

钢—混组合结构剪力键力学性能研究

邹麒霖¹, 张成龙¹, 周阳^{1*}, 刘瑞²

(1. 成都大学建筑与土木工程学院, 四川成都 610106;
2. 四川省建筑工程质量检测中心有限公司, 四川成都 610000)

摘要 本文系统梳理了钢—混组合结构中剪力钉和 PBL 剪力键力学机理研究成果, 研究表明: 剪力钉的长度、直径与材质, 都是其极限承载能力与荷载—滑移关系的关键影响因素; 在疲劳荷载作用下, 剪力钉承载能力有一定的退化; 同时, 各国规范提出的承载能力计算式低估了 UHPC 中剪力钉的抗剪能力; 组合结构中 PBL 剪力键的力学性能主要受其贯穿钢筋直径、开孔板厚度和开孔板孔径等影响; 相较于剪力钉, PBL 具有更好的变形能力和抗疲劳退化能力; 将剪力钉和 PBL 剪力键组合使用, 可在有限布置范围内提高组合结构整体性、延性和抗疲劳性能。

关键词 钢—混组合结构; 剪力钉; PBL 剪力键; 力学性能

基金项目: 四川省科技计划资助“钢-UHPC 组合结构和混合结构复合剪力键力学机理研究”(项目编号: 2024NSF SC0926)。

中图分类号: TU311

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.001

0 引言

钢—混凝土组合梁结合了钢材和混凝土两种材料的优势, 兼具钢材优秀的抗拉性能与混凝土的抗压性能, 并能使两种材料产生协同作用, 达到“1+1>2”的效果, 因而被广泛应用于建筑结构和桥梁结构中^[1-2]。然而, 普通混凝土抗拉强度较低, 应用于组合梁负弯矩区时易出现裂缝, 影响结构受力性能与耐久性。而超高性能混凝土(UHPC)相较于普通混凝土(NC), 兼具更高的强度、韧性与耐久性, 因此采用UHPC替代传统混凝土所形成的钢-UHPC组合结构具备优异的力学性能, 应用前景广阔。

目前, 在实际工程中应用较为广泛的剪力连接件主要包括剪力钉和 PBL 剪力键。剪力钉施工工艺成熟, 经济可靠, 但抗剪承载力与刚度相对较低; PBL 剪力键则兼展现出承载力高、刚度大、延性好等综合力学特性^[3]。使其能够有效传递大剪力, 能抑制界面滑移并具备良好的塑性变形能力。为推动钢-UHPC 组合结构应用, 本文系统梳理了剪力钉力学性能的研究进展。

1 剪力钉力学性能研究

1.1 静力特性研究

1. 抗剪承载力。推出试验是研究剪力钉抗剪性能的主要研究方法, 通过改变其直径、长度、布置形式

及界面处理等因素, 系统分析对抗剪性能的影响。各国规范也针对其在普通混凝土中的极限承载力给出了具体计算公式。众多学者针对 UHPC 中剪力钉的抗剪性能、剪切刚度及荷载—滑移等力学性能开展研究。武芳文^[4]等设计了 8 个剪力钉试件进行推出试验, 探讨了各设计参数, 如剪力钉规格及长度、混凝土类型对其极限抗剪承载力的影响。邓宗才^[5]等设计了 6 个钢-UHPC 轻型组合结构短剪力钉试件, 考察了剪力钉规格、长度、布设数量及界面黏结对其极限承载能力的影响, 在此基础上提出了适用于计算 UHPC 中剪力钉的抗剪承载力的预测公式, 并构建了荷载—滑移模型。陈志丹^[6]等通过 13 个不同长度的推出试验发现, 所有试件破坏模式均为剪力钉剪断, 并据此提出了 UHPC 中剪力钉的抗剪承载力经验公式与荷载—滑移本构模型。研究表明, 规范推荐的剪力钉承载能力计算公式低估了 UHPC 中剪力键的抗剪承载能力。

