

含小型粗骨料UHPC中栓钉连接件的抗剪性能

王 衍¹, 王者超², 李昌昊³, 崔 鹏⁴

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 4. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100034)

摘 要: 随着钢-超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)轻型组合梁跨径不断增加, 梁内水平剪力增幅明显, 故栓钉连接件的抗剪性能设计愈加关键. 通过标准推出试验研究钢-含小型粗骨料UHPC板间栓钉抗剪力学性能, 揭示了标准推出试件的荷载-滑移量行为与破坏模式, 提出了单钉抗剪刚度和单钉抗剪承载力计算方法. 试验结果表明: 推出试件破坏模式为栓钉连接件根部被剪断, 推出试件破坏滑移量在0.5~1.2 mm之间, 单钉极限抗剪强度为400.7 MPa. 理论计算结果表明: 依据现有规范, 按照破坏荷载0.5倍或滑移量达到0.2 mm时, 设计栓钉抗剪刚度偏安全, 单钉抗剪承载力范围为95.51~129.20 kN, 是试验值的62.7%~84.8%. 含小型粗骨料UHPC板中栓钉连接件在设计时, 抗剪刚度应考虑折减系数为0.57~0.73, 承载能力无需折减.

关 键 词: 组合结构; 栓钉连接件; 超高性能混凝土; 抗剪刚度; 抗剪承载力

中图分类号: U 443.37 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)11-1604-08

Shear Performance of Headed Studs in UHPC Containing Small Coarse Aggregates

WANG Yan¹, WANG Zhe-chao², LI Chang-hao³, CUI Peng⁴

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China; 4. Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100045, China. Corresponding author: WANG Yan, E-mail: wangyan2@mail.neu.edu.cn)

Abstract: With the increasing span of steel-UHPC lightweight composite girders and the horizontal shear force in girders, the design of shear performance of headed studs in the lightweight composite girders becomes increasingly critical. The shear performance of headed studs between steel and UHPC with small coarse aggregates is studied via standard push-out specimens. The load-slippage behavior and failure mode of standard specimens are revealed, and the calculation methods for shear stiffness and capacity of single headed stud are proposed. Test results show that the failure mode of specimens is that the roots of headed studs are cut off. The failure slippage range of the push-out specimen is between 0.5~1.2 mm, and the ultimate shear strength of the single headed stud is 400.7 MPa. Theoretical calculation results show that according to existing design specifications, the shear stiffness is designed safely at the half failure load or the slippage of 0.2 mm. The design shear capacity of the single headed stud is calculated in the range of 95.51~129.20 kN, which was only 62.7%~84.8% of the test results. Therefore, when designing headed studs for UHPC deck panels with small coarse aggregates, the shear stiffness should consider a reduction coefficient of 0.57~0.73, and the shear capacity should not be reduced.

Key words: composite structure; headed stud; ultra-high performance concrete; shear stiffness; shear capacity

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(2023BSBA103); 东北大学博士后基金资助项目(01270012810282); 国家自然科学基金重点资助项目(52038003).

作者简介: 王 衍(1990-),男,辽宁辽阳人,东北大学讲师; 王者超(1980-),男,山东高唐人,东北大学教授,博士生导师.

近年来,钢-超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)轻型组合梁发展迅猛^[1-3],凭借 UHPC 材料超高的力学性能与耐久性,传统组合梁中混凝土桥面板平均厚度可下降至 12~17 cm,自重可降低 30%~50%,更多特大跨径桥梁可应用 UHPC 轻型桥面板,以提高大跨径桥梁的经济性^[4-6]。栓钉连接件作为将下部钢梁与上部 UHPC 桥面板组合为整体的常用关键部件,传递着钢梁与桥面板间水平剪力与竖向掀起力^[7-8]。随着组合梁桥跨径不断增加,钢梁与桥面板间水平剪力增幅明显^[9],因此,对轻型组合梁中栓钉连接件的抗剪性能的研究愈加关键。

传统普通混凝土属于脆性材料,抗压强度通常低于 60 MPa,在水平剪力作用下,栓钉一侧普通混凝土通常局部被压碎而导致组合构件突然破坏^[10]。UHPC 属于韧性材料,抗压强度通常在 150 MPa 以上,超高的抗压强度改变了传统组合构件的破坏模式,试验结果表明,栓钉直径为 10~16 mm、长径比为 1.92~3.46,推出构件破坏时会发生栓钉根部被剪断,栓钉焊缝处 UHPC 发生局部破损;栓钉直径为 22~30 mm、长径比为 2.27~4.55,推出构件破坏时仅栓钉根部被剪断,UHPC 基本无明显损伤^[11]。大跨径组合梁通常采用栓钉直径在 10~25 mm 之间,栓钉高度与直径比一般大于 4,属于柔性剪力连接件。目前依据现有组合梁规范对 UHPC 中栓钉滑移与抗剪刚度进行设计过于保守,导致大跨径组合梁设计时栓钉数量较多,难以布置于钢梁上翼缘板。因此,有必要对 UHPC 中的栓钉抗剪性能展开试验与理论研究。

