bottom of the slab, reduced the degree of "deformation concentration" at the slab joint, and improved the stiffness and ductility of the composite slab.

Keywords: prefabricated; composite slab; fiber-reinforced composite; flexural performance; bearing capacity; deformation

叠合楼板作为装配式建筑的主要组成部分,其发展对推进我国建筑工业化进程具有重要作用。实际工程中,双向叠合板的预制底板多采用四周设置外伸钢筋,板间预留 200~300 mm 后浇带进行整体式连接的方式^[1],该连接需要支设模板,施工过程复杂、工期长、成本高。而取消外伸钢筋,采用板边不出筋密拼叠合板楼盖可以克服以上不足,密拼板间的连接方式成为新的研究热点。

近年来,国内学者对板边不出筋的混凝土双向叠合楼板受弯性能开展了较多的研究。叶献国等^[2]、颜锋等^[3]、余泳涛等^[4]的试验研究表明:无增强措施的板边不出筋混凝土叠合板拼缝处存在明显的变形集中现象;较之现浇板,叠合板的承载能力和截面刚度明显降低,甚至会表现为单向板破坏特性^[3],难以满足楼板双向传力的要求。

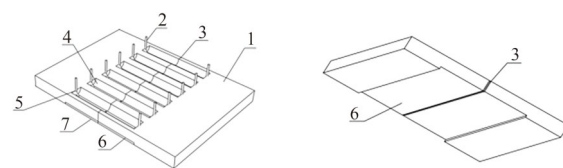
为了提高板边不出筋混凝土叠合板的受力性能,学者们提出了许多增强措施。恽燕春等^[5]通过提高拼缝处附加钢筋配筋量、增大锚固长度、减小桁架间距等增强措施,试件的承载能力得到显著提高。林彦等^[6]、邴卿德等^[7]、杨悦等^[8]、肖彤等^[9]、肖宇等^[10]对预制板边设置凹槽放置附加筋的密拼叠合板进行抗弯性能研究,结果表明:板边开槽降低了附加钢筋的位置,增大了拼缝处截面有效抗弯高度,试件的承载能力显著提高,使用弯钩附加钢筋以及屈服强度更高的附加钢筋等加强拼缝配筋的措施可以进一步提升密拼叠合板的承载能力。邓旭华等^[11]、廖智强等^[12]、何庆锋等^[13]对采用纵筋弯折连接的密拼叠合板开展了试验研究,结果显示:板底纵筋弯起到现浇叠合层能有效提高叠合板拼缝处的应力传递,提高预制层与叠合层的整体性,叠合板的承载能力非常接近整浇板。上述研究表明,采用合理的增强措施后,板边不出筋密拼叠合板的承载能力可得到显著提高,但叠合板拼缝处的“变形集中”现象依然没有得到解决。

为此,本课题组提出了在板底横跨拼缝粘贴

碳纤维复材的密拼连接构造^[14],并以此方案为基础开展了系列研究^[14-20],结果表明:板底跨缝粘贴纤维复材可以在不增加结构自重的同时,在正常使用状态下有效提高叠合板拼缝处截面的承载能力和抗弯刚度,减小变形,但受力后期纤维复材的剥离会导致其强度不能充分发挥,叠合板试件在极限状态下的承载能力相当于无增强措施的叠合板试件。

为解决上述问题,进一步改善密拼叠合板的受力性能,作者团队提出了如图 1 所示的板边不出筋叠合板的连接构造:一方面通过在预制板板边开槽设置两端上弯的 U 型附加钢筋,增大拼缝截面抗弯有效高度的同时提高附加钢筋的锚固性能;另一方面在板底拼缝处开浅槽,将纤维复材满布粘贴于板底浅槽内,防止纤维复材在加载后期出现剥离^[21],改善拼缝截面变形集中的问题。

通过试验研究,对比分析了在预制底板边设置凹槽放置 U 形附加钢筋、在板底跨缝处开浅槽粘贴纤维复材的增强效果,以及其对叠合板受弯特征、破坏形态、承载特性和变形能力的影响规律,供工程应用参考。



