



抗剪键对 UHPC 叠合板抗裂性能试验研究

刘 超¹, 李月霞², 李 碧³

(1. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 南宁理工学院, 广西 桂林 541006; 3. 河南越鹏建设工程有限公司, 河南 郑州 450040)

摘要:为探究不同抗剪键形式对超高性能混凝土(UHPC)叠合板抗裂性能的影响机制,本文通过开展1块UHPC整浇板与3块不同叠合面构造(含马镫钢筋、桁架钢筋抗剪键)的叠合板受弯性能试验,系统分析构造形式与叠合面抗剪键对试件破坏形态、裂缝扩展规律的影响机制。结果表明:1)UHPC板呈现典型受弯破坏特征,整体延性良好;2)受二次受力作用影响,叠合形式会降低试件初始开裂荷载,但构造形式(整浇与叠合)对破坏形态、裂缝扩展路径及延性指标的影响相对有限;3)抗剪键钢筋通过增强受拉区混凝土约束效应,可显著提高叠合板开裂荷载;同时,抗剪键钢筋参与受力后增加了受拉区与受压区钢筋的有效截面积,进一步提升了叠合板受弯承载力。对比无抗剪键叠合板、马镫钢筋叠合板、桁架钢筋叠合板的受弯承载力分别提高25%、30%,且桁架钢筋抗剪键在提升抗裂性与承载力的综合效果上更优。本文研究成果可为UHPC叠合板抗剪键的优化设计与工程应用提供理论依据与数据支撑。

关键词:UHPC叠合板; 抗裂性能; 抗剪键; 承载力

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)01-0031-08

doi:10.13402/j.gcjs.2026.01.005

Experimental study on shear keys to crack resistance of UHPC composite slabs

LIU Chao¹, LI Yuexia², LI Bi³

(1. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. Nanning College of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China;

3. Henan Yuepeng Construction Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450040, Henan, China)

Abstract: In order to study the influence mechanism of different shear key forms on the crack resistance of ultra-high performance concrete(UHPC) composite slabs, the flexural performance tests are conducted on one monolithic UHPC slab and three composite slabs with different composite interface configurations(including stirrup and truss shear keys) to systematically analyze the influencing mechanism of structural forms and shear keys of the composite surface on failure modes and crack propagation patterns of the specimens. The results indicate that: 1) UHPC slabs exhibit typical flexural failure characteristics with overall good ductility; 2) Due to secondary loading effects, the composite form will reduce the initial cracking load of the specimens, while the influence of structural form(monolithic vs. composite) on failure mode, crack propagation path, and ductility indices remains relatively limited; 3) Shear key reinforcement can significantly improve the cracking load of composite slabs by enhancing the confinement effect in the tensile zone; in the mean time, the

收稿日期: 2025-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868013); 2024年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY1763)

作者简介: 刘 超(1988—), 男, 博士, 工程师, 从事高性能混凝土方面的研究工作。

通信作者: 李月霞(1988—), 女, 副教授, 从事新型混凝土材料结构方面的教学、设计和研究工作。

shear key reinforcement participating in the force increases the effective cross-sectional area of tensile and compressive reinforcement and further enhances the flexural capacity of composite slabs. Compared to the composite slab without shear keys, the flexural capacities of the stirrup-reinforced composite slabs and truss-reinforced composite slabs increased by 25% and 30% respectively, and the truss shear key demonstrated superior comprehensive effectiveness in enhancing both crack resistance and load-bearing capacity. The study findings in this paper can provide theoretical foundations and data support for the optimized design and engineering application of shear keys in UHPC composite slabs.