2. 荷载—滑移曲线。荷载—滑移曲线是研究材料力学性能的重要手段, 反映材料在不同荷载下的滑移行为及其力学响应。武芳文^[7]等指出剪力钉直径对荷载—滑移曲线影响显著。邓宗才^[8]等的研究进一步揭示了剪力键几何参数对其力学性能的影响规律: 增大直径能显著提升剪力键的抗剪承载力、弹性及塑性刚度; 减小纵向间距对单个剪力键的抗剪强度影响不显

*本文通信作者, E-mail: zhouyangswjtu@163.com。

著；而在相同间距内增加剪力键数量，虽能提高组合结构的整体抗剪强度，却会牺牲其延性变形能力。

3. 抗剪刚度。抗剪刚度是能够表征材料或构件抵抗剪切作用下变形能力的关键参数，对理解钢—混凝土组合结构界面滑移性能及整体非线性行为具有重要意义。其影响因素包括剪力钉直径、保护层厚度、长径比、剪力钉与混凝土弹性模量之比等。在荷载—滑移曲线上任意某一点处的割线模量，反映对应该点的抗剪刚度特性。计算并确定组合结构中剪力钉的抗剪刚度有多种途径，如采用组合结构中钢梁和混凝土梁接触界面在特定滑移量（如0.2 mm或0.8 mm）时荷载—滑移曲线所对应的割线进行剪力钉的抗剪刚度计算，或采用近似公式进行计算，日本规范（JSCE）建议以承载力1/3对应的点作为割线端点，欧洲规范则建议取70%受剪承载力处。徐启智^[9]分别采用1/3 Pu、0.7 Pu、0.5 Pu及0.2 mm滑移点作为割线端点分析界面抗剪刚度，并指出：大直径短钉与UHPC形成的组合结构具有较高抗剪刚度，可有效抑制界面相对滑移，提高抗滑移性能。邓宗才^[10]等研究表明，直径16 mm剪力钉的抗剪刚度明显高于13 mm剪力钉，说明直径增大有助于提升抗剪性能与剪切刚度。

1.2 疲劳性能研究

1. 抗疲劳性能。抗疲劳性能指材料在循环荷载作用下抵抗疲劳破坏的能力。剪力钉作为连接混凝土与钢梁的关键构件，其疲劳性能备受关注。卫星^[11]等以钢与混凝土之间的相对滑移量作为指标，通过设计正交疲劳试验，系统研究了PBL剪力键疲劳破坏机理和S-N曲线；李萌^[12]通过推出试验发现，钢-UHPC组合结构中的短剪力钉相较于普通混凝土中的剪力钉具有更优的疲劳性能。孙艳华^[13]基于有限元方法提出了钢-UHPC组合结构中短剪力钉疲劳寿命的预测公式，适用于UHPC中剪力钉的疲劳性能评估。

2. 疲劳退化能力。疲劳退化能力指结构或构件在循环载荷下抵抗损伤累积并维持性能的能力。对剪力钉而言，评估其疲劳退化能力至关重要。石广玉等^[14]开发的三维断裂力学模型，成功实现了对剪力钉焊缝疲劳裂纹扩展的精确模拟与寿命预测。该模型为评估剪力钉的疲劳退化性能提供了有效工具。为进一步提升其适用性，研究者认为后续工作需考虑随机荷载与材料非均匀性等复杂因素。