(a) 预制底板板面凹槽及 U 形附加筋 (b) 预制底板的板底浅槽

1—预制混凝土底板;2—U 型附加钢筋;3—预制板拼缝;4—半圆形凹槽;5—固定槽口;6—板底浅槽;7—纤维复材。

图 1 下贴纤维复材的增强型板边不出筋混凝土叠合板密拼拼缝构造

Fig. 1 Closed seam details for FRP-reinforced composite concrete slabs without protruding rebars

1 试验研究

1.1 试件设计与制作

试验共设计了 P1 和 P2 两组试件,表 1 为试件的主要参数。P1 组为对照试件,包括整浇板试件 P1-0、无增强措施的板边不出筋叠合板试件 P1-1、仅在板边

开槽的增强型叠合板试件 P1-2。P2 组为 7 块不同拼缝构造的下贴纤维复材增强型叠合板试件,其中 P2-2 未设置板边凹槽,P2-3 凹槽中心线间隔为 200 mm,P2-5 凹槽深度为 30 mm,P2-6 凹槽长度为 150 mm,其余构件的凹槽中心线间隔为 150 mm、凹槽长度为 200 mm、深度为 25 mm;P2-4 粘贴 1 层纤维复材,P2-7 纤维复材一侧粘贴长度为 150 mm,其余试件均粘贴 2 层纤维复材、拼缝一侧粘贴长度为 200 mm。10 个试件的整体尺寸均为 1400 mm×450 mm×120 mm,其中 9 块叠合板试件预制底板由 2 块 700 mm×450 mm×60 mm 的预制底板密拼而成,拼缝位于跨中位置。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件 分组	试件 编号	预制底板/mm			后浇层 厚度/mm	纤维复材	
		开槽 长度	附加钢筋 间距	开槽 深度		层数	单侧 长度/mm
P1	P1-0	0	0	0	120	0	0
	P1-1	0	0	0	60	0	0
	P1-2	200	150	25	60	0	0
P2	P2-1	200	150	25	60	2	200
	P2-2	0	0	0	60	2	200
	P2-3	200	200	25	60	2	200
	P2-4	200	150	25	60	1	200
	P2-5	200	150	30	60	2	200
	P2-6	150	150	25	60	2	200
	P2-7	200	150	25	60	2	150

试件配筋如图 2 所示,图 2 中①③⑤为横向受力纵筋,②④⑥为纵向受力钢筋。试件均为双层双向配筋,受力钢筋直径均为 6 mm,间距均为 100 mm。桁架钢筋选用图集^[22]规定的标准 A80 型号,所用桁架钢筋长度为 400 mm,平行于板缝在预制底板上居中设置 1 道。受力筋均采用 HRB400E,实测钢筋抗拉强度为 490 MPa,预制层和叠合层混凝土强度等级均采用 C30,实测混凝土立方体抗压强度分别为 38.86 MPa 和 40.63 MPa,混凝土保护层厚度为 15 mm。

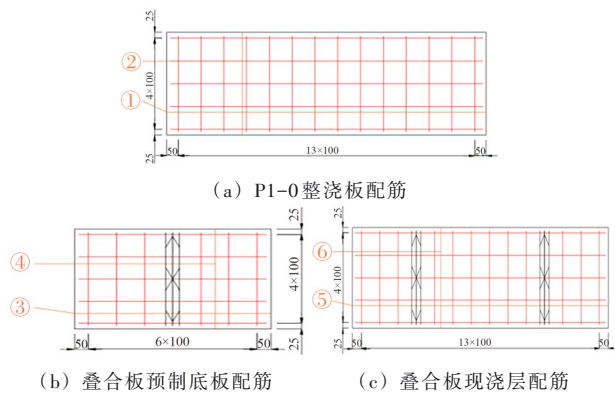


图 2 试件配筋 mm
Fig. 2 Reinforcement diagram of specimens

试验使用纤维复材为网格尺寸 10 mm×10 mm 的碳纤维网格布,其力学性能如表 2 所示。采用细粒混凝土粘贴碳纤维网格布,粘贴完纤维复材的叠合板试件如图 3 所示。

表 2 碳纤维网格布力学性能指标

Table 2 Mechanical property indexes of carbon fiber mesh cloth

方向	抗拉强度/ MPa	拉伸弹性模量/ GPa	断裂伸长率/ %	截面积/ mm ²
纵向	2.58×10 ³	219	1.2	0.86
横向	3.16×10 ³	310	1.3	0.43