常规 UHPC 基于最大堆积密度理论设计,由不同粒径颗粒紧密堆积而成,即毫米级颗粒(石英砂)堆积的间隙由微米级颗粒(水泥、粉煤灰、石英粉)填充,微米级颗粒堆积的间隙由亚微米级颗粒(硅灰)填充,故制作成本较高^[12-13]。一些学者提出在 UHPC 中添加部分小型粗骨料以减少凝胶材料的使用量、降低成本^[14]、提升钢-UHPC 轻型组合梁的经济性^[15],例如 2020 年建成的主跨 2×600 m 的南京长江五桥便采用了含小型粗骨料 UHPC 制作组合梁的桥面板^[6]。试验结果表明,添加小型粗骨料不仅不会降低 UHPC 材料的抗压强度,还可适当提高弹性模量与降低收缩^[16],有利于 UHPC 的自然养护,降低制作成本与养护成本,但小型粗骨料会阻碍钢纤维的连续分布,降低 UHPC 的拉伸韧性^[6]。目前鲜有针对含小型粗骨料 UHPC 中栓钉连接件提出推出承载力与抗

剪刚度的研究^[17]。标准推出试验可用于测得单个连接件的抗剪性能,为组合梁水平剪力设计提供必要的技术指标。因此,本文将开展标准推出试验来揭示含小型粗骨料 UHPC 中栓钉承载力与抗剪刚度,并运用现有理论与计算方法进行比较,最终,校验出适用于含小型粗骨料 UHPC 中栓钉推出承载力与抗剪刚度的计算公式,为钢-含小型粗骨料 UHPC 组合结构水平抗剪设计提供可靠的理论依据。

1 试验研究

1.1 试件设计

欧洲规范 4 在 20 世纪 90 年代对钢-混凝土组合结构中栓钉连接件力学性能研究提出了国际公认的标准试验构件与检测方法,并被世界各国视为设计规范沿用至今,故本文依据欧洲规范 4,利用标准试验构件来检测含小型粗骨料 UHPC 中栓钉连接件的力学行为。试件尺寸如图 1 所示,由工字钢、栓钉连接件与配筋的 UHPC 板 3 部分组成,工字钢高为 600 mm、宽为 260 mm,腹板、翼板及顶板厚度均为 12 mm。工字钢两侧各焊接 4 个标准规格的栓钉连接件(高为 100 mm、直径为 22 mm),布置间距为 250 mm×100 mm。两侧钢筋 UHPC 板高为 650 mm、宽为 600 mm、厚为 150 mm,其 UHPC 板中钢筋直径为 10 mm,钢筋间距为 180 mm×150 mm,钢筋保护层厚度为 15 mm。

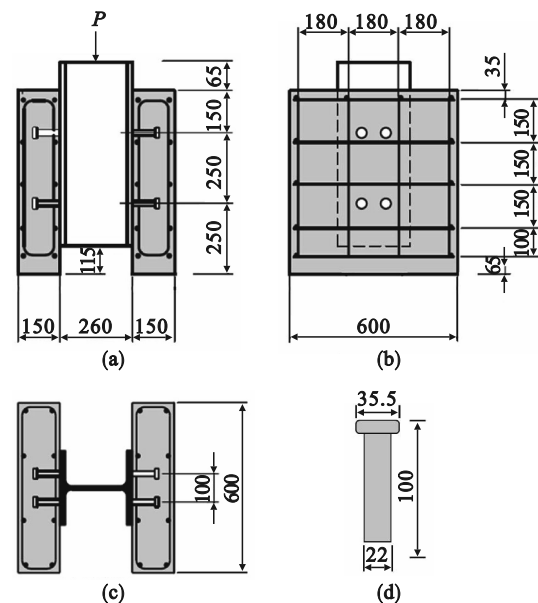


图 1 标准推出试验构件(单位:mm)

Fig. 1 Standard specimen for push-out test (unit:mm)

(a)—正视图;(b)—左视图;

(c)—俯视图;(d)—栓钉尺寸。

1.2 材料性能

常规 UHPC 包括 UHPC 凝胶材料(水泥、硅灰、石英砂、粉煤灰、石英粉和高效减水剂)以及钢纤维和水.向常规 UHPC 中添加高弹模的小型粗骨料(直径 4~5 mm 的河沙与直径 6~8 mm 的玄武岩)便可得到含小型粗骨料 UHPC.本文采用的常规 UHPC 和含小型粗骨料 UHPC 配料表分别如表 1 和表 2 所示,依据我国《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015),检测标准养护 28 d 时 UHPC 的基本力学性能;依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082—2009)中的接触法,检测标准养护 28d 时 UHPC 的

自收缩量,对比试验内容与结果如表 3 所示.

