

装配式钢-UHPC 组合梁群钉连接件受力性能研究

徐 辉¹, 丁婧楠², 朱劲松², 孙晨然¹

(1.中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074; 2.天津大学, 天津市 300350)

摘 要:为研究装配式钢-UHPC 组合梁中群钉连接件在不同应力状态下的结构性能,开展了三组群钉连接件的推出试验和两组拉剪试验,考虑栓钉间距、高径比和拉剪比对 UHPC 中群钉连接件破坏形态、承载能力和延性的影响,提出 UHPC 中群钉连接件荷载-滑移关系表达式。结果表明,推出试验和拉剪试验的破坏模式均为栓钉被剪断。剪切荷载下,减小栓钉间距会降低群钉连接件的承载力和延性,栓钉高径比对极限承载力和相对滑移的影响较小,短栓钉在 UHPC 中仍能发挥其抗剪性能,建议群钉连接件中栓钉间距不小于 4 倍栓钉直径, UHPC 板中群钉连接件采用弹性理论进行设计。拉剪荷载下,拉剪比为 0.17 时拉力作用对群钉连接件受力性能影响可忽略,拉剪比为 0.27 时拉力作用明显削弱了 UHPC 板中群钉连接件的承载能力和延性。提出的荷载-相对滑移关系的计算模型能够准确的描述 UHPC 板中群钉连接件的行为。

关键词:超高性能混凝土;栓钉连接件;剪切荷载;拉剪荷载;组合梁

中图分类号: TU378.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)07-0167-06

0 引 言

栓钉是钢混组合梁桥中应用最广泛的连接件^[1],能够在钢梁与混凝土板间传递荷载,防止二者之间发生竖向分离。因此,栓钉除了承受较大的剪力作用,还承受一定的拉力作用,处于拉剪复合受力的状态。随着装配式组合梁桥的发展,栓钉常以群钉的形式布置在预制桥面板的剪力槽中,通过后浇混凝土实现预制结构之间的装配化连接。超高性能混凝土(Ultra-high performance concrete, UHPC)作为一种新型水泥基复合材料,其抗压强度可达到 120 MPa 以上,抗拉强度可达 6 MPa 以上,并兼具良好的延性和耐久性,近年来逐步被应用于桥梁建设中。预制 UHPC 桥面板与钢梁通过剪力连接件连接形成的钢-UHPC 组合梁桥具有较高的刚度、抗开裂能力和承载能力,能够在提高结构整体性能的基础上实现快速建造。

目前已有的关于栓钉连接件的研究多集中于其抗剪性能,相关的规范^[2-5]中也给出了栓钉连接件的构造要求和抗剪承载力计算式。大量的推出试验表明单个栓钉连接件的性能主要受混凝土强度、钢筋配置、栓钉尺寸、混凝土浇筑方向和栓钉焊接质量的影响^[6-9]。群钉连接件在纤维增强混凝土中的研究表

明钢纤维的含量会影响群钉连接件的刚度,较小的栓钉间距对群钉连接件的抗剪强度和剪切刚度影响较小^[10-14]。许多研究均表明规范中栓钉连接件抗剪承载力的计算方法较为保守,并提出了计算群钉连接件抗剪承载力的相关参数及计算模型^[11,15-17]。关于群钉连接件在 UHPC 中抗剪性能的研究较少。McMullen 等^[18]和 Kruszewski 等^[19,20]研究了焊接于锈蚀钢板上的栓钉在 UHPC 中的抗剪性能,结果表明栓钉间距在小于规范规定时仍能充分发挥其抗剪能力。Cao 等^[21]研究了短栓钉在薄 UHPC 板中的静力和疲劳性能。Wang 等^[22,23]将直径 30 mm 的群钉连接件应用于 UHPC 板中,发现即使栓钉高径比为 2.3,大直径栓钉在 UHPC 中仍能发挥较好的性能。

关于栓钉连接件在拉力和剪力共同作用下的相关研究较少。部分学者^[24-26]针对栓钉与实心楼板、压型钢板、叠合板和钢筋混凝土填充墙连接时承受剪力和拉力作用下的性能进行了试验研究,结果表明拉力会降低栓钉的强度和变形能力,混凝土强度和栓钉直径对复合受力下栓钉的性能有一定影响。蔺钊飞等^[27]的研究表明拉剪共同作用下栓钉连接件的剪切刚度随着施加拉力的增加而减小,但拉力施力比小于 10% 时可以忽略其对连接件性能的影响。安然等^[28]研究了栓钉在高强混凝土中承受拉剪复合作用时性能,拉力的增加会降低栓钉的抗剪承载力和刚度,但对滑移性