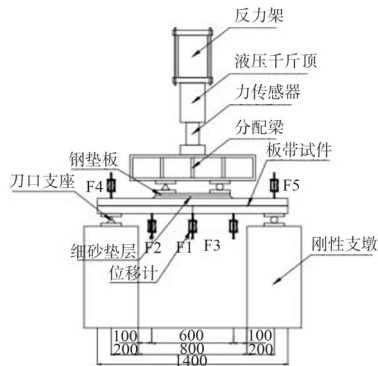
图 3 下贴纤维复材的试件板底
Fig. 3 Schematic diagram of the bottom of the slab with fiber composite material

1.2 加载方案

单向受弯的静载试验中,采用两端简支的支承方案,一端采用固定铰支座,另一端采用滚动铰支座,两端搁置长度为 100 mm,叠合板的计算跨度为 1200 mm,试件中部纯弯段长 400 mm。试验试件均采用如图 4 所示的两点集中荷载的加载方式,单调分级加载。试件开裂前采用荷载控制模式,开裂前取楼板开裂荷载计算值的 20%,开裂后转换为位移控制模式,每级加载位移取 1~3 mm,加载至试件跨中挠度达到跨度的 1/50(24 mm)或荷载超越峰值后下降到峰值的 85% 以下停止加载。

1.3 量测方案

量测内容包括荷载、变形、裂缝和应变 4 个方面:1)加载控制系统自动测量试件所受荷载;2)试件下表面分别在跨中和 1/4 跨度处设置 3 个位移计,上表面支座处设置 2 个位移计来量测板的竖向位移,详见图 4;3)裂缝宽度使用裂缝测宽仪进行探测,同时记录对应的荷载值;4)钢筋应变片设置在整浇板试件受力纵筋的跨中、叠合板试件板顶纵筋的跨中以及附加钢筋的跨中和端部,详见图 5(a);混凝土应变片的设置,对于整浇板与未粘贴纤维复材的试件,长、短跨方向均设 4 片,详见图 5(b),对于下贴纤维复材的试件,沿长跨方向板缝处设 6 片、短跨方向板缝两侧各设 2 片(共 4 片),详见图 5(c)。

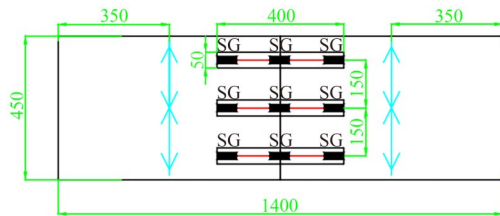


(a) 加载装置正面示意

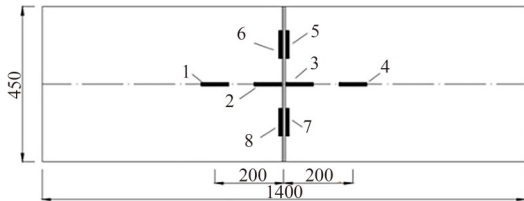


(b) 加载装置实物

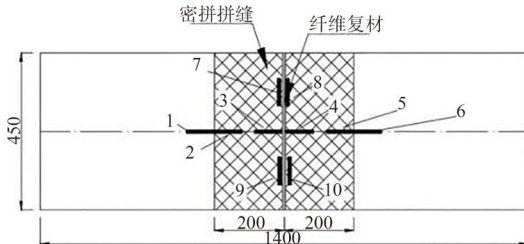
图4 试验加载装置 mm
Fig. 4 Test loading device



(a) 叠合板中附加钢筋应变片布置



(b) 无纤维复材的试件板底混凝土应变片布置



(c) 板底混凝土及纤维复材应变片布置

图5 钢筋及混凝土应变片测点布置 mm

Fig. 5 Arrangements of measuring points of strain gauges on rebars and concrete

2 试验结果及分析

2.1 受力过程及破坏形态

试件 P2-2 在加载安装过程中意外受损,其余 9 个试件的受力全过程均经历了弹性未裂阶段、弹塑性带裂缝工作阶段和大变形的破坏阶段。9 个试件的破坏形态如图 6 所示,整浇板试件 P1-0 表现出适筋受弯构件破坏特征;叠合板试件板缝位置的变形相对集中、缝宽相对较大,不同拼缝构造的试件裂缝分布略有差异。无增强措施的叠合板试件 P1-1,裂缝的发展主要集中于拼缝位置,两侧微细裂缝较少,变形集中明显;采取增强措施的 P2 组试件,虽然裂缝仍然集中在拼缝处,但相同荷载下缝宽变小,变形集中程度相对减弱。