表 1 1m³常规 UHPC 组成成分
Table 1 Compositions of 1m³ conventional UHPC

材料名称	尺寸	质量/kg
石英砂	毫米级	848.4
水泥	微米级	771.2
UHPC 凝胶材料	微米级	77.1
粉煤灰	微米级	154.2
石英粉	微米级	154
硅灰	亚微米级	10.1
高效减水剂	微米级	10.1
端勾型钢纤维	φ0.2 mm×13 mm	157
水	微米级	168

表 2 1m³含小型粗骨料 UHPC 组成成分
Table 2 Compositions of 1m³ UHPC with small coarse aggregates

材料名称	UHPC 凝胶材料	河沙	玄武岩	端构型钢纤维 φ0.2 mm×13 mm	水
质量	1 080	580	600	157	162.6

表 3 UHPC 基本力学性能
Table 3 Primary mechanical properties of UHPC

检验项目	试件尺寸/mm	数量	试验结果平均值	
			常规 UHPC	含小型粗骨料 UHPC
E_c	300×100×100	5	42.8 GPa	52.1 GPa
f_{cc}	100×100×100	10	143.0 MPa	151.0 MPa
f_{cp}	300×100×100	15	118.5 MPa	127.1 MPa
f_{cf}	400×100×100	15	25.2 MPa	22.4 MPa
ϵ_{sh}	515×100×100	3	402 $\mu\epsilon$	200 $\mu\epsilon$

注: E_c 为弹性模量; f_{cc} 为立方体抗压强度; f_{cp} 为轴心抗压强度; f_{cf} 为抗折强度; ϵ_{sh} 为自收缩应变.

推出试验构件的抗剪承载力与抗剪刚度主要取决于混凝土抗压强度和钢材强度^[11].对比表 3 中的试验结果,发现添加小型粗骨料后,UHPC 弹性模量提高了 21.8%,立方体抗压强度与轴心抗压强度分别提高了 5.6% 和 7.3%,这些指标的提高有利于延缓推出试验中 UHPC 损伤破坏,从而提高承载力.添加小型粗骨料后,标准养护条件下,UHPC 28 d 自收缩量降低了约 50%,这有助于取消常规 UHPC 为避免收缩开裂而采用的高温蒸汽养护施工.然而,添加小型粗骨料后,UHPC 抗折强度下降了 11.1%,由于并非主要控制指标,估计对推出试验构件力学性能影响不大.综上所述,相较于价格高昂的常规 UHPC 与高温蒸汽养护施工,含小型粗骨料 UHPC 抗压性能更优、自收缩更小,有望实现标准养护,节约大量的制作成本与施工成本.

另外,工字钢采用 Q345 钢板焊接而成,钢筋采用 HRB400 规格,栓钉采用 ML15 型号,上述钢

材力学性能由供应商测试,测试结果如表 4 所示.

表 4 钢材基本力学性能
Table 4 Primary mechanical properties of steel

钢材种类	弹性模量 E_s	屈服强度 f_s	极限强度 f_u
	GPa	MPa	MPa
Q345 钢板	206	374	521
HRB400 钢筋	206	462	583
ML15 栓钉	206	300	400

1.3 推出试验

推出试验加载布置如图 2 所示,试件上方放置量程 200 t 的千斤顶,提供竖向荷载,荷载加载分为力控制和位移控制两种方式,弹性阶段采用力控制(步长 10 kN),当试件接近破坏时,转用位移控制(步长 0.05 mm).利用压力传感器读取压力荷载大小.放置 8 个千分表在栓钉连接件对应位置,以测量钢板与 UHPC 板间竖向相对滑移量,得到荷载-滑移量结果.

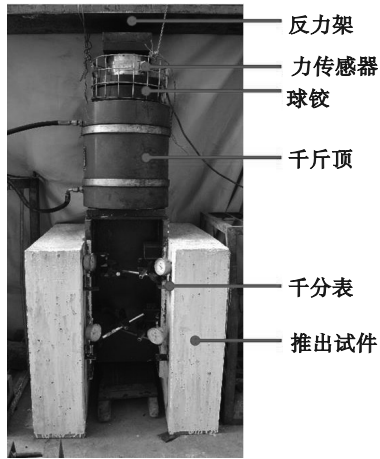


图2 推出试验加载布置

Fig. 2 Loading setups for push-out test

2 试验结果分析

2.1 破坏模式与承载力

本次推出试验共包含 3 个试件(编号 N1~N3),试件破坏模式均为双侧栓钉从根部被剪断,致使 UHPC 板和钢板彻底脱离,如图 3a 所示;破坏后的 UHPC 板表面未出现开裂、压碎、剥离等破损现象,如图 3b 所示.仔细观察栓钉周围钢板与 UHPC 板,栓钉断裂面位于根部焊缝中,断裂时在钢板表面形成很小的凹面,说明 150 mm 厚的高强 UHPC 可以很好地包裹栓钉连接件,钢-UHPC 界面滑移量主要由栓钉根部剪切变形造成.以后在设计钢-UHPC 组合结构时,可适当增大栓钉连接件直径,以充分利用 UHPC 超高抗压强度.