Key words: UHPC composite slab; crack resistance; shear key; load-bearing capacity

在当前我国大力倡导可持续发展战略的背景下, 建筑行业的发展重心正逐步向绿色低碳建筑转移。《中国制造 2025》《“十四五” 建筑业发展规划》等政策文件明确提出将高性能复合材料列为重点发展领域, 鼓励新材料研发和产业化应用, 推广应用高性能混凝土、绿色建材等绿色建材产品。超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 主要由颗粒级配良好的石英砂、石英粉、水泥, 以及具有火山灰活性的工业废料 (粉煤灰、硅灰、硅微粉等掺合料) 组成^[1-3]。通过矿物掺合料制备 UHPC 可减少水泥用量、延长结构寿命, 兼具超高性能、耐久性、低碳环保特性和良好经济效益, 能弥补普通混凝土抗拉强度低、韧性差、大体积易开裂等缺点, 广泛应用于超高层、大跨度桥梁及装配式结构。《交通强国建设纲要》指出要推动新材料在桥梁、隧道等交通工程中的应用, UHPC 因其超高强度和耐久性成为关键技术之一; 上海市通过《上海市建筑节能和绿色建筑示范项目专项扶持办法》, 对 UHPC 预制构件示范项目提供最高 300 万元资助; 科技部通过“重点研发计划”支持 UHPC 在极端环境 (如海洋工程、核电站) 中的应用研究。国内外对 UHPC 已有大量研究, 主要集中在降低材料成本和创新制备工艺两个方面^[4], 例如通过使用碎石、碎屑取代部分石英砂, 采用矿物掺合料替代部分水泥用量等方法, 可在一定程度上降低成本。

UHPC 叠合板是一种超高强度新型装配式混凝土板, 能有效解决传统混凝土构件易开裂、寿命短的问题, 在建筑市场中展现出广阔应用潜力^[5]。近年来, 国内外专家学者已针对 UHPC 叠合板的受力性能进行了大量试验研究与理论分析。2016 年, HOU 等^[6]指出, 负弯矩区是大跨连续叠合板组合梁抗裂设计的关键。2020 年, WANG 等^[7]对装配式组

合构件进行试验研究, 表明在负弯矩区对组合梁施加体外预应力可提高构件抗裂性能。同年, 陈思^[8]研究了预应力筋张拉控制应力与分布数量对叠合板变形与抗裂性能的影响, 试验结果表明, 随着张拉控制应力与预应力筋分布数量的增加, 叠合板底板挠度降低, 抗裂性能显著改善。2024 年, 于铁嵩^[9]提出一种“UHPC - NC 叠合楼板”新结构, 指出该结构装配性能良好, 可提升叠合楼板的整体韧性与耐久性。2025 年陈旭东等^[10]设计了内置空心薄壁箱的钢筋桁架混凝土叠合板, 该叠合板不仅有效降低了自重, 满足规范对施工阶段和使用阶段承载力的要求, 且空心部分开裂后仍具备充分的承载力安全储备。

综上所述, 针对普通混凝土叠合板的抗裂性能已有较多研究, 而 UHPC 叠合板的抗裂性能研究相对较少。基于此, 本文通过试配制备 C130 高性能混凝土, 并将其应用于装配式叠合板构件中。通过研究叠合面不同抗剪键设置下, 构件形式与抗剪键对装配式叠合板抗裂性能的影响, 以期可为实际工程应用提供参考。

1 UHPC 力学性能试验

1.1 UHPC 配合比

经试配确定最优配合比后, 制作 8 组试块, 材料均为质量比, 具体配合比如表 1 所示。原材料特性如下: 普通硅酸盐水泥强度等级为 42.5; 硅粉平均粒度范围为 0.1 ~ 0.2 μm , SiO_2 质量分数为 94.7% 以上; 石英砂呈球形颗粒, 级配连续性良好, 平均粒度为 0.4 ~ 0.6 mm; 高效减水剂为淡黄色透明液体, 减水率为 25%; 细短钢纤维表面镀铜、呈细圆形, 直径为 0.22 mm, 长度为 12 ~ 15 mm, 长径比为 55 ~ 68, 抗拉强度不小于 2 000 MPa; 硅微粉平均粒度为 0.1 μm , 火山灰活性良好; 粉煤灰呈球形颗粒, 粒径小于 100 μm 。

表 1 UHPC 配合比(质量分数)