收稿日期: 2021-09-30

基金项目: 天津市交通运输科技发展规划项目(2019B-21)

作者简介: 徐辉(1981—),男,工学硕士,高级工程师,从事道路桥梁设计科研工作。

能影响不显著。

综上,目前关于群钉连接件在混凝土中的抗剪性能已有一定的研究基础,但不同栓钉参数和拉剪复合作用对群钉连接件在 UHPC 中力学性能的影响尚需进一步进行研究。因此本文通过推出试验和拉剪试验研究栓钉间距、高径比和拉剪比对预制 UHPC 板中群钉连接件破坏模式、承载能力和延性的影响,为装配式钢-UHPC 组合梁桥中连接件的设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计及材料性能

推出试验和拉剪试验的试件形式如图 1 所示。试验中考虑栓钉直径、栓钉间距和高径比对群钉连接件性能的影响,试件参数及尺寸如表 1 和图 2 所示。推出试件中,钢梁由两块焊接 T 型钢板通过连接板和高强螺栓拼接而成,钢梁两翼缘板上以四行三列的排布形式各焊接 12 个栓钉,并通过在预留剪力槽中后浇 UHPC 将 UHPC 板与钢梁连接为整体。UHPC 浇筑前在钢翼缘表面涂抹润滑油以消除钢与 UHPC 之间的摩擦和黏阻力,浇筑方向垂直于钢翼缘。拉剪试件是在推出试件的基础上改变钢梁翼缘与水平面的角度实现栓钉在承受剪力的同时承受不同程度的拉力。

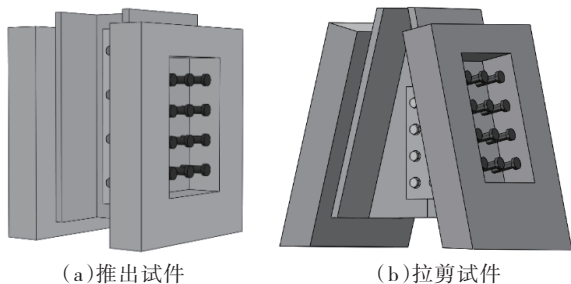


图 1 试验试件

表 1 试验试件参数

试件	栓钉直径 $/(\text{d} \cdot \text{mm}^{-1})$	栓钉高度 $/(\text{h} \cdot \text{mm}^{-1})$	高径比 $/(\text{h} \cdot \text{d}^{-1})$	栓钉 间距	拉剪比
S19-80-2.5	19	80	4.2	2.5 d	0
S19-80-4	19	80	4.2	4 d	0
S19-60-4	19	60	3.2	4 d	0
ST19-80-0.17	19	80	4.2	4 d	0.17
ST19-80-0.27	19	80	4.2	4 d	0.27

试验所用 UHPC 在常温喷水覆膜养护 24 h 后进行 72 h 的蒸汽养护,试验时实测预制板 UHPC 与剪力槽中后浇 UHPC 的抗压强度分别为 167 MPa 和 136 MPa,抗拉强度分别为 9.06 MPa 和 8.97 MPa。所用钢材等级为 Q345,钢翼缘与钢腹板的屈服强度分别为 268 MPa 和 362 MPa,极限拉伸强度分别为