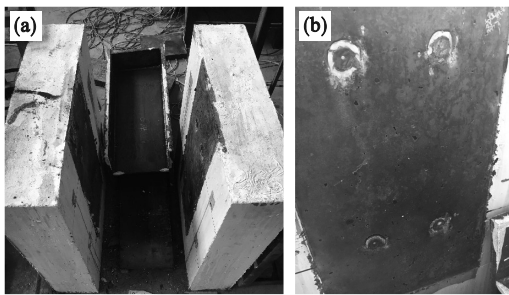


图3 推出试件破坏模式

Fig. 3 Failure mode for push-out test specimens

(a)—破坏形式;(b)—UHPC 破坏表面.

表 5 总结了推出试件破坏前的栓钉屈服荷载、屈服滑移量、破坏荷载以及破坏滑移量.试验结果表明,屈服荷载平均值为 950.7 kN,屈服时滑移量平均值为 0.285 mm.破坏荷载平均值为 1 218.6 kN,屈服荷载约为破坏荷载的 78.1%,破坏时滑移量平均值为 0.844 mm.

表 5 推出试验结果
Table 5 Results of push-out test

编号	屈服荷载	屈服滑移	破坏荷载	破坏滑移
	kN	mm	kN	mm
N1	989	0.278	1 388	0.766
N2	922	0.257	1 146	0.928
N3	941	0.319	1 122	0.837
标准差	28.2	0.025 7	120.1	0.066 3
平均值	950.7	0.285	1 218.6	0.844

分析表 5 中试验数据,推出试件屈服荷载平均值为 950.7 kN,则单个栓钉屈服承载能力平均值为 118.8 kN,单钉屈服抗剪强度为 312.5 MPa;推出试件破坏荷载平均值为 1 206.3 kN,则单个栓钉极限承载能力平均值为 152.3 kN,单钉极限抗剪强度为 400.7 MPa.上述单钉屈服抗剪强度与极限抗剪强度分别与表 4 中栓钉材料的屈服强度与极限强度接近.试验中使用的栓钉长径比等于 $100 \text{ mm}/22 \text{ mm} \approx 4.55$,属于柔性连接件,UHPC 超高的抗压强度可保证栓钉剪坏过程中不出现损伤,故该试验构件破坏主要取决于栓钉的力学性能指标.

2.2 荷载-滑移行为

试验中记录了每级荷载下栓钉对应处钢-UHPC 界面相对滑移量,并绘制成荷载-滑移量曲线(设一侧为 A,另一侧为 B),由于同侧的 4 个测点滑移量相近,故先对每侧 4 个测点滑移量取平均值,然后对两侧界面滑移量取平均值,如图 4 所示.

根据欧洲规范 4,当推出试件破坏时,界面滑移不低于 6 mm,才能成为塑性连接件^[18].由图 4a~图 4c 可发现,推出试件接近极限荷载时,界面破坏滑移量数值较小,大致为 0.5~1.2 mm,说明含小型粗骨料 UHPC 中栓钉连接件塑性变形能力较弱,不符合塑性连接件定义条件,其设计计算应按弹性法进行计算.

由图 4d 可知,荷载-滑移量曲线的上升趋势分为 3 个阶段:①荷载范围为 0~400 kN,荷载-滑移量呈现线性变化,栓钉连接件剪切变形为弹性变形,具有稳定的抗剪刚度(单钉割线刚度约为 555 kN/mm);②荷载范围增大到 400~950 kN,荷载-滑移量开始呈现轻微曲线变化,栓钉根部开始出现微弱塑性损伤,但仍具有一定抗剪刚度(单钉割线刚度约为 475 kN/mm);③荷载范围增大到 950~1 388 kN,荷载增长十分缓慢,但滑移量增长快速,栓钉根部已经完全屈服,抗剪刚度

几乎丧失,不适合设计使用.