水泥	石英砂	硅灰	硅微粉	钢纤维	粉煤灰	减水剂	水
1	0.9	0.15	0.1	0.05	0.20	0.015	0.3

1.2 UHPC 力学性能试验结果

根据《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)和《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)，对 UHPC 的立方体、棱柱体、圆柱体抗压强度，以及抗折强度、劈裂抗拉强度进行测试，试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知：混凝土抗压强度达 130 ~ 140 MPa，对应强度等级可达 C130。超高性能混凝土的棱柱体轴心抗压强度与圆柱体抗压强度大体相同。棱柱体轴心抗压强度与圆柱体抗压强度随立方体试件抗压强度的提升呈同步增长趋势。棱柱体轴压强度与立方体强度的比值范围为 0.81 ~ 0.87，统计平均值为 0.85；圆柱体抗压强度与立方体强度的比值范围为 0.80 ~ 0.89，其均值亦稳定在 0.85 水平。

1.3 UHPC 力学性能比较

表 3 为普通混凝土、高强度混凝土、活性粉末混凝土(C130)的抗压强度、抗折强度、断裂能和弹性模量。由表 3 可知：C130 活性粉末混凝土的抗压强度为普通混凝土的 3 ~ 5 倍；其抗折强度最高达 20 MPa，是高强度混凝土的 2 ~ 3 倍、普通混凝土的 4 ~ 10 倍；断裂能、弹性模量也显著优

于普通混凝土与高性能混凝土。

2 试验设计

2.1 试件设计与制作

叠合板试件由下部预制混凝土底板、上部现浇混凝土顶板及连接二者的竖向抗剪钢筋(如桁架钢筋、马镫钢筋)构成。试验共设计两组 4 个试件：第一组为现浇板试件(编号 ZJB)，作为对照组；第二组为装配式叠合板试件，共 3 个(编号 DHB1 ~ DHB3)。装配式叠合板的预制底板、现浇层及抗剪钢筋的材料和尺寸均一致；试件所用混凝土均为 C130^[11]。装配式叠合板试件的整体尺寸为 3 020 mm × 600 mm × 130 mm，其中预制底板厚度为 70 mm、现浇层厚度为 60 mm；叠合面均采用人工纵向拉毛，拉毛深度不低于 4 mm(图 1)。试件主要参数如表 4 所示，截面尺寸、配筋及抗剪钢筋设计详见图 2 ~ 5。

2.2 加载方案

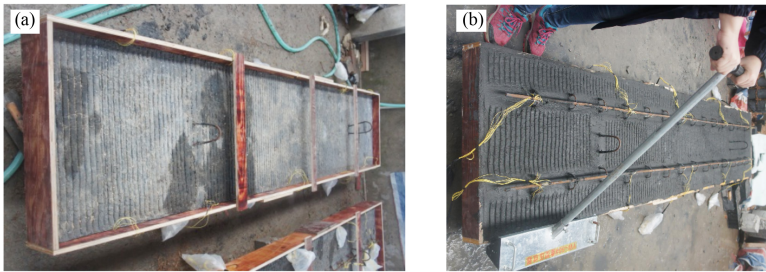
采用反向加载法，将试验板底面朝上放置于支座上。通过千斤顶施加荷载，将力传递至分配梁的悬挑端，计算得到支座反力，使跨中形成纯弯段。加载装置如图 6 所示。

表 2 UHPC 力学性能试验结果

试件编号	立方体抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	棱柱体轴心抗压强度/MPa	圆柱体抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	弹性模量/($\times 10^4$ N/mm ²)
A1	136.7	7.8	116.5	120.5	21.1	4.2
A2	135.2	7.5	109.5	114.5	19.5	4.1
A3	138.4	7.6	109.7	123.9	20.4	4.1
A4	137.5	9.2	106.3	115.2	21.0	4.1
A5	142.3	8.1	123.7	119.3	19.8	4.3
A6	134.9	9.1	117.6	116.8	15.5	4.2
A7	147.9	8.2	124.6	119.0	22.5	4.3
A8	143.4	8.5	115.9	121.7	21.6	4.2

表 3 普通混凝土、高强度混凝土、活性粉末混凝土主要力学性能比较

混凝土种类	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	断裂能/(kJ·m ⁻²)	弹性模量/GPa
普通混凝土	20 ~ 50	2 ~ 5	0.12	20 ~ 35
高强度混凝土	60 ~ 100	6 ~ 10	0.14	30 ~ 40
活性粉末混凝土	110 ~ 140	19 ~ 20	10 ~ 18	40 ~ 45