2 PBL剪力键力学性能研究

PBL作为一类高效的抗剪连接件，因其优越的承载力、较高的抗剪刚度以及良好的延性表现而受到广泛

关注。然而，其抗剪性能存在明显的方向依赖性。其抗剪承载能力受抗剪钢板尺寸、端部承压条件及贯穿钢筋设置等因素影响。

2.1 静力特性研究

1. 抗剪承载力。肖林等^[15]的推出试验表明，在混合梁钢混结合段中，采用UHPC能显著强化PBL剪力键的性能，其承载力与抗剪刚度分别获得了超过30%与60%的提升。该研究也将开孔钢板厚度确定为影响其力学行为与破坏模式的重要因素。在承载机理方面，张钰菲^[16]结合推出试验与有限元分析，揭示了组合结构中的PBL剪力键极限承载力机制，并明确了关键参数。在应用层面，王序^[17]的研究表明，采用高强纤维混凝土与UHPC的PBL连接组合梁，其破坏模式均表现为钢筋剪断，且混凝土能保持良好的整体性。方志等^[18]通过试验与理论分析发现，抗剪钢板尺寸是影响PBL剪力键力学响应及破坏模式的关键因素；贯穿钢筋对抗剪承载力的提升效果随UHPC榫损伤程度增大而增加，由无明显损伤时的5.3%提高至整体压碎时的14.9%。基于此，研究推导并验证了钢-UHPC组合桥面板中PBL剪力键的抗剪承载力计算公式。

2. 荷载—滑移曲线。PBL剪力键的载荷—位移响应过程可划分为弹性、弹塑性与破坏三个阶段。在初始的弹性阶段，曲线基本保持线性，但在接近屈服点时会发生偏离。这种偏离的机理因试件而异：在抗剪钢板较弱的试件中，主要归因于钢板与UHPC间界面粘结的逐步退化；而在钢板较强的试件中，UHPC材料的开裂是更为关键的诱因。方志^[19]等试验表明，增加抗剪钢板剪切面积可显著提高试件极限荷载与极限滑移，且延性系数基本保持稳定。随抗剪能力增强，破坏模式从“钢板剪断（UHPC无损）”依次发展为“UHPC榫局部压碎后钢板剪断”和“UHPC榫整体压碎后钢板剪断”，相应极限荷载分别提升97.8%和199.3%，极限滑移增加40%与126.7%。

3. 抗剪刚度。抗剪钢板设置端部承压后，其下部区域可协同参与抗剪工作，这增加了一倍的有效剪切面积，从而显著提升组合结构中PBL剪力键的抗剪刚度与结构的极限承载力。研究指出，增加抗剪钢板的厚度，对于改善剪力键的纵向应力分布均匀性作用不明显。对于UHPC试件中的PBL剪力键，当开孔数量保持不变时，通过适当配置较大直径的贯穿钢筋虽有助于提高整体构件的抗剪刚度，但会相应使得孔中混凝土的粗骨料含量减少，可能对刚度产生一定的削弱效应。因此，在设计过程中需统筹考虑贯穿钢筋直径与孔

洞面积的匹配关系，以实现刚度和承载力的协同优化。

2.2 疲劳性能研究

1. 抗疲劳性能。PBL 连接件的疲劳性能表征其在循环荷载下的力学行为，涵盖破坏模式、损伤机理与剩余承载力等。其疲劳损伤的演化过程因构造而异：带贯穿钢筋的试件主要表现为混凝土板开裂、滑移累积及混凝土块的逐步剥离；而无贯穿钢筋试件的损伤则集中于滑移的持续增长。胡旭辉^[20]等试验研究表明，疲劳荷载下 PBL 剪力键的破坏始于混凝土榫失效，继而引发贯穿钢筋剪切破坏，最终导致钢板产生疲劳裂纹。武芳文等^[21]通过对比研究指出：PBL 剪力键在 UHPC 与 NC 中最终均发生贯穿钢筋的剪切破坏，破坏模式高度一致。然而，UHPC 试件在受力过程中显著抑制了裂缝的开展，表现为裂缝数量少、扩展缓慢，从而使混凝土部分保持更好的完整性和更轻微的损伤。

2. 疲劳退化能力。汪炳^[22]通过标准推出试验对比发现，经历疲劳荷载后，剪力钉与 PBL 连接件的剩余抗剪承载力与刚度均呈非线性劣化，其中剪力钉的退化更为显著。在延性方面，PBL 连接件明显优于剪力钉，其较高的延性系数表明其具有更优的疲劳变形与耗能能力。廖轩^[23]研究表明，UHPC 中 PBL 剪力键的疲劳损伤演化呈现明确的三阶段特征：初始阶段（占比常< 5%）、稳定扩展阶段（85% ~ 90%）与快速破坏阶段（约 10%）。降低荷载峰值或幅值会缩短初始与破坏阶段，显著延长稳定扩展阶段。在疲劳过程中，其抗剪刚度持续退化，长期刚度随疲劳次数呈两阶段线性下降，并随动态滑移量遵循幂函数退化规律。

