

DOI:10.11918/202111081

钢-超薄UHPC组合构件新型界面连接的抗剪性能

古金本^{1,2}, 王俊颜¹, 严彪³, 严鹏飞³

(1. 先进土木工程材料教育部重点实验室(同济大学), 上海 201804;
2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 同济大学材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:为实现预制UHPC薄板与钢构件的装配式连接、后期可拆卸等目标,以及针对钢-超薄超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)组合桥面体系中UHPC层过薄而无法采用常规抗剪连接件的问题,提出一种由预埋带垫加长套筒、高强螺栓连接组成的新型抗剪连接方式。开展了6组新型螺栓连接件的推出试验,包括5组高强螺栓和1组负泊松比螺栓连接件,分析了新型连接件的破坏形态及荷载-滑移曲线特征,研究了螺栓直径、螺栓长径比、螺栓种类等参数对极限滑移、抗剪刚度等力学性能的影响,研究结果表明:新型螺栓连接件的破坏形态均为螺栓杆被剪断,预埋带垫加长套筒底部的UHPC无损坏压溃现象;新型高强螺栓连接件的抗剪承载力、界面相对滑移随高强螺栓的直径增大而增大;高强螺栓连接件的抗剪承载力约为螺栓抗拉强度的55.8%,故建议在钢-UHPC组合构件中采用较大直径的高强螺栓连接件,有效减少抗剪连接件的数量;而负泊松比螺栓的抗剪承载力和抗剪刚度明显较小,但极限滑移却明显增大,表现出良好的延性,建议将负泊松比螺栓应用于钢-UHPC组合构件的负弯矩区段,避免负弯矩区段出现开裂。

关键词:钢-超薄UHPC组合构件;推出试验;高强螺栓;负泊松比螺栓;装配式

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)09-0092-09

Shear resistant performance of novel interfacial connection in steel-UHPC lightweight composite structures

GU Jinben^{1,2}, WANG Junyan¹, YAN Biao³, YAN Pengfei³

(1. Key Lab of Advanced Civil Engineering Materials (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 201804, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Considering that conventional shear connectors cannot be applied to steel-ultra-high performance concrete (UHPC) composite deck systems as the UHPC layer is too thin, a novel shear connector consisting of specified designed pre-embedded sleeve and high-strength bolt was proposed, which can realize the rapid assembly and disassembly of prefabricated UHPC and steel member. Push-out tests on six groups of specimens were conducted, including five sets of high-strength bolt connectors and a set of negative Poisson's ratio bolt connector. The failure pattern and load-slip curve characteristics of the novel shear connectors were analyzed. The effects of different parameters (diameter, aspect ratio, and type) of bolts on the mechanical properties (ultimate slip and shear stiffness) of the novel shear connector were discussed. Results show that the failure mode of the novel shear connectors was the shear-off failure of the bolt shank, and there was no apparent local collapse of UHPC under the pre-embedded sleeves. The shear capacity and the relative slip of the high-strength bolt connector increased with the increase in the diameter of the high-strength bolt. The shear capacity of the novel high-strength bolt connector was approximately 55.8% of the tensile strength of the bolt. Thus, bolt connectors with larger diameters are recommended in steel-UHPC composite structures to effectively reduce the number of shear connectors. The shear capacity and shear stiffness of the negative Poisson's ratio bolt connector were significantly smaller, but the ultimate slip was significantly increased, showing good ductility. Therefore, it is suggested to apply negative Poisson's ratio bolt to the negative moment section of steel-UHPC composite structure, so as to avoid cracking in the negative moment section.