(a) 表面粗糙处理；(b) 后浇部分模板

图 1 预制底板叠合面的拉毛处理

表 4 试件参数

试件编号	构造形式	叠合面抗剪键	分布钢筋	受力钢筋
ZJB	整浇式	—	$\Phi 8@200$	$\Phi 12@150$
DHB1	叠合式	人工粗糙	$\Phi 8@200$	$\Phi 12@150$
DHB2	叠合式	马镫钢筋	$\Phi 8@200$	$\Phi 12@150$
DHB3	叠合式	桁架钢筋	$\Phi 8@200$	$\Phi 12@150$

mm

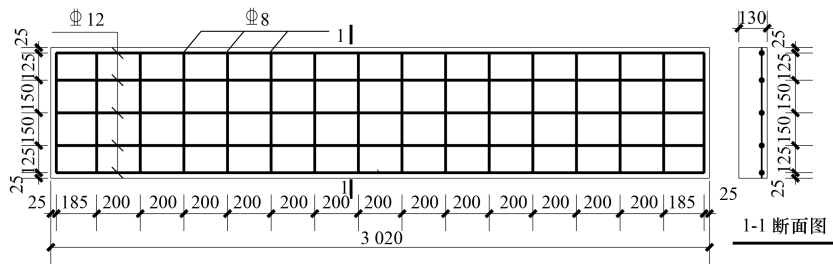


图 2 UHPC 整浇板 (ZJB)

mm

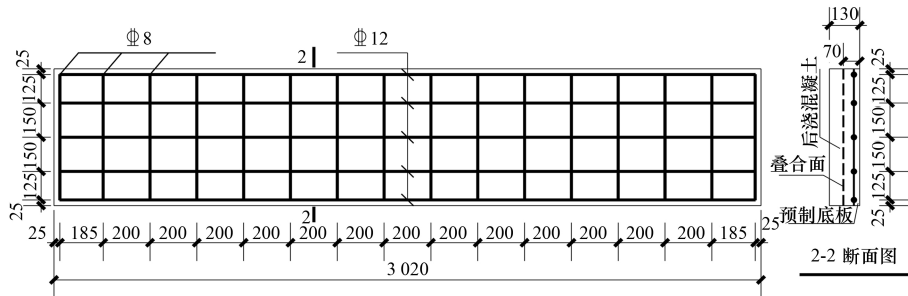


图 3 人工粗糙面叠合板 (DHB1)

mm

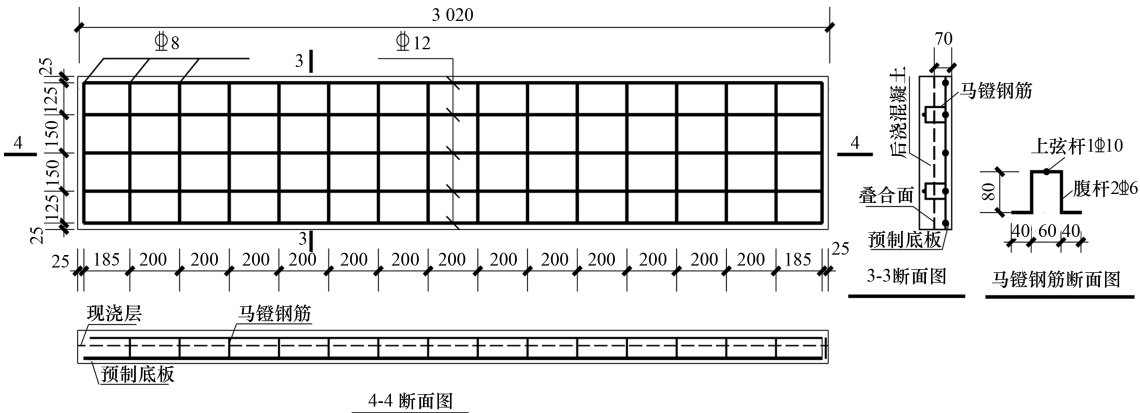


图 4 马镫钢筋抗剪键叠合板 (DHB2)