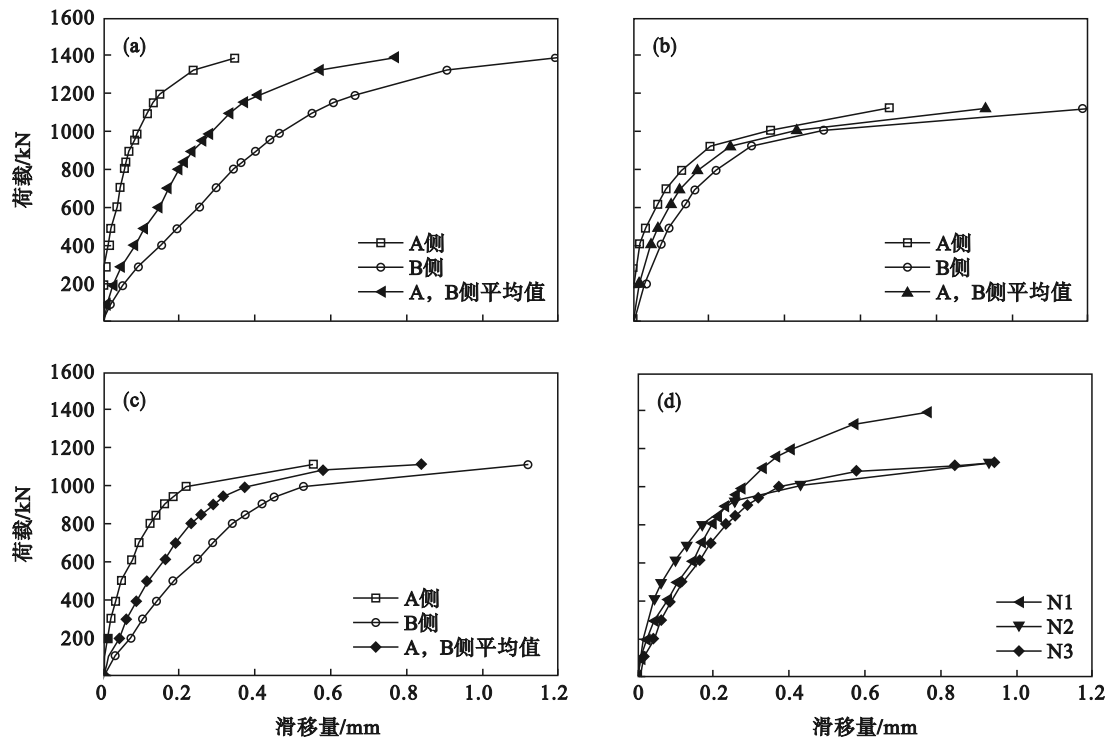


图4 推出试件荷载-滑移量曲线

Fig. 4 Load-slippage curves of push-out test specimens

(a)—试件N1; (b)—试件N2; (c)—试件N3; (d)—所有试件.

传统钢-混组合梁中由于普通混凝土的抗压强度较低,在阶段②中混凝土损伤较大,造成抗剪刚度下降较快,故传统钢-混组合梁抗剪设计通常仅考虑阶段①^[10].相比之下,含小型粗骨料UHPC具有较高的抗压强度,栓钉抗剪刚度在阶段①和阶段②均具有较高的持荷能力(最大荷载可达到破坏荷载的78.1%),且具有近似线弹性的抗剪刚度,可供设计参考使用.

3 理论分析

3.1 抗剪刚度计算

表6收集了目前基于推出试验结果计算单根栓钉抗剪刚度的方法,依据我国公路钢混组合桥梁设计与施工规范^[19]经验公式计算的混凝土中栓钉连接件抗剪刚度只与栓钉直径 d_s 、混凝土弹性模量 E_c 和混凝土抗压强度标准值 f_c 有关.本文含小型粗骨料UHPC抗压强度标准值为139.2 MPa,故本文含小型粗骨料UHPC栓钉连接件抗剪刚度设计值为763.5 kN/mm,远高于上述试验值(555和475 kN/mm),说明我国现行钢混组合梁规范^[20]中的经验公式不适合用于计算钢-

UHPC组合梁,故需要探究更准确的计算方法.

目前抗剪刚度计算理论包括两种:依据单根栓钉抗剪承载力 F_s 取特征值计算,或依据单根栓钉滑移量 S_p 取特征值计算.依据 F_s 进行计算,利用割线刚度法,可取荷载达极限荷载的某种程度除以对应滑移量得到单根栓钉抗剪刚度.其中日本规范^[21]最为保守,取极限荷载1/3时对应的割线刚度;欧洲规范4^[18]取极限荷载0.7时对应的割线刚度;国外学者则提出取极限荷载0.5时对应的割线刚度^[22].表5表明,本文推出试件的平均破坏荷载为1 218.6 kN,当荷载达到破坏荷载的1/3(406.2 kN),0.5倍(609.3 kN)或0.7倍(853.0 kN)时,由图4中荷载-滑移量曲线可知,栓钉分别处于弹性状态、轻微塑性损伤状态和接近完全屈服状态,单钉抗剪刚度计算结果分别为554.3,475.1和437.5 kN/mm.因此,如果沿用我国现行钢混组合梁规范中的经验公式对钢-UHPC组合梁中的栓钉连接件抗剪刚度进行计算,应考虑折减系数 η 为0.57~0.73.

