

预制底板钢筋弯起叠合板拼缝承载力分析

王瑞 邓丽 雷宇康 戴宇鑫 刘承威

湖南工程学院 湖南 湘潭 411104

【摘要】：本文针对预制底板叠合板跨中拼缝的受力性能进行了系统研究。通过设计8块足尺试件开展静载试验，分析了跨中裂缝发展、荷载-挠度关系及钢筋应变规律。结果表明，经弯起钢筋与附加钢筋等强配筋处理后，拼缝处未出现剥离破坏，叠合板整体表现出与现浇板相当的抗弯承载力。进一步建立ABAQUS有限元模型，采用混凝土塑性损伤本构与钢筋双折线模型，模拟结果与试验高度吻合。在此基础上研究了附加钢筋直径与叠合区底板厚度的影响规律。结果显示，钢筋直径对整体受弯性能影响不显著，而底板厚度对屈服阶段敏感，对极限荷载影响较小。研究表明，合理设计配筋与底板厚度可有效保证叠合板拼缝的等效受力性能，为装配式混凝土结构推广应用提供了理论依据与设计参考。

【关键词】：叠合板；拼缝；承载力；有限元分析

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.069

引言

随着装配式混凝土结构的快速发展，叠合板作为预制构件在建筑工程中得到广泛应用。然而，拼缝区域的受力性能始终是影响其整体安全性与耐久性的关键问题。为深入揭示跨中拼缝的传力机制，本研究在系统试验与有限元模拟的基础上，对叠合板与现浇板在弯矩作用下的差异进行了对比。试验部分采用足尺试件，通过加载曲线、裂缝分布与钢筋应变结果，直观展示了叠合拼缝的受力状态。

1 试验概况

本研究围绕边缘叠合板跨中拼缝的受力传递，设计8块试件，混凝土为C30，保护层厚度15mm，受拉钢筋采用HRB400。试件几何尺寸为4800×1010×130~150mm，其中拼缝叠合板由两块2400mm预制底板在跨中对拼形成，靠近拼缝的底筋端部弯起90°，叠合面凿毛粗糙度不小于4mm（具体见图1）。拼缝处按等强原则配置立体附加钢筋与环形钢筋，槽口宽度按附加钢筋最大直径的0.8lab确定。

表1 试件参数

| 试件编号 | 附加钢筋直径/mm | 叠合区预制底板厚度/mm | 配筋设计 |
|------|-----------|--------------|------|
| MD1 | 7 | 25 | 等强配筋 |
| MD2 | 10 | 25 | 等强配筋 |
| MD3 | 12 | 25 | 等强配筋 |
| MH1 | 10 | 25 | 等强配筋 |
| MH2 | 10 | 35 | 等强配筋 |
| MH3 | 10 | 45 | 等强配筋 |

2 试验结果

2.1 破坏过程分析

试验显示，现浇对比件BD1与叠合板BD6c同属典型受弯破坏，跨中首次裂缝约出现在4kN，BD6c板东侧跨中裂缝宽度约0.16mm，随荷载增加裂缝逐步扩展，BD1在5kN、BD6c在9kN时跨中裂缝达0.18mm。两试件峰值荷载分别为15.83kN与16.62kN，对应跨中挠度约180mm与133mm。裂缝分布方面，BD1较均匀而BD6c条数更少、单缝更宽。荷载-挠度曲线基本重合，极限承载力相当，极限荷载比 $16.62/15.83 \approx 1.05$ ，证明按等强设计与构造处理的拼缝能获得与现浇板等效的抗弯能力。

2.2 钢筋的应变结果

在试件BD1钢筋网片上布置XJ1~XJ5共5个应变片，在试件BD6c预制底板钢筋不同位置布置D1~D8共8个应变片，附加钢筋上粘结了H1~H310540共3个应变片，根据钢筋应变片布置应变测试结果显示，现浇板BD1与叠合板BD6c的钢筋应变发展趋势高度一致。随着荷载增加，纵向受拉钢筋应变逐渐增大，在破坏阶段均达到屈服水平，验证了钢筋的充分工作状态。