mm

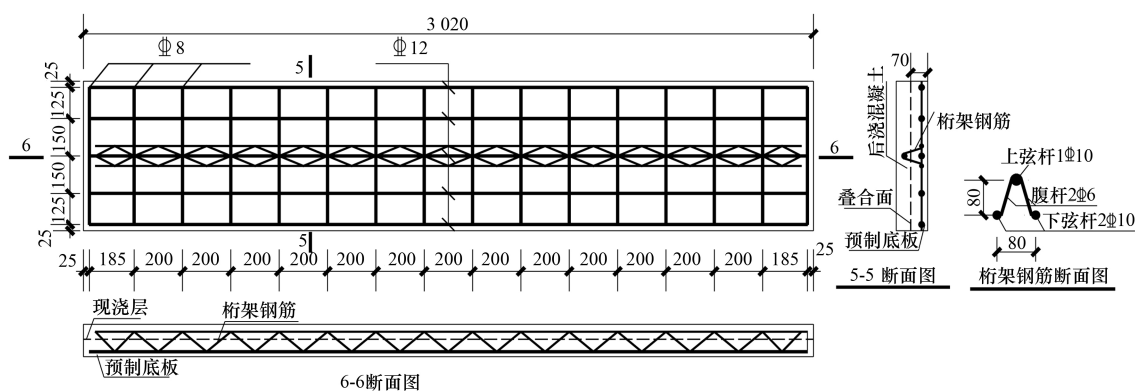


图 5 桁架钢筋抗剪键叠合板 (DHB3)

mm

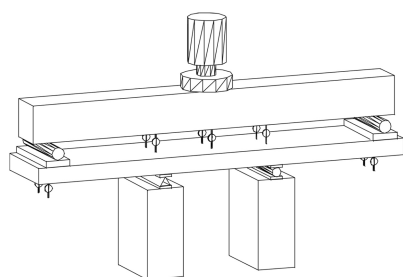


图 6 试验加载装置

3 破坏形态与裂缝发展情况

UHPC 板在竖向荷载作用下的破坏形态表现为典型的弯曲破坏,具体过程可分为 3 个阶段(图 7)。

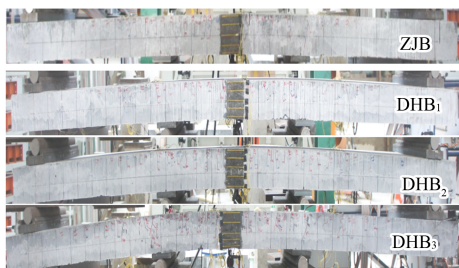


图 7 试件破坏形态

(1) 开裂前的弹性阶段。荷载较小时,混凝土与钢筋的应力应变均较小,板的挠度也较小,应力应变与荷载呈线性关系。

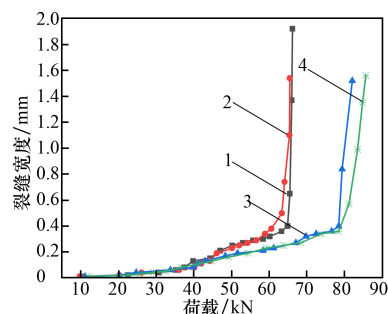
(2) 裂缝发展的弹塑性阶段。由于 UHPC 抗拉强度较高,试件直至荷载达到 9~12 kN 时,跨中纯弯段板底才开始出现极细小裂缝。此时荷载引起的弯曲应力已超过混凝土抗拉强度,但因 UHPC 中钢纤维的桥接作用(阻碍裂缝扩展),裂缝发展缓慢。当荷载增至约为 22 kN 时,纯弯段板底裂缝贯通,板侧开始出现新裂缝。随着荷载

继续增加,板底与板侧裂缝继续开展、数量增多,纯弯段内裂缝逐渐密布,跨中位置形成一条宽度较宽的主裂缝,钢筋开始屈服,试件进入弹塑性工作阶段。

(3) 破坏阶段。主裂缝出现后,挠度与裂缝宽度迅速发展,加载过程中可闻及钢纤维被拔出的“吱吱”声,最终达到极限荷载。此时最大裂缝宽度为 1.54 mm,试件宣告破坏,但未出现断裂、分层等现象,说明装配式叠合板试件的整体协调性能良好。卸除上部试验荷载后,试验板发生明显回弹,跨中挠度减小至 18.52 mm,挠度恢复量达 43%~50%,表现出良好的延性。