Keywords: steel-UHPC lightweight composite structure; push-out test; high-strength bolt; negative Poisson's ratio bolt; prefabricated

收稿日期: 2021-11-16; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-05-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220507.1513.004.html>

基金项目: 宁波市重大科技专项(2020Z034)

作者简介: 古金本(1994—),男,博士研究生;王俊颜(1982—),男,特聘研究员,博士生导师

通信作者: 王俊颜, 14529@tongji.edu.cn

超高性能混凝土(ultra high performance concrete, UHPC)是近 30 年发展起来的新型水泥基复合材料^[1]。鉴于其超高强度、超高韧性、优异耐久性以及良好的施工性能,将钢构件与 UHPC 薄层通过抗剪连接件组合成整体应用于组合桥面结构体系,可有效解决传统正交异性钢桥面疲劳开裂、铺装层易损坏等难题^[2]。湖南大学邵旭东教授团队提出了采用 UHPC 层厚度仅为 35 mm 的钢-超薄 UHPC 组合桥面板体系^[3],研究表明该体系具备改善钢桥面力学性能、有效减轻桥梁自重的潜力。另外,对于钢-混组合构件,抗剪连接件是实现钢构件与混凝土共同工作的关键元件,目前常用的抗剪连接件为焊接栓钉^[4]、PBL 剪力键^[5]等,但对于钢-超薄 UHPC 组合桥面板体系,常规的抗剪连接件无法满足其构造要求。本文拟提出一种新型可拆卸式高强螺栓抗剪连接件,满足钢-超薄 UHPC 组合构件的受力性能及构造要求,同时在钢-UHPC 组合结构的装配式快速施工、桥面板的更换及可重复利用等方面凸显一定优势,可应用于人行天桥、保通便桥及抢险救灾快速通道等。

目前,对钢-混组合结构螺栓连接件抗剪性能的研究主要集中在国外若干报道。Kwon 等^[6-8]提出了 3 种钢混螺栓连接件构造,开展了大量的基于 3 种螺栓连接构造的抗剪静力及疲劳性能研究,并完成了 5 个大尺寸组合梁的静力承载性能试验。Chen 等^[9]指出采用螺栓连接件可提升预制混凝土桥面板的安装效率,并使得结构拆除后的各个构件的重复利用成为可能,同时开展了不同直径螺栓连接件的推出试验研究。Dai 等^[10]将焊接栓钉连接件改造成装配式栓钉,应用于钢-普通混凝土组合结构,讨论了该种连接件的荷载-滑移曲线特征及抗剪承载力计算方法。Wang 等^[11]开展了应用于钢-UHPC 组合构件的装配式栓钉的推出试验,提出了考虑栓钉长径比、直径等参数的抗剪承载力计算方法。杨飞等^[12]开展了 8.8 级摩擦型高强螺栓连接件的推出试验,提出了摩擦型高强螺栓连接件的抗剪承载力计算方法、荷载-滑移本构等。

如上所述,目前提出的螺栓连接件均用于钢-普通混凝土组合构件,且要求混凝土层的厚度较厚。本文拟提出一种新型可拆卸式抗剪连接件,并对其抗剪性能进行试验研究。该新型连接件是采用高强螺栓及预埋在 UHPC 薄层中的带垫加长套筒的构造方式来取代大直径焊接栓钉连接件,其工作机理是高强螺栓传递钢梁与 UHPC 层之间的剪力,加长套筒的垫片用来提供抗掀起力。设计并开展了 6 组钢-超薄 UHPC 组合构件螺栓连接件推出试验,包括 5 组高强螺栓及 1 组负泊松比螺栓连接件,研究了推出试件的荷载-滑移曲线特征及破坏模式,讨论了不同螺栓类型、高强螺栓直径及长径比等参数对抗剪承载力、抗剪刚度等力学性能的影响规律,为应用新型螺栓连接件的钢-超薄 UHPC 组合桥面体系的设计提供参考。

1 推出试验设计

1.1 新型抗剪连接件的设计

图 1 展示了现有的螺栓抗剪连接件构造。这 5 种螺栓连接件均应用于钢-普通混凝土组合构件,且要求混凝土板的厚度较厚,现有研究采用的混凝土板厚度介于 100 ~ 500 mm^[7-9,12-13]。另外前 4 种螺栓连接构造,如需拆卸、更换混凝土板时,均需提升混凝土板才能使螺栓与钢构件分离,拆卸工作较为不便。本文针对 UHPC 板厚介于 30 ~ 60 mm 的钢-超薄 UHPC 组合构件,提出一种钢与预制 UHPC 薄板之间可拆卸的抗剪连接件,该连接构造由预埋在 UHPC 薄板的带垫加长套筒与高强螺栓组成。具体构造形式见图 2。