在附加钢筋的监测中，H2测点位于附加箍筋的中点，其应变值最大，并在极限状态达到屈服，而H1与H3的应变值相对较低，且均未达到屈服。整体来看，附加钢筋大部分应变控制在 1×10^{-3} 以内，距离跨中拼缝越远钢筋应变越小。

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

本研究采用ABAQUS有限元软件建立与叠合板

试件几何尺寸和边界条件一致的数值模型，以便深入探讨钢筋弯起及附加钢筋配置对拼缝受力性能的影响。混凝土部分采用 C3D8R 三维八节点缩减积分单元建模，钢筋则采用 T3D2 二节点桁架单元，能够有效反映受弯构件中钢筋受力与混凝土损伤的耦合行为。钢筋本构采用双折线模型，屈服强度与极限抗拉强度分别取实测值 473MPa 与 667MPa，其第二折线斜率取 0.01Es，以保证应变硬化阶段与试验结果的契合度。

在约束假设上，因试验过程中未观察到钢筋与混凝土界面的滑移破坏，亦未发生叠合面沿界面撕裂的情况，因此建模时假定预制与现浇混凝土粘结良好，钢筋与混凝土间亦满足完全锚固条件^[2]。钢筋与混凝土通过 EmbeddedRegion 约束模拟嵌入，叠合面采用 Tie 约束来保证整体受力连续性。

3.2 模拟结果分析

(1) 钢筋应力：以典型试件 BD6c 为例分析有限元模拟结果。随着荷载逐步增加，预制底板钢筋应力逐渐升高，但由于屈服需要一定锚固长度，靠近拼缝位置的钢筋应力明显偏低，而在跨中区域则逐渐进入屈服状态。当跨中挠度达到约 140mm 时，试件达到极限状态，钢筋整体进入屈服阶段。模拟结果显示，预制底板钢筋屈服位置与拼缝端部的距离小于 282mm，说明钢筋弯起可显著缩短锚固长度，增强了钢筋与混凝土的协同工作能力。

(2) 受拉损伤和裂缝：BD6c 叠合损伤最早出现在预制板与现浇板斜面交界处下方，随后随荷载增加逐渐向跨中纯弯区扩展，最终在跨中区域形成较为均匀的受拉损伤带，这与试验中观察到跨中裂缝先出现并逐渐发展的现象一致。

值得注意的是，BD6c 叠合板在拼缝处附加钢筋的存在显著抑制了拼缝区域的裂缝扩展。模拟显示该处受拉损伤因子极小，几乎可以忽略，说明试件 BD6c 叠合板在受力过程中，拼缝处预制底板基本不受力，受力荷载由现浇板承担与试验基本吻合。这种规律不仅与现浇板裂缝均匀发展的特征相吻合，也印证了弯起钢筋及附加钢筋对裂缝控制的协同效果。对比其他试件(MD 系列与 MH 系列)，其裂缝发展规律与 BD6c 基本一致。

(3) 荷载-挠度曲线：有限元模拟所得荷载-挠度曲线与试验结果对比如图 1 所示。两者发展趋势高度一致，均表现为典型受弯破坏模式：曲线初期呈线性增长，屈服后逐渐进入非线性阶段，并最终达到极

限荷载。试验结果显示极限荷载为 16.24kN，而模拟预测值为 17.06kN，二者相差 5.04%，误差范围可接受。这一差异主要源于模拟中加载与边界条件的理想化处理，以及材料本构曲线与实际混凝土非均质性之间的差别。此外，曲线对比表明模拟在屈服点前后均能准确预测挠度发展过程，尤其在极限阶段的预测具有较高可信度。这表明模型能够有效反映叠合板的受力与变形规律，为进一步的参数分析提供了可靠依据。