4 抗剪键对 UHPC 叠合板裂缝的影响分析

对比 ZJB 和 DHB1 的最大裂缝宽度曲线如图 8 所示。由图 8 可知: DHB1 在荷载约为 57 kN 时先于 ZJB 出现转折点,其最大裂缝宽度增长速度显著加快。这说明整浇与叠合两种构造形式对 UHPC 板最大裂缝的发展存在显著影响。叠合板较整浇板提前进入裂缝宽度快速发展阶段,主要因 UHPC



1—ZJB; 2—DHB1 (无抗剪键,人工粗糙面); 3—DHB2 (马凳钢筋抗剪键); 4—DHB3 (桁架钢筋抗剪键)。

图 8 荷载-裂缝宽度曲线

叠合板受拉钢筋存在“应力超前”现象,导致其受拉钢筋较整浇板提前屈服。

对比不同抗剪钢筋配置的叠合板最大裂缝宽度曲线可知:当荷载增至约 45 kN 时,各曲线出现分叉点。DHB1 裂缝宽度增长速度加快,而 DHB2 和 DHB3 的裂缝宽度发展速率开始低于 DHB1。这是因为荷载增大时,钢纤维逐渐被拔出,受拉钢筋应力增速加快,混凝土与受拉钢筋间的黏结-滑移量增大,进一步加剧 DHB1 裂缝扩展;而 DHB2 和 DHB3 由于配置抗剪钢筋,可有效抑制受拉钢筋应力增长,减少混凝土与钢筋间的黏结-滑移,从而延缓裂缝宽度发展。上述现象说明,在叠合面处设置抗剪钢筋能有效控制 UHPC 叠合板的裂缝宽度。此外,马镫钢筋配置的 DHB2 在裂缝宽度达 0.4 mm 后发展速率再次加快,而桁架钢筋配置的 DHB3 裂缝宽度发展始终更为平缓,表现出更优的延性。

试验将人眼观察到的第一条裂缝出现时对应的荷载定义为开裂荷载;将最大裂缝宽度达到 1.5 mm 时的承载力定义为受弯承载力,相关数据记录如表 5 所示。

表 5 各试验板的开裂荷载及受弯承载力 kN

试件编号	开裂荷载	受弯承载力
ZJB	10.6	66.2
DHB1	9.7	65.5
DHB2	11.1	82.1
DHB3	12.0	85.7

从开裂荷载、裂缝开展情况、破坏荷载对比来看,叠合板的开裂及破坏时间较整浇板早一些,但差异不大。这是由于叠合板的二次受力特性所致。浇筑时,预制底板下部受拉区混凝土已产生初始拉应力,且该拉应力受到上部后浇混凝土自

重的约束,直至上部后浇混凝土完全硬化,拉应力仍无法完全恢复。

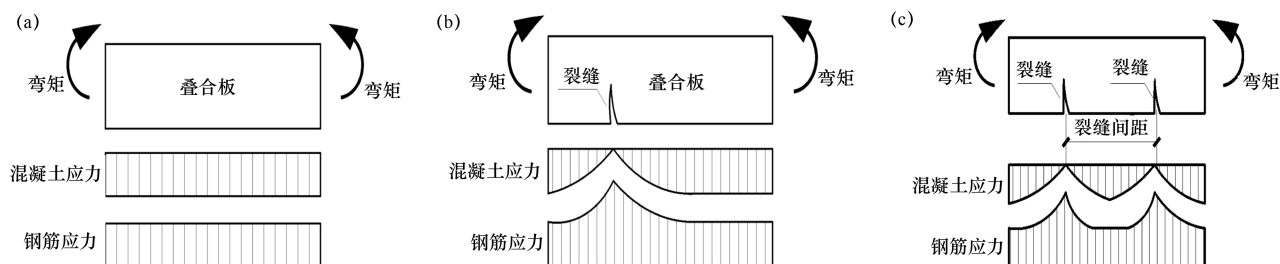
对比分析不同抗剪键对叠合板的受力性能的影响可知:设置马镫钢筋抗剪键的 DHB2 和设置桁架钢筋抗剪键的 DHB3,其开裂荷载分别为 11.1、12.0 kN。相较于无抗剪键的 DHB1,两者开裂荷载分别提升 14%、24%。这是因为抗剪钢筋可增强对受拉区混凝土的约束作用,从而提高叠合板开裂荷载。在加载过程中,ZJB 和 DHB1 的裂缝宽度增长速度较快,而 DHB2、DHB3 的裂缝宽度较 ZJB 和 DHB1 更缓慢。当荷载分别加至 82.1、85.7 kN 时,DHB2、DHB3 试件破坏;相较于 DHB1,两者承载力分别提高 25%、30%。此外,桁架钢筋较马镫钢筋对 UHPC 叠合板受弯承载力的提升效果更显著。这是因为桁架钢筋的腹杆呈 45°斜向布置,受拉时产生水平分力,可间接增加叠合板受拉钢筋的有效面积,进而大幅提升受弯承载力。