关于螺栓连接件的抗剪性能研究,大多采用高强度螺栓,这样在保证抗剪承载力的前提下,可有效减少抗剪连接件的数量。因此,本文采用的高强螺栓及带垫加长套筒的强度等级均为 8.8 级,高强螺栓的型号分别为 M12 × 40、M16 × 30、M16 × 40、M16 × 50、M20 × 40。关于 UHPC 板中预埋的带垫加长套筒,采用传统的加长套筒在非连接端采用焊接垫片的方式进行制作,其型号同高强螺栓型号,且一一对应。

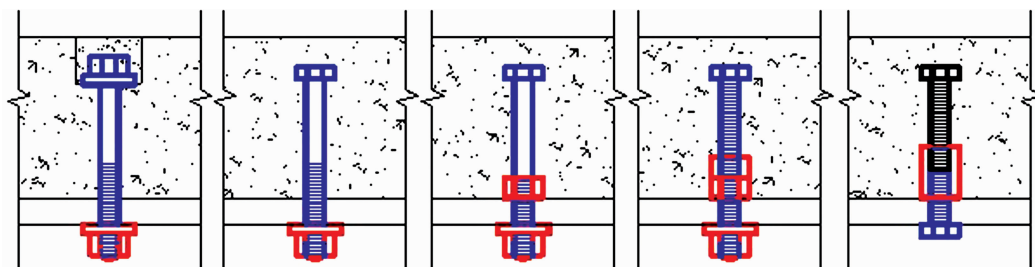


图 1 现有螺栓连接构造形式

Fig. 1 Configuration of existing bolt connectors

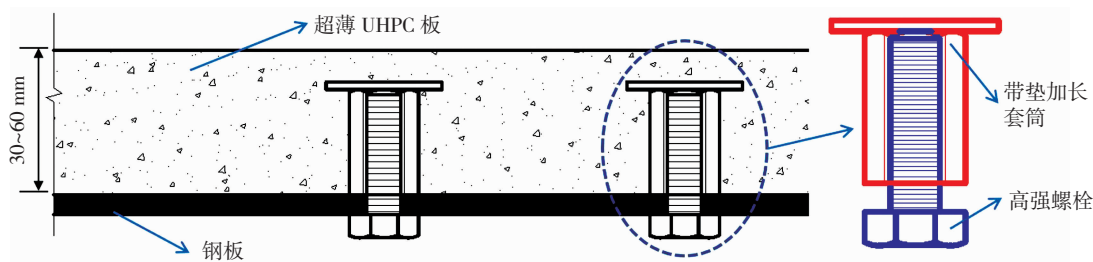


图 2 新型螺栓连接构造形式

Fig. 2 Configuration of the novel bolt connector

另外,本文采用一种新型的负泊松比螺栓,该螺栓由同济大学材料科学与工程学院严彪教授提出。负泊松比螺栓的型号规格为 M16×40,其螺纹、螺牙及螺距等参数与高强螺栓相同。其构造见图 3,可以看出螺栓杆内部为镂空结构,通过 3D 打印在螺栓杆内部形成有多个镂空空腔,镂空空腔的长度方向与杆轴方向平行,使得螺栓杆的径向截面均匀分布有多个镂空区域,构成具备负泊松比结构的螺栓。负泊松比螺栓的核心是镂空空腔为多层内折等边十六边形,在受到轴向拉力或径向的剪切力时,多层内折等边十六边形受到逐层的拉力,等边十六边形收腰处逐步产生膨胀,继而转变为沿螺栓杆轴方向分布。