3 结论

本文对钢—混组合结构中常用的两种剪力连接件极限承载能力、荷载—滑移曲线和疲劳性能等研究成果进行总结和分析，研究结果表明：（1）剪力钉方面，增大直径可显著提升抗剪承载力与刚度，增加长度主要改善刚度，而增加数量会提高抗剪强度但降低延性。界面黏结强化有助于提升短钉的弹性剪切刚度。疲劳荷载下其刚度与承载力均呈现退化，且现行规范对 UHPC 中剪力钉承载力的计算普遍偏于保守。（2）PBL 剪力键的力学性能受贯穿钢筋、板厚及孔径等参数影响，相较于剪力钉表现出更优的延性与抗疲劳性能。采用 UHPC 材料可进一步提升其承载力与抗剪刚度。剪力钉和 PBL 剪力键两者都具有一定的优势，如若两者组合使用，可在有限布设空间内协同提升结构的承载能力、变形能力及整体可靠度。

参考文献：

- [1] 聂建国, 陶慕轩, 吴丽丽, 等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(06): 110-122.
- [2] 武芳文, 冯彦鹏, 戴君, 等. 钢-UHPC 组合结构中栓钉剪力键力学性能研究 [J]. 工程力学, 2022, 39(02): 222-234, 243.
- [3] 周阳, 蒲黔辉, 施洲, 等. 复合剪力连接件群钢-混凝土段力学性能研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 13058.
- [4] 同 [2].
- [5] 邓宗才, 黄松, 薛会青. 钢-UHPC 轻型组合结构短栓钉抗剪性能试验研究 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(01): 42-52.
- [6] 陈志丹, 马冰, 高立强. 钢-UHPC 组合梁的长栓钉连接件抗剪性能研究 [J]. 桥梁建设, 2023, 53(06): 79-85.
- [7] 同 [2].
- [8] 同 [5].
- [9] 徐启智, 王景全, 谭豫卿, 等. UHPC 薄板中大直径短栓钉抗剪性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45(S1): 291-303.
- [10] 同 [5].
- [11] 卫星, 肖林, 温宗意. 钢-混凝土组合结构 PBL 剪力键疲劳损伤演化机理分析 [J]. 钢结构, 2018, 33(12): 48-51, 38.
- [12] 李萌, 邵旭东, 曹君辉, 等. UHPC 中短栓钉抗剪性能试验及理论分析 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(08): 191-204.
- [13] 孙艳华, 谭本坤, 雷顺成, 等. 钢-UHPC 组合结构的栓钉连接件疲劳性能分析 [J]. 公路工程, 2022, 47(02): 70-76.
- [14] 石广玉, 李广耀. 基于断裂力学的钢-UHPC 组合结构中栓钉的疲劳寿命评估 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(02): 102-113.
- [15] 肖林, 廖轩, 卫星, 等. UHPC 中 PBL 剪力键力学性能试验研究 [J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 157-164.
- [16] 张钰菲. 钢-UHPC 组合桥面板薄板 PBL 连接件抗剪性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [17] 王序. 钢-UHPC 组合结构中 PBL 剪力键力学行为研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [18] 方志, 殷益彬, 谭星宇, 等. 钢-薄层 UHPC 组合桥面结构中 PBL 剪力键抗剪性能试验 [J]. 土木工程与管理学报, 2024, 41(04): 9-21.
- [19] 同 [18].
- [20] 胡旭辉, 周洁, 张雪松, 等. PBL 剪力键与埋入式剪力键疲劳性能对比研究 [J]. 公路, 2019(11): 134-137.
- [21] 武芳文, 冯彦鹏, 罗建飞, 等. 钢-UHPC 组合结构中 PBL 剪力键力学性能研究 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 147-160.
- [22] 汪炳. 基于疲劳累积损伤效应的钢-混凝土组合梁桥剩余力学性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [23] 廖轩. UHPC 中 PBL 剪力键的静力性能与疲劳性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.