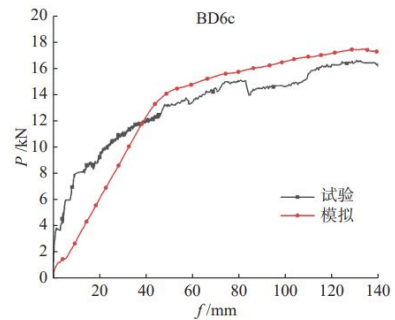


图 1 BD6c 荷载-挠度曲线对比图

3.3 影响因素分析

(1) 附加钢筋直径影响：为研究附加钢筋直径对拼缝承载性能的作用，建立了 MD1~MD3 三组等强配筋模型，直径分别为 7mm、10mm 与 12mm。图 2 与表 2 对比结果显示，三组试件荷载-挠度曲线发展规律基本一致，屈服荷载约 17kN，屈服挠度约 50mm，极限荷载维持在 18.60kN 左右。模拟值与计算值的比值在屈服荷载阶段为 1.03~1.05，在极限荷载的比值为 1.07~1.09，均大于 1，说明模拟预测的承载力略偏保守。

表 2 叠合板承载力对比

| 试件编号 | Pyj/kN | Puj/kN | Pym/kN | Pum/kN | Pym/Pyj | Pum/Puj |
|------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| MD1 | 16.42 | 17.29 | 17.06 | 18.61 | 1.04 | 1.08 |
| MD2 | 16.68 | 17.62 | 17.32 | 18.85 | 1.04 | 1.07 |
| MD3 | 17.02 | 18.08 | 17.65 | 19.55 | 1.04 | 1.08 |

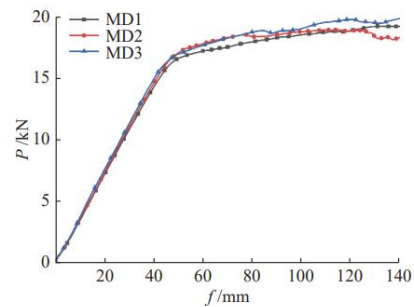


图 2 不同钢筋直径叠合板荷载-挠度曲线图

值得强调的是,在等强配筋条件下,仅改变附加钢筋直径并未对整体受弯性能产生显著差异。这是因为附加钢筋数量与直径的组合仍满足等强要求,且搭接长度按 $0.8l_{ab}$ 设置,保证了足够的锚固长度。因此,直径的改变主要影响局部应力分布,对整体承载能力作用有限。该结果表明,在工程设计中可通过合理选取钢筋直径与布置方式,达到既满足承载力要求又优化施工工艺的目的。

(2) 叠合区预制底板厚度影响:对MH1~MH3三组试件进行分析,其叠合区预制底板厚度分别为25mm、35mm与45mm。随着厚度增加,屈服荷载模拟值相对计算值出现下降趋势,分别减少约2%与11%。具体而言,屈服荷载比值在0.89~1.02之间,部分试件略低于理论值,说明较厚的底板可能导致初始屈服提前发生。

钢筋锚固端位于预制底板内,弯折端位于叠合区域锚固于现浇混凝土层中,底板钢筋两端直线锚固和

弯折锚固都具有一定的锚固长度以实现应力的传递,这使得预制底板与叠合区附加钢筋连续受力,实现了弯矩的有效传递。因此,在设计实践中,应综合考虑施工便利性与经济性,选择适宜厚度以保证结构性能。

4 结论

本文通过试验与有限元分析相结合的方式,系统揭示了预制底板叠合板跨中拼缝的受力机制。结果表明,经合理构造处理的拼缝能够获得与现浇板等效的抗弯性能,裂缝分布与荷载-挠度曲线均表现出良好的一致性。有限元模拟验证了弯起钢筋缩短锚固长度及附加钢筋分担拼缝受力的作用,并准确反映了裂缝发展规律。参数分析进一步说明,附加钢筋直径对整体承载力影响有限,在工程实践中,应从配筋设计、界面处理和施工质量控制等方面协同优化,以实现叠合板结构的安全、高效与耐久,为装配式混凝土建筑的推广应用提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 魏树健.预应力混凝土叠合板在多层装配式建筑中的应用[J].砖瓦,2025,(09):119-123.
- [2] 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(03):480-487.
- [3] 周广强,李书蓉,张鑫,等.预应力混凝土钢管桁架叠合板力学性能试验研究[J].建筑结构,2025,55(04):26-31.
- [4] 张锡治,黄俊伟,马相,等.免拆纤维板底模钢筋桁架叠合板受弯性能试验[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(09):902-911.