图 3 负泊松比螺栓

Fig. 3 Negative Poisson's ratio bolt

1.2 试件设计

试验共设计 6 组推出试件,包括 5 组高强螺栓及 1 组负泊松比螺栓推出试件,每组共设计 3 个试件。推出试件考虑的试验参数主要包括:螺栓类型、螺栓直径、螺栓长径比,各组试件主要设计参数见表 1,各个构造的尺寸见图 4。推出试件的几何尺寸依据欧洲规范 Eurocode 4 的相关规定进行设计^[14],由两块 UHPC 薄板与一个热轧宽翼缘 H 型钢组成,在 H 型钢两侧分别布置两个新型螺栓连接件,螺栓连接件横向间距为 100 mm,推出试件的具体尺寸见图 5。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design parameters of specimens mm

试件编号	d_b	h_b	d_n	h_n	d_U
B12 - N40 - 1 ~ 3	12	50	12	40	50
B16 - N40 - 1 ~ 3	16	50	16	40	50
B20 - N40 - 1 ~ 3	20	50	20	40	50
B16 - N30 - 1 ~ 3	16	40	16	30	40
B16 - N50 - 1 ~ 3	16	60	16	50	60
NB16 - N40 - 1 ~ 3	16	50	16	40	50

注: d_b 为螺栓公称直径, h_b 为螺栓杆高度, d_n 为带垫加长套筒内径, h_n 为带垫加长套筒高度, d_U 为 UHPC 板的厚度;NB16 - N40 - 1 ~ 3 代表的是螺栓为负泊松比螺栓,带垫加长套筒为普通带垫加长套筒。

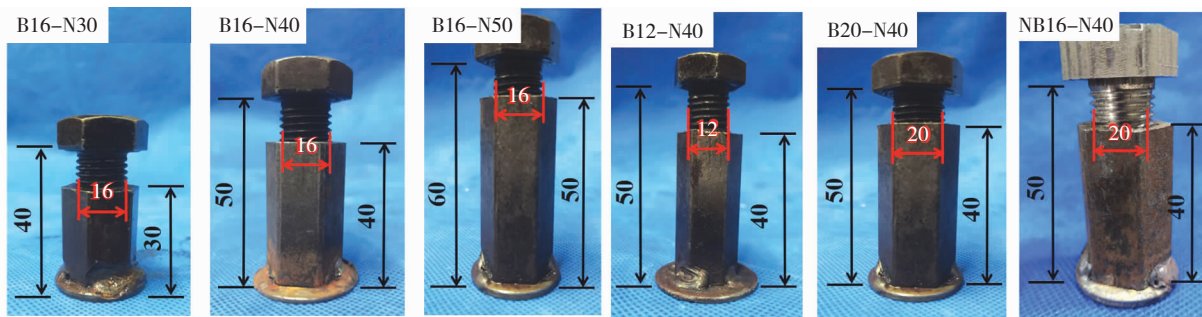


图 4 各组螺栓连接件细部构造尺寸 (mm)

Fig. 4 Detailed dimensions of each group of bolt connectors (mm)

1.3 材料性能

本文采用的 UHPC 为常温养护型高应变强化 UHPC,由 UHPC 预混料和掺量为 2% 的平直型钢纤维组成,UHPC 的基体配合比和钢纤维的特征参数分别见表 2、3。细集料采用粒径为 0.1 ~ 0.3 mm 的石英砂,磨细填料采用粒径为 38 μm ,密度为

2.65 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的磨细石英粉。UHPC 基本力学性能为:100 mm 立方体抗压强度平均值为 154.6 MPa。经狗骨头形的轴拉试件直接拉伸试验测得的 UHPC 轴拉应力 - 应变关系曲线见图 6。试件中采用的 H 型钢的钢材型号为 Q345B,厂家提供的 H 型钢力学性能见表 4。