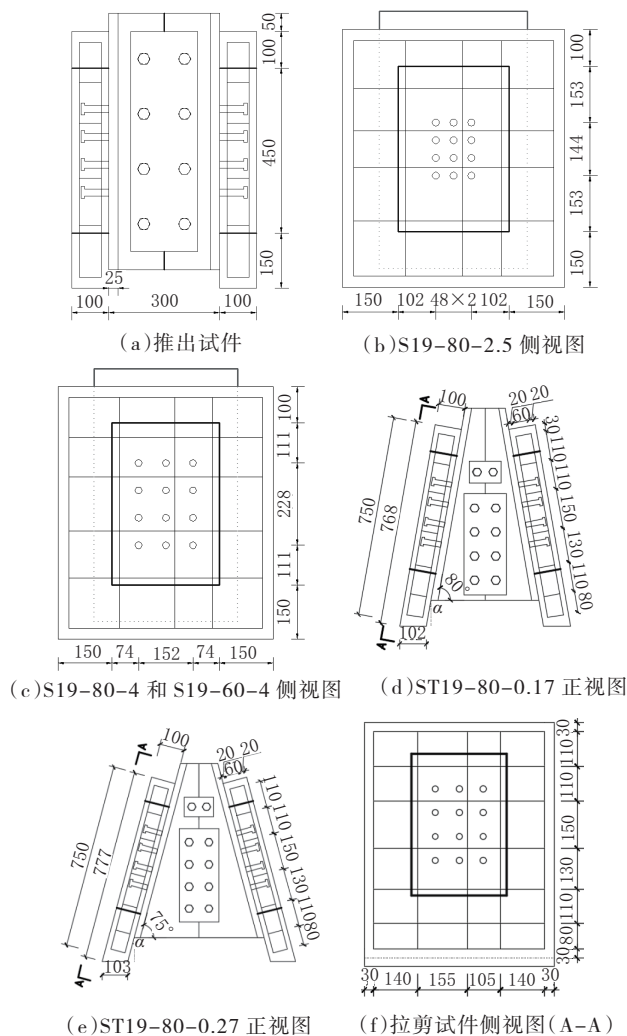


图 2 试验试件构造及尺寸(单位:mm)

424 MPa 和 541 MPa。栓钉的极限拉伸强度为 415 MPa,伸长率为 31.5%。

1.2 试验加载及测试

推出试验和拉剪试验的加载均采用 1 500 kN 电液伺服压力试验机。为保证荷载的均匀传递,在每个试件钢梁上放置一块厚度 10 mm 的钢垫板。预加载先加至预期极限荷载的 40%,随后卸载至预期极限荷载的 5%,并在这一荷载区间内循环加载 5 次,以彻底消除混凝土与钢梁间的黏结。正式加载采用力-位移混合控制。首先采用力控制加载,以 1 kN/s 的速度,100 kN 为一级加载至预期荷载的 70%,然后采用位移控制,以 0.02 mm/min 的速度,60 kN 为一级加载至预期荷载的 90%,最后以 0.01 mm/min 的速度,40 kN 为一级加载直至试件破坏。

试验过程中通过试验机的荷载传感器连续记录荷载,并布置位移计测量钢梁和 UHPC 板的位移变化,具体布置如图 3 所示。推出试件中位移计 U1-U4 测量 UHPC 板的竖向位移,S1-S3 测量钢梁的竖向

位移,T1 和 T2 分别测量钢梁和 UHPC 板的横向位移。拉剪试件中 U1-U4 测量 UHPC 板沿栓钉剪切方向的位移,S1-S4 测量钢梁沿栓钉剪切方向的位移,T1 和 T2 测量钢梁与 UHPC 板之间沿栓钉拉力方向的相对位移。

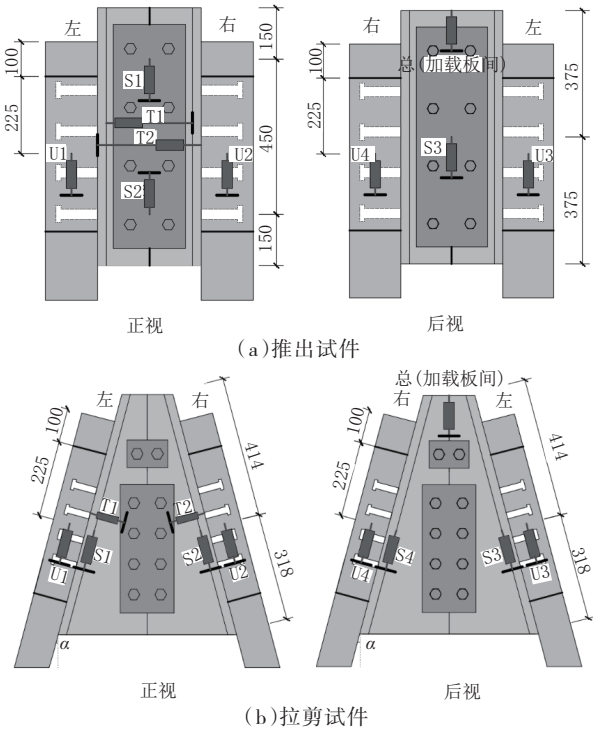


图3 位移测点布置(单位:mm)