8 个叠合板试件均未出现沿叠合面的水平裂缝及滑移现象,叠合面的连接良好。6 个板底粘贴碳纤维复材的试件在加载后期均未出现复材端部剥离的现象,在板底拼缝位置碳纤维网格布的部分跨缝纤维条被拉断。

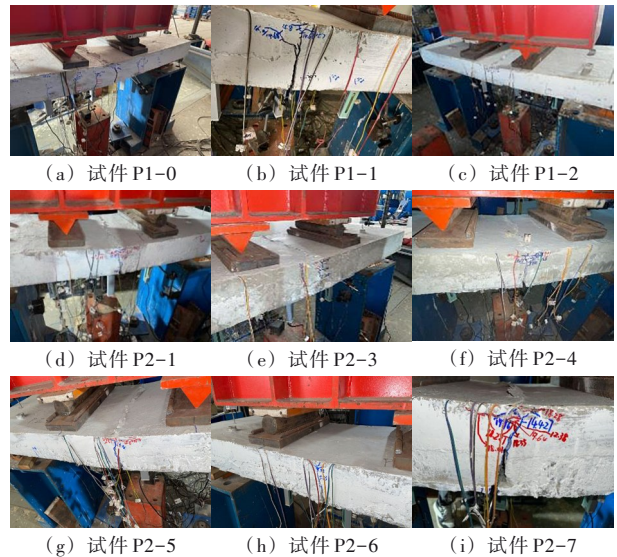


图6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimens

2.2 承载特性分析

9 个试件的开裂荷载、屈服荷载与峰值荷载见表 3,相互对比分析可以发现:

1) 开裂荷载。整浇板试件的整体刚度较高,其开裂荷载要显著高于叠合板试件;除了只粘贴 1 层纤维复材的 P2-4、开槽长度变短为 150 mm 的 P2-6 试件外,P2 组其余试件的开裂荷载总体要高于无增强措施的 P1-1 试件,说明板底粘贴纤维复材在加载

初期已开始参与截面受力,延缓了混凝土裂缝的出现,但纤维复材用量不足、附加筋锚固长度不够时难以达到预期效果。

2) 屈服荷载。无增强措施试件 P1-1 的屈服荷载仅为整浇板的 46%,仅板边开槽的试件 P1-2 屈服荷载为整浇板的 83%、较试件 P1-1 提高了 78%。较之整浇板,P2 组叠合板试件的屈服荷载相对比的范围为 0.46~1.08,均值明显高于 P1-1,接近 P1-2,说明本文提出的增强措施可以明显改善拼缝的传力性能。但增强措施弱的 P2-4、P2-6 试件屈服荷载接近无增强措施的 P1-1。

3) 峰值荷载。试件 P1-1 的峰值荷载仅为整浇板的 31%,试件 P1-2 峰值荷载较试件 P1-1 提高了 22%,P2 组叠合板试件峰值荷载均值明显高于 P1-1,相对比的均值为 1.23。但较之整浇板,叠合板的总体承载力下降明显,峰值荷载相对比的范围为 0.24~0.48,出现这一结果的主要原因有:增强措施很难弥补板缝中断板底纵筋的连续抗拉作用;纤维复材在正常使用状态能较好地发挥作用,但在极限状态的大变形阶段基本失去了抗拉和约束作用;本文试验试件尺寸相对较小,板缝缺陷突显等。

4) 变化板边凹槽参数试件的特征荷载比较。增加凹槽深度的试件 P2-5,其开裂荷载与峰值荷载

分别为试件 P2-1 的 1.18 倍和 1.29 倍,可见降低附加钢筋位置,相当于增大截面受弯的内力臂,承载力随之提高。减小凹槽长度(附加筋锚固长度)33%的试件 P2-6,其开裂荷载和峰值荷载仅为试件 P2-1 的 68% 和 66%;加大凹槽间距(减小附加钢筋配置量 33%)的试件 P2-3,其开裂荷载无明显变化,但峰值荷载下降为试件 P2-1 的 86%。可见,横跨板缝的附加钢筋在截面抗弯承载力中发挥着重要作用,其配置面积和锚固长度减小时,截面承载力明显下降。