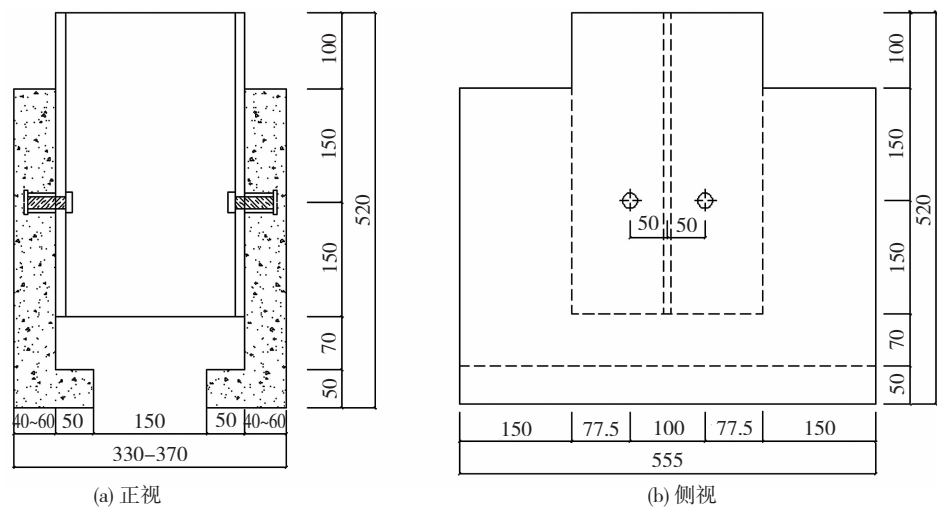


图 5 推出试件的几何尺寸 (mm)

Fig.5 Dimensions of push-out specimens (mm)

表 2 UHPC 基体配合比

Tab.2 Mix proportions of UHPC matrix

水泥	硅灰	磨细填料	细集料	水	高效减水剂
1	0.3	0.3	1.34	0.2	0.013

表 3 钢纤维特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of steel fiber

纤维形状	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	长度/mm	直径/ μm	长径比	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
平直形	2 500	200	16	200	80	7 850

表 4 H 型钢的材料力学性能

Tab.4 Mechanical properties of H-shaped steel

材料类型	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
H 型钢	357	462	201	20.3

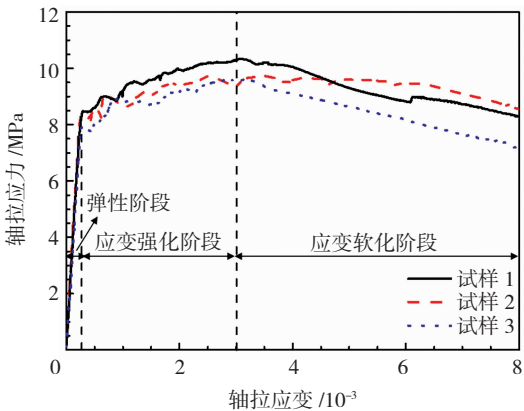


图 6 高应变强化 UHPC 轴拉应力 - 应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of high strain hardening UHPC

1.4 加载方案

推出试件加载采用 300 t 电液伺服压力试验机,加载装置见图 7。根据欧洲规范 Eurocode 4 的规定^[14],正式加载之前需要进行预加载以稳定试件和

消除钢梁和 UHPC 板之间的自然黏结力。因此试验加载分为两个阶段,第一阶段为预加载,采用力控制加载方式,加载至 50 kN,加载速率为 0.2 kN/s,反复加载 4 次,目的是消除钢梁与 UHPC 板之间的自然黏结力。正式加载时采用位移控制的加载方式,加载速率为 0.15 mm/min,对试件持续加载直至试件破坏。在推出试件左右两边的连接件位置布置 4 个精度为 0.001 mm 的光栅位移传感器,用来测量加载过程中钢梁与 UHPC 板之间的相对滑移。