2 推出试验结果

2.1 破坏形态

推出试件破坏时 UHPC 板与钢梁完全分离,栓钉根部剪断,呈现出明显的塑性变形,栓钉上表面与 UHPC 出现一定程度的分离,各试件的破坏形态如图 4 所示。由于 UHPC 强度较高,试件破坏时 UHPC 板整体完好,表面未出现可见裂缝,仅栓钉下侧受压区混凝土出现局部剥落。如图 4(a)所示,栓钉间距较小时,受压剥落的混凝土区域出现上下连接,形成较为严重的损伤。

2.2 荷载-滑移曲线

试验测得钢梁和 UHPC 板沿栓钉剪切方向的位移差值定义为二者的相对滑移,推出试件的荷载-相对滑移曲线见图 5。所有曲线整体变化趋势相似,包含三个阶段,分为弹性段,塑性段和下降段。弹性段的荷载和相对滑移呈线性关系,直至加载至约极限承载力的 55%,此阶段栓钉处于弹性状态,与 UHPC 共同承担剪力。塑性阶段相对位移随荷载的增加而迅速增加,曲线斜率呈非线性递减,栓钉进入塑性,曲线逐渐趋于水平。试件在达到极限承载力后

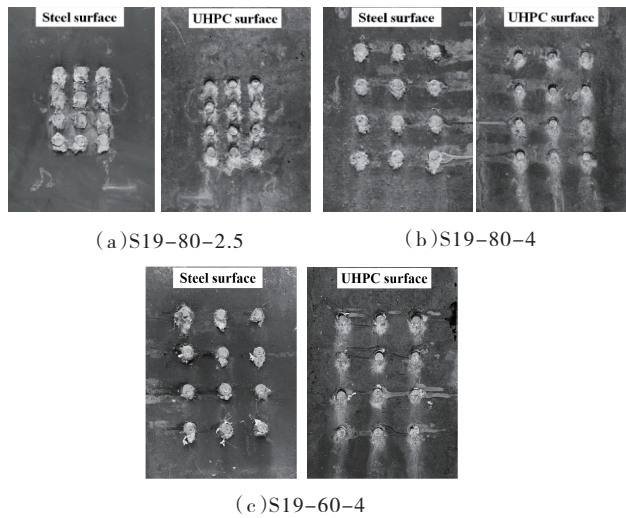


图4 推出试件破坏形态

栓钉先后被剪断,栓钉根部受压区 UHPC 出现不同程度的压碎,试件承载力不断下降,相对滑移继续增大,曲线表现出明显的下降段。

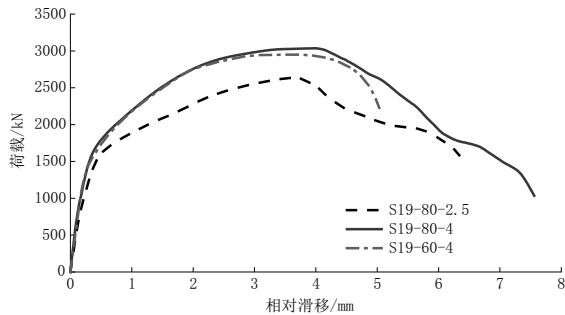


图5 荷载-相对滑移曲线

2.3 极限承载力及延性

推出试件的试验结果见表 2,其中 P_s 为各试件的极限承载力, P_{s-a} 为各组推出试件极限承载力均值, S_u 为极限位移,指试件达到极限承载力时对应的相对滑移, S_{max} 为特征位移,为荷载下降到 90%极限承载力时对应相对滑移值的 90%。由表 2 可知,减小栓钉间距会降低连接件的极限承载力,因此建议 UHPC 中群钉连接件各栓钉间距不小于 4 倍的栓钉直径。S19-60-4 的极限承载力为 S19-80-4 极限承载力的 97.13%,可见栓钉高径比减小对极限承载力影响较小。UHPC 优异的力学性能能够对栓钉形成较强的锚固作用,因此较短高度的栓钉可以充分发挥其抗剪性能,提高抗剪效率。