5) 变化纤维复材参数试件的特征荷载。减小纤维复材粘贴层数的试件 P2-4,其开裂荷载和屈服荷载显著降低,仅为试件 P2-1 的 62% 和 54%;减小纤维复材粘贴长度的试件 P2-7,较之 P2-1,其开裂荷载无明显变化,但屈服荷载略有下降;试件 P2-4、P2-7 的峰值荷载却分别相对提高了 28% 和 8%。说明碳纤维网格布在加载初期参与截面受力,其约束作用可以延缓截面开裂,复材配置量越小效果越弱。但在受力后期,跨中缝宽较大时纤维网格布部分条带断裂对截面承载力的贡献不大,上述 2 个试件出现极限荷载提高的原因应该与纤维复材无关,是钢筋混凝土试件的材料及制作差异所致。

表 3 试件的特征荷载值及相对比
Table 3 Characteristic load values and relative ratios of specimens

试件编号	开裂荷载			屈服荷载			峰值荷载		
	实测值/kN	相对比 1	相对比 2	实测值/kN	相对比 1	相对比 2	实测值/kN	相对比 1	相对比 2
P1-0	19.24	1.00	—	19.24	1.00	—	51.02	1.00	—
P1-1	10.31	0.54	1.00	8.93	0.46	1.00	16.01	0.31	1.00
P1-2	—	—	—	15.90	0.83	1.78	19.18	0.38	1.22
P2-1	14.43	0.75	1.39	16.49	0.86	1.85	18.85	0.37	1.19
P2-3	14.89	0.77	1.43	14.89	0.77	1.67	16.25	0.32	1.03
P2-4	8.931	0.46	0.85	8.94	0.46	1.00	24.18	0.47	1.52
P2-5	16.96	0.88	1.63	20.74	1.08	2.32	24.24	0.48	1.55
P2-6	9.83	0.51	0.94	9.62	0.50	1.08	12.36	0.24	0.77
P2-7	14.43	0.75	1.39	14.40	0.75	1.61	20.35	0.40	1.29

注:相对比 1 是指相对于现浇板试件 P1-0 的荷载比例;相对比 2 是指相对于无增强措施的密拼叠合板试件 P1-1 的荷载比例。

2.3 变形能力分析

2.3.1 挠度分布

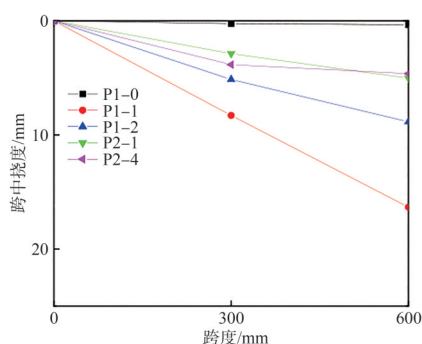
图 7 为部分试件在等荷载值(取试件 P1-1 的峰值荷载 16.01 kN)以及各自峰值荷载时的半跨挠度曲线分布。P2-3、P2-5、P2-7 试件在测量过程中触碰到跨度 1/4 处的位移计,P2-6 试件施加

荷载过程中很快就达到了极限荷载,所以未在图 7 中绘制。

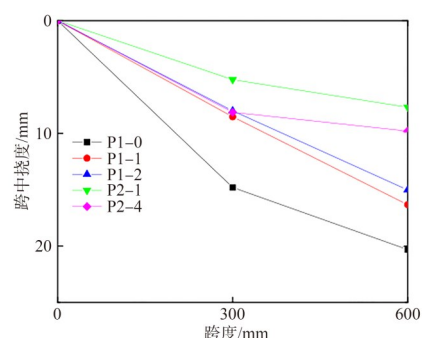
对比分析可知:

1) 等荷载值时,整浇板试件 P1-0 的挠度变形较小,无增强措施试件 P1-1 的变形相对最大,跨中一侧的变形几乎是一条直线,全跨变形接近 V 形折

线;仅在板边开槽的试件P1-2的挠度明显小于试件P1-1(刚度增大),且挠度曲线有“弯曲”的趋势,可见板缝的变形集中现象有所缓解;板底粘贴纤维复材的试件P2-1、P2-4的挠度进一步变小,刚度进一步增大,挠度曲线的分布“弯曲性”更好,表现出较好的整体性能。