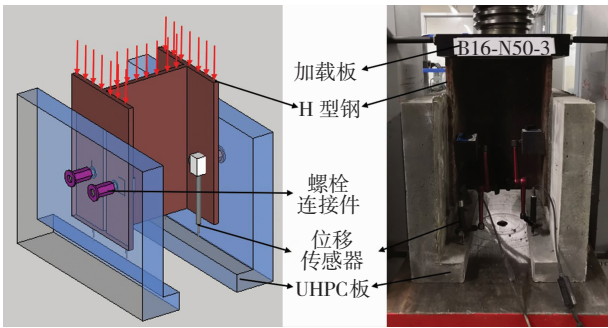


图 7 加载装置

Fig.7 Test setup

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及分析

除试件 B20 - N40 - 1、B16 - N50 - 1 ~ 2 为单侧螺栓杆被剪断,其他试件均为双侧螺栓杆被同时剪断,图 8 展示了被剪断的高强螺栓和剪断后的预制薄层 UHPC 板破坏,可以看出高强螺栓的断裂面较为平整,为脆性断口。对于大部分 UHPC 薄板来说,由于预埋于 UHPC 板的带垫加长套筒增大了螺栓连接件与 UHPC 的接触面积,减小了连接件下侧 UHPC 的应力集中,故带垫加长套筒下侧的 UHPC 无破坏。而试件 B16 - N30 - 1 出现带垫加长套筒底部的 UHPC 局部剥离破坏,且范围很小,见图 9。

图 10 展示了负泊松比螺栓破坏,其破坏模式为沿径向分布的内部构造转变为沿螺栓杆轴方向的拉断破坏。卸载后采用扳手将未被剪断的螺栓连接件从套筒中拧出,见图 11,可以看出,高强螺栓在达到抗剪承载力之前发生了有限的塑性变形,但其不影响拆卸工作的便捷性。