延性反映了栓钉连接件的耗能能力^[29]。通过钢梁与 UHPC 板间的相对滑移来评价 UHPC 中群钉连接件的延性。由表 2 中的结果可以看出,栓钉间距由 4 d 降为 2.5 d 后,特征位移下降程度较极限位移下降程度更大,可见栓钉间距过小会削弱群钉连接件的延性。栓钉的高径比由 4.2 降至 3.2 后,群钉连接件的

极限位移降低了 9.27%,但特征位移几乎没变化。欧洲的 Eurocode-4 规范规定,极限位移大于 6 mm 可以认为连接件具有较好的延性。由于 UHPC 优异的力学性能使其在试件破坏时仅有小面积受压区压碎,且保证其对栓钉较强的锚固性能,使得 UHPC 中的群钉连接件极限位移值均小于 6 mm,且 $S_{\max}/d$ 在 0.20~0.23 的区间内,不满足欧洲规范对于栓钉延性的定义,因此在进行群钉连接件设计时应采用弹性理论而不是塑性理论。

表 2 推出试验结果

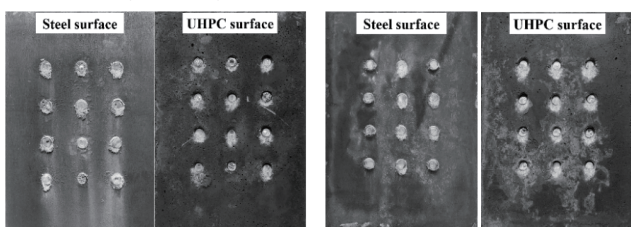
推出试件	P_s /kN	P_{s-a} /kN	S_u /mm	$S_{\max}$ /mm	$S_{\max}/d$
S19-80-2.5	试件 1	2 730	2 635	3.67	3.78
	试件 2	2 560			
S19-80-4	试件 1	3 161	3 036	3.99	4.30
	试件 2	2 910			
S19-60-4	试件 1	3 138	2 949	3.62	4.27
	试件 2	2 760			

注: P_s 为各推出试件极限承载力, P_{s-a} 为推出试件极限承载力均值, S_u 为极限位移, $S_{\max}$ 为特征位移, d 为栓钉直径。

3 拉剪试验结果

3.1 破坏形态

拉剪试验最终破坏时其中一侧混凝土板与钢梁分离,各试件的破坏形态如图 6 所示,与推出试件破坏形态相似,栓钉从根部被剪断,UHPC 板整体完好。拉力的存在会削弱栓钉的抗剪承载力,试件破坏时栓钉下部被压碎的 UHPC 面积较小。



(a)ST19-80-0.17 (b)ST19-80-0.27

图 6 拉剪试件破坏形态

3.2 拉剪试件极限承载力和相对滑移

表 3 所示为群钉连接件拉剪试验的结果, P_{st} 为各拉剪试件的极限承载力, P_{st-a} 为拉剪试件极限承载力均值, S_u 为极限承载力对应的相对滑移值。由表 3 可以看出,拉力的存在对试件的力学行为有一定的影响。与推出试件 S19-80-4 相比,拉剪比为 0.17 时,极限承载力和对应的相对滑移值下降并不明显,拉剪比为 0.27 时,拉剪试件的极限承载力仅为相同栓钉参数下推出试件极限承载力的 0.74,极限荷载对应的相对滑移值也有一定程度的下降。

表 3 拉剪试验结果

拉剪试件	P_{st} /kN	P_{s-a} /kN	P_{st}/P_{s-a}	P_{st-a} /kN	P_{st-a}/P_{s-a}	S_u /mm
ST19-80-0.17	试件 1	3 020	0.99	2 950	0.97	3.80
	试件 2	2 880				3.70
ST19-80-0.27	试件 1	2 279	0.75	2 240	0.74	3.01
	试件 2	2 200				3.19