5 抗裂性能机理分析

5.1 叠合板混凝土开裂机理分析

钢筋混凝土构件的抗裂性能受多种因素影响,其作用机理较为复杂。各国学者提出了多种计算理论模型,其中黏结-滑移理论应用最为广泛。该理论由 DEB 等^[12]基于钢筋混凝土拉杆试验提出,核心观点:当外加荷载超过钢筋与混凝土间的黏结力时,二者发生相对滑移;变形不协调则会引发裂缝。

混凝土开裂前,黏结应力较小,钢筋与混凝土协调变形,钢筋应力在整个截面分布均匀,如图 9(a)所示。随着荷载增加,叠合板纯弯区段混凝土拉应力达到其抗拉强度,首批(一条或几条)



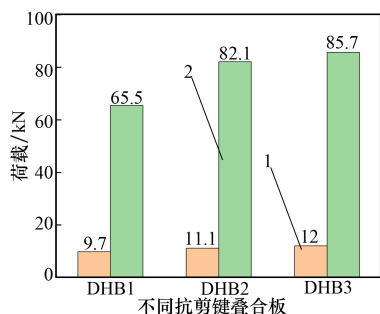
(a) 裂缝出现前; (b) 首批裂缝出现; (c) 第二批裂缝出现

图 9 裂缝的出现与开展

裂缝出现。此时,开裂处混凝土退出工作并向裂缝两侧回缩;裂缝截面处钢筋因需承担原由混凝土承担的拉力,应力发生突变并伸长,导致钢筋与混凝土间产生黏结滑移应力。随黏结滑移应力增大,混凝土回缩与钢筋伸长均受反向约束;钢筋应力向裂缝两侧传递并逐渐减小,混凝土拉应力向裂缝处集中,近裂缝区域应力趋近于 0,远裂缝区域拉应力增大,如图 9(b)所示。荷载继续增大时,黏结应力持续积累,距离首批裂缝约 1 m 处的混凝土截面受拉边缘拉应力再次达到抗拉强度,叠合板在该位置出现第二批裂缝,如图 9(c)所示。后续荷载增加过程中,裂缝宽度随钢筋与混凝土滑移量及钢筋应力增大而扩展,同时新裂缝持续产生,直至形成主裂缝。构件最终因主裂缝宽度超限或无法继续承载而破坏,试件宣告失效。

5.2 抗剪键对 UHPC 叠合板抗裂性能分析

根据试验结果绘制开裂荷载与极限荷载对比曲线,如图 10 所示。由图 10 可知:配置马镫钢 DHB3,其抗裂承载力和极限承载力均高于无抗剪键的叠合板 DHB1。这主要归因于两个方面:1)抗剪钢筋(马镫钢筋和桁架钢筋)可有效传递预制混凝土底板和现浇混凝土层间的剪力,确保二者协同工作,抑制水平滑移;2)抗剪钢筋提供可靠的叠合面抗剪作用,促使两层混凝土形成整体共同受力,从而间接减少因层间滑移引发的裂缝发展。此外,抗剪钢筋的配置增强了叠合板整体受力性能,优化了钢筋间黏结与协同效率,进而提高其受弯承载力、整体刚度及抗弯能力,最终使叠合板极限承载力优于无抗剪的 DHB1。