依据 S_p 进行计算,同样利用割线刚度法,可取特征滑移量除以对应荷载得到单根栓钉抗剪刚度.按照我国钢结构设计标准^[20]取滑移量

$S_p=1.0\text{ mm}$ 计算单钉抗剪刚度为 171.3 kN/mm , 这严重低估了 UHPC 中栓钉连接件的抗剪刚度, 容易导致设计时栓钉连接件用量过多. 这主要是由于滑移量 S_p 达到 1.0 mm 时, UHPC 中的栓钉已经屈服, 因此, 应提出更加合理的单钉抗剪刚度计算方法. 许多学者提出取滑移量 S_p 达到 $0.2, 0.5$ 或 0.8 mm 时计算单钉抗剪刚度, 由图 4 中荷载-滑

移量曲线可知, 当平均滑移量达到 0.2 mm 时, 含小型粗骨料 UHPC 中栓钉处于轻微塑性损伤状态, 单钉抗剪刚度计算结果为 483.9 kN/mm ; 当滑移量达到 0.5 或 0.8 mm 时, 含小型粗骨料 UHPC 中栓钉完全处于屈服状态, 单钉抗剪刚度计算结果分别为 280.4 或 193.3 kN/mm , 同样会严重低估单钉抗剪刚度.

表 6 抗剪刚度计算方法与结果
Table 6 Calculation methods and results of shear stiffness

计算方法	计算理论	含小型粗骨料 UHPC 中 栓钉状态	单钉抗剪刚度 K 计算结果		应考虑的折减系数 η
			$\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$		
式(1)	$K=13d_s\sqrt{E_c f_s}^{[19]}$	—	763.5		—
依据 F_s	取 F_s 的 1/3 倍 ^[21]	弹性状态	554.3		0.73
	取 F_s 的 0.5 倍 ^[22]	轻微塑性损伤状态	475.1		0.62
	取 F_s 的 0.7 倍 ^[18]	接近完全屈服状态	437.5		0.57
依据 S_p	取 $S_p=0.2\text{ mm}$ ^[23]	轻微塑性损伤状态	483.9		0.63
	取 $S_p=0.5\text{ mm}$ ^[24]	完全屈服状态	280.4		0.37
	取 $S_p=0.8\text{ mm}$ ^[25]	完全屈服状态	193.3		0.25
	取 $S_p=1.0\text{ mm}$ ^[20]	完全屈服状态	171.3		0.22

综上所述, 按照我国现行公路钢混组合桥梁设计与施工规范^[19]和钢结构设计标准^[20]计算 UHPC 中栓钉抗剪刚度均不太合适, 需考虑折减系数 η 为 $0.57\sim 0.73$; 或者依据 F_s 达到破坏荷载 0.5 倍或滑移量达到 0.2 mm 的特征值进行抗剪刚度计算, 此时, 栓钉处于轻微塑性阶段, 栓钉的抗剪性能安全可靠.

3.2 抗剪承载力计算

依据试验破坏现象, 推出试验构件破坏主要

是由于栓钉根部被剪断造成的. 表 7 归纳了 4 种设计规范. 依据栓钉被剪断的抗剪承载力设计计算公式, 见式(2)~式(5), 涉及的栓钉特征参数包括: 栓钉截面面积 A_s , 栓钉极限强度 f_u , 抗力折减系数 ϕ , 荷载分项系数 γ_v , 群钉效应折减系数 η_g 和栓钉位置折减系数 η_p , 这些系数与本文试验无关, 均可在相关规范中查阅得到.

表 7 抗剪承载力计算方法与结果
Table 7 Calculation methods and results of shear capacity

公式编号	参考规范	设计计算公式	计算参数说明	单钉抗剪承载力 F/kN		可靠度 β
				设计结果	试验结果	
式(2)	JTG/T D64-01—2015 ^[19] GB 50017—2017 ^[20]	$F_{s,c}=0.7A_s\gamma f$	$\gamma=1.67; f=215\text{ MPa}$	95.51	152.30	3.79
式(3)	EC4 ^[18]	$F_{s,c}=\phi A_s f_u/\gamma_v$	$\phi=0.8; \gamma_v=1.25$	97.28	152.30	3.67
式(4)	AASHTO ^[26]	$F_{s,c}=\phi A_s f_u$	$\phi=0.85$	129.20	152.30	1.54
式(5)	AISC 360-10 ^[27]	$F_{s,c}=\eta_g\eta_p A_s f_u$	$\eta_g=1.0; \eta_p=0.75$	114.00	152.30	2.55

注:按照中心点法计算可靠度指标 β .