注: P_{st} 为各拉剪试件极限承载力, P_{st-a} 为拉剪试件极限承载力均值, S_u 为拉剪试件极限承载力对应的滑移值。

4 剪切荷载-滑移关系模型

已有部分关于群钉连接件力学性能的研究中给出了评价剪切荷载与相对滑移之间关系的计算式,但这些模型大多用来描述连接件在普通混凝土中的剪切荷载-滑移关系,并不能很好的描述 UHPC 中群钉连接件的力学行为。Xue 等^[13]给出了群钉连接件在 C50 混凝土中的荷载-滑移关系:

$$\frac{P}{P_s} = (1 - e^{-0.7s})^{1/3} \quad (1)$$

式中: P 和 P_s 分别为剪切荷载和极限剪切荷载, s 为相对滑移。

Su 等^[17]提出了不同的群钉连接件在高强混凝土中的荷载-滑移关系:

$$\frac{P}{P_s} = (1 - e^{-0.61s})^{0.34} \quad (2)$$

Wang 等^[22]提出描述大直径连接件在 UHPC 中荷载-滑移关系的表达式:

$$\frac{P}{P_s} = (1 - e^{-1.1s})^{0.96} \quad (3)$$

可以看出,栓钉连接件在不同类型混凝土中的荷载-滑移曲线形式相似,基于本文试验结果,提出群钉连接件在 UHPC 中的剪切荷载-相对滑移计算模型:

$$\frac{P}{P_s} = (1 - e^{-1.08s})^{0.6} \quad (4)$$

试验曲线与由式(1)至式(4)计算得到的荷载-滑移曲线对比如图 7 所示。与试验曲线相比,由式(3)计算得到的曲线的初始刚度较小,由式(1)和式(2)得到的曲线的初始刚度偏大。此外,由式(1)至式(3)计算得到曲线的非线性段均位于试验曲线的下方,与试验曲线有一定的差距。从总体趋势来看,试验的荷载-滑移曲线的线性段和非线性段均在式(4)对应曲线的附近,与已有研究中的公式相比,本文提出的式(4)能更好的描述 UHPC 中群钉连接件的行为。

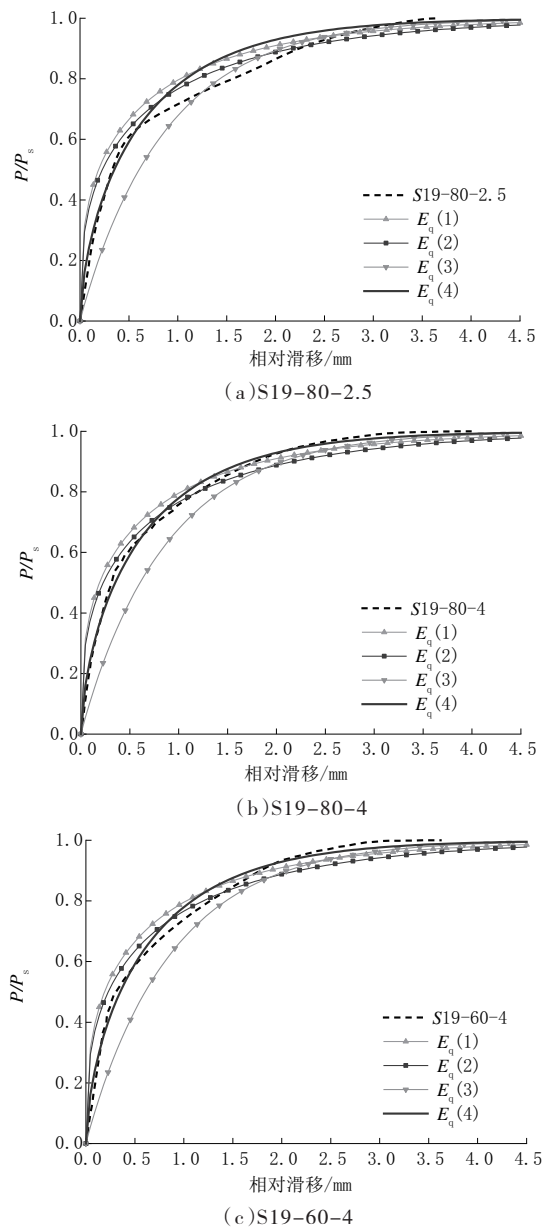


图7 荷载-滑移关系模型与试验曲线对比

5 结论

目前关于 UHPC 板中群钉连接件受力性能的研究尚不完善,缺乏栓钉参数和拉剪复合作用对其性能影响的研究。基于这一现状,本文开展了装配式钢-UHPC 组合梁中群钉连接件的推出试验和拉剪试验,明确了栓钉高径比、栓钉间距和拉剪比对群钉连接件承载能力和延性的影响规律,并基于试验结果提出了 UHPC 板中群钉连接件的荷载-滑移关系计算式。得出以下结论:

(1)剪力和拉剪复合作用下群钉连接件的破坏模式均为栓钉剪断,破坏前栓钉有充分的塑性变形,栓钉下部受压区 UHPC 出现不同程度的剥落,UHPC 板整体完好。

(2)剪切荷载下,减小栓钉间距会降低群钉连接件的承载力,建议 UHPC 中群钉连接件的各栓钉间距不小于 4 倍的栓钉直径。栓钉的高径比对 UHPC 中群钉连接件抗剪承载力的影响很小。

(3)剪切荷载下,减小栓钉间距会降低群钉连接件的延性,但高径比由 4.2 降至 3.2 对连接件延性的影响很小,可在 UHPC 桥面板较薄时采用短栓钉作为连接件;UHPC 中群钉连接件的相对滑移值不满足欧洲规范关于栓钉延性的要求,因此建议采用弹性理论进行设计。

(4)拉剪荷载下,拉剪比为 0.27 时群钉连接件的极限承载力仅为剪切荷载下的 0.74,对应的相对滑移值明显下降,拉剪比 0.17 时,UHPC 中群钉连接件的极限承载力和相对滑移值下降程度很小,其对连接件力学行为的影响可忽略。

(5)本文提出的剪切荷载-滑移计算模型与试验所的曲线吻合较好,与已有模型相比,能更准确的描述 UHPC 中群钉连接件的行为。

参考文献:

- [1] 翁雪微. 钢-UHPC 轻型组合桥面板中短栓钉的静力及疲劳性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
- [2] ANSI/AISC 360-05-2005, Specification for structural steel buildings [S].
- [3] BS EN 1994-2-2001, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part 2: General rules for bridges[S].
- [4] AASHTO LRFD-2012, Bridge design specifications[S].
- [5] GB 50017-2017, 钢结构设计规范[S].
- [6] Lee P G, Shim C S, Chang S P. Static and fatigue behavior of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005,61(9):1270-1285.
- [7] Han Q H, Wang Y H, Xu J, et al. Numerical analysis on shear stud in push-out test with crumb rubber concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017,130:148-158.
- [8] Guezouli S, Lachal A, Nguyen Q H. Numerical investigation of internal force transfer mechanism in push-out tests [J]. Engineering Structures, 2013, 52:140-152.
- [9] Lam D, El-Lobody E. Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam[J]. Journal of Structural Engineering, 2005,131(1): 96-107.
- [10] Luo Y B, Kazuaki H, Masayoshi N. Behavior and Strength of Headed Stud-SFRCC Shear Connection. I: Experimental Study[J]. Journal of Structural Engineering, 2016,142(2):4015112-1-4015112-10.
- [11] He Y L, Guo S J, Wang L C, et al. Experimental and numerical analysis of grouped stud shear connectors embedded in HFRCC[J]. Construction and Building Materials,2020,242:118197.
- [12] Hegger J, Sedlacek G, Doinghaus P, et al. Studies on the ductility of shear connectors when using high-strength steel and high-strength