(a) 等值荷载挠度曲线



(b) 峰值荷载挠度曲线

图7 各试件半跨挠度变形曲线

Fig. 7 Deflection deformation curves of the half-span for each specimen

2) 试件在峰值荷载时,板底未粘贴纤维复材的叠合板试件P1-1与P1-2跨中一侧的变形接近直线,全跨变形接近V形折线,跨中变形集中明显,整个构件就像从中间“折断”一样。但其挠度远小于整浇板,是因为承载力降低提前破坏所致。

3) P2组试件由于板底粘贴了纤维复材,可以看到在峰值荷载时,试件P2-1、P2-4的挠度曲线“弯曲”特征明显,刚度明显增大,表现出良好的受力性能。说明在预制板底部粘贴纤维复材的方式,可以在拼缝处有效传递应力,从而提升叠合板试件的整体性。

2.3.2 荷载-跨中挠度关系

取试件板底几何中心处的最大挠度值,绘制出图8所示的荷载-跨中挠度关系曲线。对比分析

可知:

1) 与整浇试件P1-0相比,叠合板试件的荷载-跨中挠度曲线明显变低变短,屈服点降低、峰值点靠左变低,承载能力和刚度明显降低。

2) P1组试件。无增强措施的密拼叠合板试件P1-1的曲线位置相对较低,除试件P2-6以外,延性相对最差;与试件P1-1相比,仅在板边开槽试件P1-2的曲线变高变长,试件延性明显增大。

3) P2组试件。相对P1-1试件,P2组试件中增强措施相对较强的P2-1、2-4、2-5、2-7的曲线位置较高,延性明显增大,其中增加凹槽深度的试件P2-5最为突出。可见,板底粘贴纤维复材确实能增强叠合板的整体受力性能和延性。

4) 变化参数试件。与试件P2-1对比可以发现,加大附加钢筋间距减小配置量的试件P2-3和减小附加钢筋锚固长度(凹槽长度)的试件P2-6,其曲线明显变低变短,延性减小;增加凹槽深度试件P2-5的曲线明显高且长,延性相对最好;减小纤维复材粘贴层数的试件P2-4和减小纤维复材粘贴长度的试件P2-7,其曲线后段与试件P1-2几乎重合,但极限挠度值相对变小。可见,凹槽位置变低和板底跨缝粘贴纤维复材两项措施可增强叠合板的变形性能和延性。

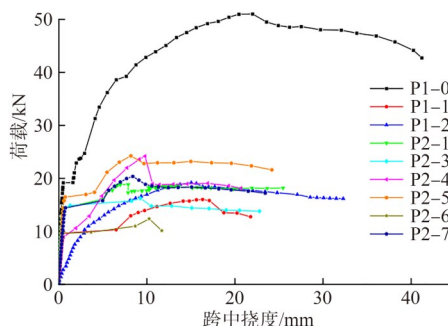


图8 试件荷载-跨中挠度关系

Fig. 8 Relations between load and mid-span deflection of specimens

2.4 应变分析

2.4.1 附加钢筋受拉应变

图9为各叠合板试件的附加钢筋跨中位置荷载-应变关系,对比分析可见:

1) 所有试件的附加钢筋在加载初期均表现出上升段“直且陡”的弹性性质,但试件P1-2由于加载前已受损,刚度明显降低。

2) 所有试件附加钢筋的荷载-应变曲线在弹性阶段末期屈服前后均出现“应变突增”段,这是由于

预制底板板缝开裂瞬间使板缝宽度突增所导致。

3) 和采取两项增强措施的试件 P2-1 相比,无增强措施的试件 P1-1 的弹性阶段相对较短(提前屈服),附加钢筋的极限应变值相对最低;仅在板边开槽试件 P1-2 的曲线接近试件 P2-1,其极限应变值略大;P2 组中试件 P2-4、P2-6 也提前屈服,但除试件 P2-6 以外,其余试件的变形曲线更高更长,极限应变值也有所提高;附加钢筋配置量增大(凹槽间距变密)但只贴 1 层纤维复材的试件 P2-4 的附加钢筋极限应变值相对最大,这是由于板底纤维复材承担的拉力相对变小,附加钢筋承担的拉力相对变大所致。