我国公路钢混组合桥梁设计与施工规范^[19]和钢结构设计标准^[20]具有相同的混凝土中栓钉承载力设计计算公式, 如式(2)所示, 考虑了折减

系数 0.7, 荷载分项系数 1.67, 以及对栓钉强度考虑最小值为 215 MPa , 则本文含小型粗骨料 UHPC 中单钉承载力设计值为 95.51 MPa ; 欧洲

规范 4^[18]中承载力计算公式,如式(3)所示,考虑了折减系数 0.8,荷载分项系数 1.25,则本文含小型粗骨料 UHPC 中单钉承载力设计值为 97.28 MPa;美国 AASHTO 规范^[26]中承载力计算公式,如式(4)所示,仅考虑了折减系数 0.85,则本文含小型粗骨料 UHPC 中单钉承载力设计值为 129.2 MPa;美国 AISC 360-10 规范^[27]中承载力计算如式(5)所示,仅考虑了折减系数 1.0 和 0.75,则本文含小型粗骨料 UHPC 中单钉承载力设计值为 114.0 MPa。

上述分析中可发现,对于含小型粗骨料 UHPC 中栓钉抗剪承载力的设计计算,沿用我国现行规范中的公式(1)相对其他规范更加保守,单钉抗剪承载力设计计算结果为 95.51 kN,远低于试验平均值 152.30 kN(标准差为 15.0 kN),对应的可靠度指标 β 为 3.79。故本文建议设计时可参考我国现行规范进行设计计算。

4 结 论

1) 含小型粗骨料 UHPC 的立方体抗压强度达到了 151 MPa,远高于普通混凝土(30~50 MPa),导致钢-UHPC 板组合推出试件的破坏模式为栓钉连接件根部被剪断,而周围 UHPC 基本无损伤。说明钢-UHPC 组合结构水平抗剪性能设计主要取决于栓钉连接件特征参数,即栓钉连接件直径与强度,未来研究可适当提高栓钉直径,以充分利用 UHPC 超高的抗压强度。

2) 本文采用的栓钉连接件属于柔性连接件,但破坏时滑移量为 0.5~1.2 mm,远低于塑性连接件定义要求的 6 mm,故钢-UHPC 组合结构水平抗剪性能设计应按弹性法进行计算。按照我国现行规范计算单钉抗剪刚度设计值时,需考虑折减系数 η 为 0.57~0.73;或者依据试验结果,取 F_s 达到破坏荷载 0.5 倍或滑移量达到 0.2 mm 的特征值进行抗剪刚度计算。

3) 推出试验构件破坏主要是由于栓钉根部被剪断造成的,按照我国现行规范计算单钉极限承载力设计值时,相比其他规范更加保守,含小型粗骨料 UHPC 中单钉极限承载力设计值为 95.51 kN,远低于试验平均值 152.30 kN(标准差为 15.0 kN),建议直接沿用我国现行规范中的设计方法。

参考文献:

- [1] 聂建国,谭英,王洪全.钢-高强混凝土组合梁栓钉剪力连接件的设计计算[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(12):94-97.
(Nie Jian-guo, Tan Ying, Wang Hong-quan. Strength of stud shear connectors in composite steel-HC beams [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(12):94-97.)
- [2] 邓舒文,邵旭东,晏班夫,等.全预制快速架设钢-UHPC 轻型组合城市桥梁[J].中国公路学报,2017,30(3):159-166.
(Deng Shu-wen, Shao Xu-dong, Yan Ban-fu, et al. Lightweight steel-UHPC composite bridge with overall prefabrication and fast erection in city [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3):159-166.)
- [3] 邵旭东,吴佳佳,刘榕,等.钢-UHPC 轻型组合桥梁结构华夫桥面板的基本性能[J].中国公路学报,2017,30(3):218-225,245.
(Shao Xu-dong, Wu Jia-jia, Liu Rong, et al. Basic performance of waffle deck panel of lightweight steel-UHPC composite bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3):218-225, 245.)
- [4] 邵旭东,邵宗暄,怀臣子,等.UHPC 矮肋桥面板抗弯性能研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11):33-44.
(Shao Xu-dong, Shao Zong-xuan, Huai Chen-zi, et al. Research on flexural performance of UHPC lowly ribbed deck panel [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(11):33-44.)
- [5] 朱劲松,徐余锋,孙雅丹,等.基于 UHPC 华夫桥面板应用的桥梁性能提升方法[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(6):1584-1594.
(Zhu Jin-song, Xu Yu-feng, Sun Ya-dan, et al. Performance improvement method of bridge by the application of UHPC waffle deck panel [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(6):1584-1594.)
- [6] 王衍,邵旭东,曹君辉,等.含小型粗骨料 UHPC 板抗弯性能研究[J].土木工程学报,2020,53(3):67-79.
(Wang Yan, Shao Xu-dong, Cao Jun-hui, et al. Research on flexural performance of UHPC deck panel containing small coarse aggregates [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(3):67-79.)
- [7] 荣学亮,黄侨,赵品.考虑疲劳损伤的栓钉连接件抗剪承载力研究[J].中国公路学报,2013,26(4):88-93,101.
(Rong Xue-liang, Huang Qiao, Zhao Pin. Study on shear capacity of stud connectors subjected to fatigue damage [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(4):88-93, 101.)
- [8] 朱劲松,高天歌,丁婧楠.钢-UHPC 组合梁单钉连接件抗拔性能分析[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(1):44-52.
(Zhu Jin-song, Gao Tian-ge, Ding Jing-nan. Analysis on pull-out behaviors of single nail connection in steel-UHPC composite beams [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2023, 53(1):44-52.)
- [9] 贺耀北,邵旭东,张欣,等.钢-UHPC 组合梁自锚式悬索桥力学性能与经济分析[J].桥梁建设,2021,51(1):51-57.
(He Yao-bei, Shao Xu-dong, Zhang Xin, et al. Mechanical performance and economic analysis of self-anchored suspension bridge with steel-UHPC composite girder [J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(1):51-57.)
- [10] Li A, Cederwall K. Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1996, 36(1):15-29.