1—开裂荷载; 2—极限荷载。

图 10 抗剪键对承载力的影响

DHB3 的抗裂性能与极限承载力均优于 DHB2,这是由抗剪钢筋的构造形式差异决定。马

镫钢筋构造形式通常为“几”形或“Ω”形,可通过与预制混凝土底板、现浇混凝土层的机械咬合实现有效连接,提升叠合板整体刚度与抗弯性能;另外,马镫钢筋能够提供竖向剪力,一定程度上可抑制斜裂缝的发展。桁架钢筋由上弦钢筋、下弦钢筋及腹杆钢筋组成,形成立体桁架结构,可显著提高叠合板竖向刚度。其上弦钢筋埋入后浇叠合层,下弦钢筋锚固于预制底板,促使两层混凝土形成整体共同工作的力学行为,有效保证叠合面黏结性能,避免界面裂缝;同时,桁架钢筋的下弦杆与倾斜腹筋可协同承受水平拉力,相较马镫钢筋增加了叠合板的有效配筋面积,进而大幅提升其抗裂性能和极限承载力。

尽管马镫钢筋制作简单、施工难度较低,但桁架钢筋叠合板在抗裂性能、结构整体性和施工效率方面具备显著优势,已成为现代叠合板技术的主流。其成熟的技术体现和可靠的性能已被纳入国家及行业标准图集,如《桁架钢筋混凝土叠合板》、《钢筋桁架混凝土叠合板》(JG/T 368—2012)。

6 结 论

(1) UHPC 具有较高的力学性能,抗压强度可达 130 ~ 140 MPa;掺入钢纤维可显著提升混凝土的抗裂性能,其断裂能较普通混凝土、高性能混凝土具有更显著优势。

(2) 4 块试验板受力情况相似,均经历弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段。破坏前有明显预兆,延性较好,其破坏模式属于典型的弯曲破坏。

(3) 叠合面设置抗剪钢筋,可提高叠合板的连接性能、整体刚度及叠合面抗剪能力,有效增强其抗裂性能和抗弯承载力。在抗裂机理、抗裂性能及结构整体性等方面,桁架钢筋优于马镫钢筋,已成为现代叠合板技术的主流应用方向。

参考文献:

- [1] YANG S L, MILLARD S G, SOUTSOS M N, et al. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2291 - 2298.

- [2] 李少丽,王乾峰. 高性能混凝土配合比设计及力学强度试验研究[J]. 混凝土,2020(3):117-118;123.
- [3] 唐咸远,马杰灵,罗杰,等. 钢渣微粉生态型超高性能混凝土力学性能影响因素分析[J]. 硅酸盐通报,2023,42(2):607-617.
- [4] 易双秦,刘开志,邱晶,等. 吸水珊瑚砂作为超高性能混凝土(UHPC)内养护介质的研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(8):2506-2512.
- [5] LIU J P,HU H F,LI J,et al. Flexural behavior of prestressed concrete composite slab with precast inverted T-shaped ribbed panels[J]. Engineering Structures,2020,215:110687.
- [6] HOU H T,LIU X,QU B,et al. Experimental evaluation of flexural behavior of composite beams with cast-in-place concrete slabs on precast prestressed concrete decks [J]. Engineering Structures,2016,126:405-416.
- [7] WANG Y H,YU J,LIU J P,et al. Experimental study on assembled monolithic steel-prestressed concrete composite beam in negative moment[J]. Journal of Constructional Steel Research,2020,167:105667.
- [8] 陈思. 部分预应力混凝土叠合板底板力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2020(6):53-56.
- [9] 于铁嵩. UHPC-NC 装配式叠合楼板弯曲性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2024.
- [10] 陈旭东,马芹永. 钢筋桁架混凝土空心叠合板静力性能试验与破坏分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2025,59(3):480-487.
- [11] 李月霞,刘超,金凌志. 高强钢筋活性粉末混凝土梁的抗剪承载力试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2017,38(4):464-469.
- [12] SALIGAR R. High-grade steel in reinforced concrete: Present [C]//2nd Congress of IABSE. Berlin-Munich: IABSE,1936.