4) 变化参数试件。试件 P2-1 的极限应变值为 8.299×10^{-3} ,与其进行对比可以发现,试件 P2-3(加大附加钢筋间距减小配置量)的极限应变值为 10.787×10^{-3} ,是 P2-1 的 1.3 倍;减小附加钢筋锚固长度(凹槽长度)的试件 P2-6 曲线变低变短,其极限应变为 6.247×10^{-3} ,仅为试件 P2-1 的 75.27%;增加凹槽深度的试件 P2-5 的曲线明显变高;减小纤维复材粘贴层数的试件 P2-4 和减小纤维复材粘贴长度的试件 P2-7,其曲线在“应变突增”后再逐步升高,极限荷载值变大。可见,凹槽位置变低和纤维复材配置量减少的构件中附加钢筋承担更多截面受弯的拉力,更能充分发挥作用。

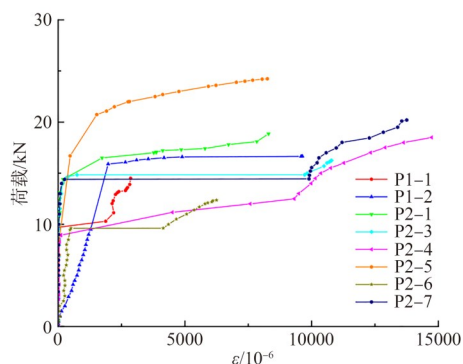


图9 附加钢筋跨中位置的荷载-应变关系

Fig. 9 Load-strain curves of additional rebars at mid-span position

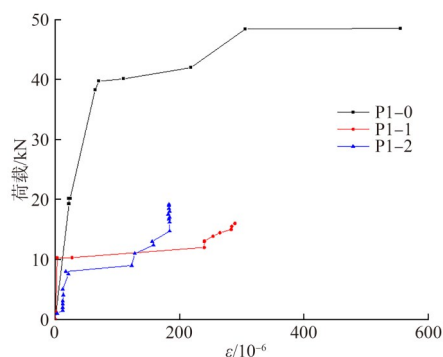
2.4.2 板底混凝土受拉应变

图 10 为各试件荷载与板底中部混凝土长跨方向应变的关系曲线,对比分析可见:

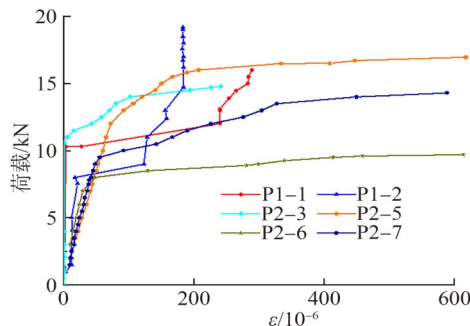
1) P1 组试件。与整浇试件 P1-0 相比,无增强措施的密拼叠合板试件 P1-1 板底拼缝两侧混凝土的应变、应力水平明显降低,极限应变对应的应力为 9.39 MPa,这是由于中间拼缝的存在,两侧混凝土间没有应力的传递,试件整体性较差;和试件 P1-

1 相比,仅对板边开槽的试件 P1-2 的极限荷载略高,但极限应变更小,对应的应力仅为 5.94 MPa。

2) 叠合板试件。相对 P1 组的 2 个叠合板试件, P2 组有 2 个试件 P2-1、P2-4 因应变片粘贴质量问题未能测到有效应变,测到跨中混凝土应变的 4 个试件中有 3 个的曲线更为平直,极限应变值明显增大,其中增加凹槽深度的试件 P2-5 最为突出,其极限应变对应的应力值为 20.09 MPa。可见,板底粘贴纤维复材确实能增强拼缝两侧混凝土之间的连接和应力传递,增强板的整体性。



(a) P1 组试件



(b) 叠合板试件

图 10 板底混凝土荷载-应变关系

Fig. 10 Load-strain curves of concrete at slab bottom

3 结论与建议

通过 9 个叠合板试件的抗弯性能对比试验,得到如下结论:

1) 密拼叠合板试件的承载力、刚度和延性均明显小于整浇板。板底设浅槽并用细粒混凝土粘贴纤维复材,有效解决了纤维复材在试件破坏前与叠合板发生剥离的问题。

2) 通过在板边开槽放置 U 型附加筋和板底跨缝粘贴纤维复材的增强措施,在附加筋锚固长度满足要求、纤维复材用量足够的前提下,可以在一定

程度上增强叠合板底部的应力传递和整体性,提高叠合板的受力性能。

3) 拼缝位置叠合面设置附加钢筋的配筋率和锚固长度对叠合板的受力性能有明显影响。减小拼缝处附加钢筋的配筋率和锚固长度,将大大削弱叠合板试件的受力性能,当附加筋配筋率和锚固长度各自降低 33% 时,试件的峰值荷载分别下降到对比试件的 86%、66%,故而设计中应充分保证附加钢筋有足够的配筋率和锚固长度。

4) 增加凹槽深度的试件 P2-5 表现出相对突出的承载能力和变形性能,荷载-挠度曲线相对高且平直,延性较好。

5) 极限状态时,纤维复材网格布部分条带在拼缝位置被拉断,充分发挥了作用。在加载过程中,纤维复材对板底的约束作用提高了叠合板的开裂荷载,加强了板底拼缝两侧的应力传递,减小了板缝“变形集中”的程度,提高了叠合板在正常使用状态的刚度和延性。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 叶献国, 华和贵, 徐天爽, 等. 叠合板拼接构造的试验研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 59-63.
- [3] 颜锋, 高杰, 田春雨, 等. 带接缝的混凝土叠合楼板足尺试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(10): 56-60.
- [4] 余泳涛, 赵勇, 高志强. 单缝密拼钢筋混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 29-37.
- [5] 恽燕春, 陈鹏, 王柏生, 等. 密拼叠合楼板受力性能研究[J]. 施工技术, 2018, 47(12): 75-79.
- [6] 林彦, 宋健凯, 仲崇廷. 不同拼缝构造措施的叠合板受力性能试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(6): 45-50.
- [7] 邴卿德, 林彦, 宋健凯, 等. 叠合板加强型密拼拼缝构造及受弯性能有限元分析[J]. 工业建筑, 2020, 50(9): 55-61.
- [8] 杨悦, 姜雪蔚, 聂鑫, 等. 开槽密拼混凝土叠合板受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(7): 142-151.
- [9] 肖彤, 张明山, 李本悦, 等. 叠合板板侧凹槽拼缝连接受弯性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(4): 842-854.
- [10] 肖宇, 李贤. 新型不出筋拼缝混凝土叠合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(5): 83-89.
- [11] 邓旭华, 廖桢颖, 赵思琪, 等. 新型预制拼缝楼板受弯性能试验研究[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 71-80.
- [12] 廖智强, 刘庆文, 陈甫亮, 等. 不同钢筋斜伸角度下叠合板拼缝试验研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(5): 143-151.
- [13] 何庆锋, 胡程群, 杨凯华, 等. 密拼叠合板拼缝构造及受力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 111-122.
- [14] 彭亚萍, 王文超, 金鹏, 等. 碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板静载试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(1): 205-210.
- [15] 金鹏. 多因素影响下 CFRP-混凝土密拼双向叠合楼板受力性能研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- [16] 王文超, 彭亚萍, 恽燕春, 等. 碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板抗弯承载能力分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 75-81.
- [17] 王文超. CFRP-混凝土密拼双向叠合楼板基本受力性能研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
- [18] 李泓霖. 碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板受力性能及设计方法研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
- [19] 王月昊. 碳纤维复材-混凝土密拼叠合楼板传力机制分析与设计方法[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
- [20] 王月昊, 彭亚萍. 竖向荷载作用下碳纤维增强复材-混凝土密拼双向叠合楼板传力机制分析[J]. 结构工程师, 2024, 40(4): 107-115.
- [21] AMIRREZA M, DAVOOD M, ELAHEH I. Empirical FRP-concrete effective bond length model for externally bonded reinforcement on the grooves[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 172: 323-338.
- [22] 中国建筑标准设计研究院. 桁架钢筋混凝土叠合板(60 mm 厚度板): 15G366-1[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.