- [11] 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.
- [12] Wang X P, Yu R, Song Q L, et al. Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 126: 105921.
- [13] 张普, 王二丽, 夏洋, 等. 超高性能混凝土的水化、微观结构和力学性能研究进展 [J]. *土木工程*, 2018(2): 194-204. (Zhang Pu, Wang Er-li, Xia Yang, et al. Hydration, microstructure and mechanical properties of the research progress of ultra-high-performance concrete [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2018(2): 194-204.)
- [14] 赵学涛, 杨鼎宜, 钱云峰, 等. 含粗骨料的UHPC配合比设计 [J]. *混凝土*, 2022(5): 173-178. (Zhao Xue-tao, Yang Ding-yi, Qian Yun-feng, et al. Mix proportion design of UHPC with coarse aggregate [J]. *Concrete*, 2022(5): 173-178.)
- [15] 程鹏, 吴方红, 曾彦钦, 等. 含粗骨料的超高性能混凝土受弯试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(2): 41-45. (Cheng Peng, Wu Fang-hong, Zeng Yan-qin, et al. Experimental research on flexural properties of ultra-high performance concrete with coarse aggregate [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(2): 41-45.)
- [16] 王怀才, 李北星, 杨建波, 等. 含粗骨料补偿收缩UHPC的制备与性能研究 [J]. *新型建筑材料*, 2021, 48(9): 41-45. (Wang Huai-cai, Li Bei-xing, Yang Jian-bo, et al. Preparation and properties of shrinkage-compensating ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. *New Building Materials*, 2021, 48(9): 41-45.)
- [17] 胡文旭, 陈宝春, 李聪, 等. 钢-UHPC组合板群钉效应有限元分析 [J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 833-840. (Hu Wen-xu, Chen Bao-chun, Li Cong, et al. Finite element analysis on group studs effect of steel-UHPC composite slab [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(6): 833-840.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press.)
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢混组合桥梁设计与施工规范: JTG/T D64-01—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016. (Specifications for design and construction of highway steel concrete composite bridge: JTG/T D64-01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016.)
- [20] European Standard. Eurocode 4—design of composite steel and concrete structures—part 2: general rules and rules for bridges [S]. British Standard, 2005.
- [21] Japanese Standard. Standard on push-out test for headed stud [S]. Tokyo Metropolis: Japanese Society of Steel Construction, 1996.
- [22] Johnson R P, May I M. Partial-interaction design of composite beams [J]. *Structural Engineer*, 1975, 53(8): 305-311.
- [23] American National Standard. AASHTO LRFD bridge design specifications [S]. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2010.
- [24] American National Standard. Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10) [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [25] 蔺钊飞, 刘玉擎. 大直径焊钉连接件抗剪性能试验 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(12): 1788-1793. (Lin Zhao-fei, Liu Yu-qing. Experimental study on shear behavior of large stud connectors [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(12): 1788-1793.)
- [26] 周安, 戴航, 刘其伟. 栓钉连接件极限承载力及剪切刚度的试验 [J]. *工业建筑*, 2007, 37(10): 84-87. (Zhou An, Dai Hang, Liu Qi-wei. Experiment on ultimate bearing capacity and shear rigidity of stud connectors [J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(10): 84-87.)
- [27] Heo B W, Kwak M G, Bae K W. Deflection of steel-concrete composite beams with partial shear interaction [J]. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2007, 23(9): 31-38.