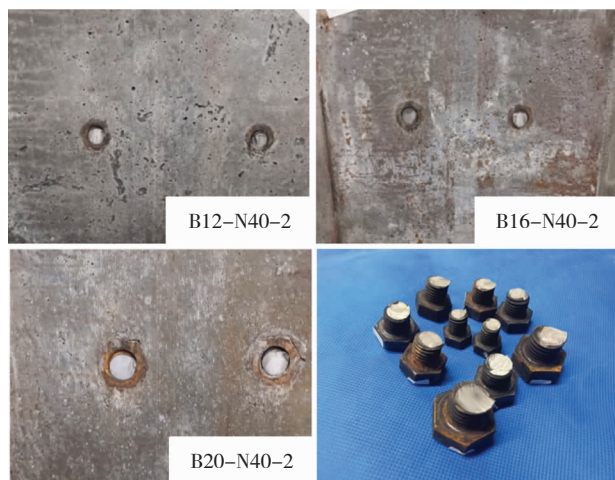


图 8 高强螺栓连接试件破坏

Fig. 8 Failure mode of high-strength bolt specimens

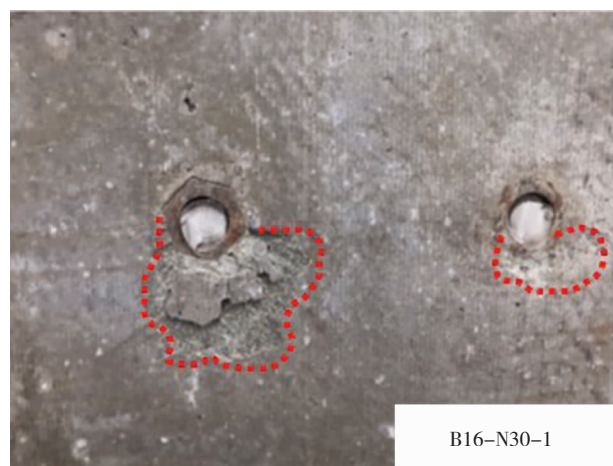


图 9 UHPC 局部剥离破坏

Fig. 9 Local debonding of UHPC



图 10 负泊松比螺栓破坏

Fig. 10 Failure mode of negative Poisson's ratio bolts



图 11 试件 B16-N50-2 拆卸

Fig. 11 Disassembled specimen B16-N50-2 after test

2.2 荷载-滑移曲线

图 12 为各个推出试件的荷载-相对滑移曲线,荷载为 4 个抗剪连接件承担的总剪力,滑移为 4 个位移传感器实测相对滑移的平均值。从图 12 可看出,对于高强螺栓连接件,该类型抗剪连接件的荷载-滑移曲线不同于传统焊接栓钉的荷载-滑移曲线(图 13(b)),主要是因为螺栓杆与螺栓孔壁之间的间隙,其典型曲线主要分为弹性段、螺栓杆滑移段、非线性强化段和下降段。在加载初期,各试件均处于弹性阶段,钢板和 UHPC 的界面相对滑移随荷载增大而线性增大,荷载增加到一定值(60~80 kN)时,由于螺栓杆与螺栓孔壁之间存在间隙,螺栓杆出现滑移,剪切刚度相对减小,但滑移量非常有限。随着荷载的继续增大,滑移量随着荷载的增大而非线性增加。极限承载力之后,荷载-滑移曲线下降段较短,螺栓出现脆性断裂。典型的高强螺栓抗剪连接件和传统焊接栓钉抗剪连接件的荷载-滑移曲线见图 13,图 13(b)展示了焊接栓钉直径为 16 mm,栓钉高度为 50 mm 的典型荷载-滑移曲线。对于负泊松比螺栓来说,随着施加的剪力逐渐增大,负泊松比螺栓内部原本由杆轴径向分布的钢丝逐步转变为沿杆轴方向的拉断破坏,呈现出延性破坏。

表 5 汇总了各组推出试件的峰值荷载、峰值滑移、极限滑移及其平均值和变异系数,这里的极限滑移指的是峰值荷载下降 10% 所对应的相对滑移。从表 5 可看出,极限滑移随高强螺栓直径的增大而增大,而高强螺栓的长径比对极限滑移影响较小。M20 高强螺栓连接件的平均极限滑移为 6.24 mm,略大于 Eurocode 4 规定的延性抗剪连接件相对滑移的下限值 6 mm,而 M12、M16 的高强螺栓连接件的

平均极限滑移则小于 Eurocode 4 规定的延性抗剪连接件相对滑移的下限值。与同直径同强度的其他螺栓连接件相比,因为预埋在 UHPC 中的带垫加长套筒有效约束了高强螺栓杆的弯曲变形,导致其极限