- concrete [C]// In: International symposium on connections between steel and concrete. RILEM Publications SARL,2001:1025 - 1045.
- [13] Xue D Y, Liu Y Q, Zhen Y, et al. Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge[J]. Steel Construction, 2012,74(8):1-7.
- [14] Spremic M, Markovic Z, Veljkovic M. Recommendations for the design of grouped headed studs[J]. Steel Construction, 2017,10(2):145-153.
- [15] Shim C S, Lee P G, Kim D W, et al. Effects of group arrangement on the ultimate strength of stud shear connection[C]//American Society of Civil Engineers,2008:92 - 101.
- [16] Lebet J P, Yoda T, Okada J. A STUDY OF THE GROUPED ARRANGEMENTS OF STUD CONNECTORS ON SHEAR STRENGTH BEHAVIOR [J]. Journal of Structural Mechanics & Earthquake Engineering,2006,23(1):75S-89S.
- [17] Su Q T, Yang G T, Bradford Mark A. Static behaviour of multi-row stud shear connectors in high-strength concrete[J]. Steel and Composite Structures, 2014,17(6):967-980.
- [18] McMullen KF, Zaghi AE. Experimental evaluation of full-scale corroded steel plate girders repaired with UHPC [J]. Journal of Bridge Engineering. 2020;25(4): 04020011-1-04020011-13.
- [19] Kruszewski D, Wille K, Zaghi A E. Push-out behavior of headed shear studs welded on thin plates and embedded in UHPC[J]. Engineering Structures. 2018,173:429-441.
- [20] Kruszewski D, Zaghi A E, Wille K. Finite element study of headed shear studs embedded in ultra-high performance concrete[J]. Engineering Structures, 2019,188:538-552.
- [21] Cao J H, Shao X D, Deng L, et al. Static and Fatigue Behavior of Short-Headed Studs Embedded in a Thin Ultrahigh-Performance Concrete Layer[J]. Journal of bridge engineering, 2017,22(5): 04017005.1-04017005.16.
- [22] Wang J Q, Xu Q Z, Yao Y M, et al. Static Behavior of Grouped Large Headed Stud-UHPC Shear Connectors in Composite Structures[J]. Composite Structures, 2018, 206:202-214.
- [23] Wang J Q, Qi J N, Tong T, et al. Static Behavior of Large Stud Shear Connectors in Steel-UHPC Composite Structures[J]. Engineering Structures, 2018,178:534-542.
- [24] Mirza O, Uy B. Effects of the combination of axial and shear loading on the behaviour of headed stud steel anchors[J]. Engineering Structures, 2010,32(1):93-105.
- [25] Shen M H, Chung K F. Experimental investigation into stud shear connections under combined shear and tension forces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017,133:434-447.
- [26] William K S, Jerome F H, Arturo E S, et al. Behavior of shear studs in steel frames with reinforced concrete infill walls[J]. Journal of Constructional Steel Research,2004, 60:1453-1480.
- [27] 蔺钊飞,刘玉擎.焊钉连接件拉剪相关关系模型试验[J]. 中国公路学报,2015,28(1):80-86.
- [28] 安然,王有志,周磊,等.剪力钉连接件拉剪复合作用试验及计算模型[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(3):42-52.
- [29] 丁敏,薛伟辰,王骅.钢-高性能混凝土组合梁栓钉连接件抗剪性能的试验[J].工业建筑,2007,37(8):9-13.

~~~~~  
(上接第 163 页)

#### 4.3 项目实际应用成效

该项目主要建设内容为城市智慧汽车基础设施建设,为前期项目的延伸和深化,继续深度融合车路协同、5G 等先进技术,推动城市未来出行方式以及交通管理方式的变革;进一步探索智慧城市动态和静态信息整合,引领新型智慧城市新理念。同时推动创新实践智慧汽车基础设施建设,打造全国示范试点样板,形成城市道路智能化建设可复制、可推广的经验。

## 5 结 语

智慧交通作为智慧城市公共设施及新基建的重要组成部分,将智能网联技术与城市交通、城市管理 and 运维相结合,有利于提升城市交通智能化、信

息化水平及 5G 等技术的应用,解决城市交通拥堵、道路安全等问题,提升交通系统运行效率,实现公交优先、节能减排、保护城市环境,满足人民群众对汽车的共享化、智能化的要求;同时通过智能网联技术与城市建设管理等相结合,也能够提高城市建设管理智能化水平,提高管理效益、降低管理成本。

#### 参考文献:

- [1] 赵锦祥.智慧交通在智慧城市的深入应用与发展趋势[J].中国安防, 2018(5):60-62.
- [2] 巴天星,张跃,王志成.浅谈智慧交通在智慧城市建设中的作用[J].科学与信息化,2019(16):143.
- [3] 清华大学新闻网.交通运输部总工程师周海涛调研清华智能车路协同系统[EB/OL].(2014-09-24).http://news.tsinghua.edu.cn
- [4] 王秀旭,李川鹏,王耀福.车规级无人驾驶线控底盘车研发及其场景化应用[J].汽车实用技术,2021,46(2):25-27.