滑移相对较小。因此若在组合结构桥梁中应用该新型高强螺栓连接件,为满足钢-UHPC 组合界面的滑移需求,同时减少抗剪连接件的数量,可采用较大直径的高强螺栓连接件。

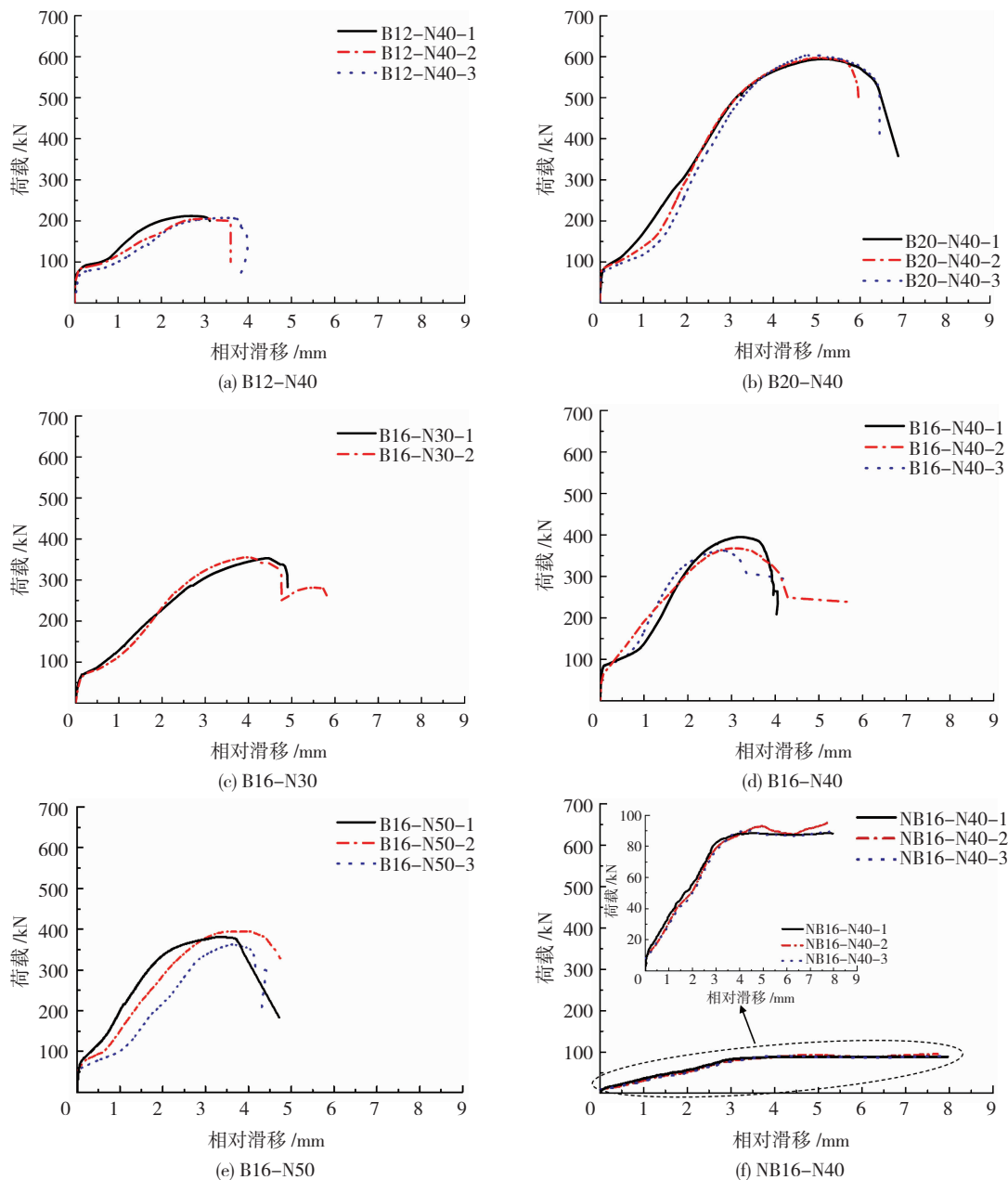


图 12 各组试件荷载-相对滑移曲线

Fig. 12 Load-relative slip curves of each group of specimens

2.3 参数对比分析

图 14 展示了不同螺栓直径、不同螺栓长径比、不同螺栓类型的荷载-滑移曲线对比,为清楚展示各参数影响规律,荷载-滑移曲线均采用各组试件的拟合平均曲线。由图 14(a)可以看出, UHPC 板厚相同时,高强螺栓直径越大,对应的抗剪承载力和极限滑移越大。而不同的高强螺栓长径比对抗剪承载力和极限滑移影响不大,见图 14(b)。值得注意的是,直径为 16 mm 时, B16-N30 呈现出最大的极

限滑移,这可能是因为施加剪力的过程中,由于预埋的长径比较小的带垫加长套筒没有长径比较大的带垫加长套筒对高强螺栓的约束效应强,导致螺栓杆产生倾斜,继而使螺栓的受力状态由在高约束状态下接近于纯剪切的受力状态转变为低约束状态下的弯剪复合受力状态,造成套筒底部的应力集中,从而提高试件的滑移,但稍微降低了抗剪承载力,这也就解释了仅有 B16-N30-1、B16-N30-3 试件产生了带垫加长套筒底部大约 1 mm 范围的 UHPC 局

部剥离破坏,见图 9。对于负泊松比螺栓而言,其抗剪承载力明显低于高强螺栓连接件的抗剪承载力,

但延性却大大提高,见图 14(c)。

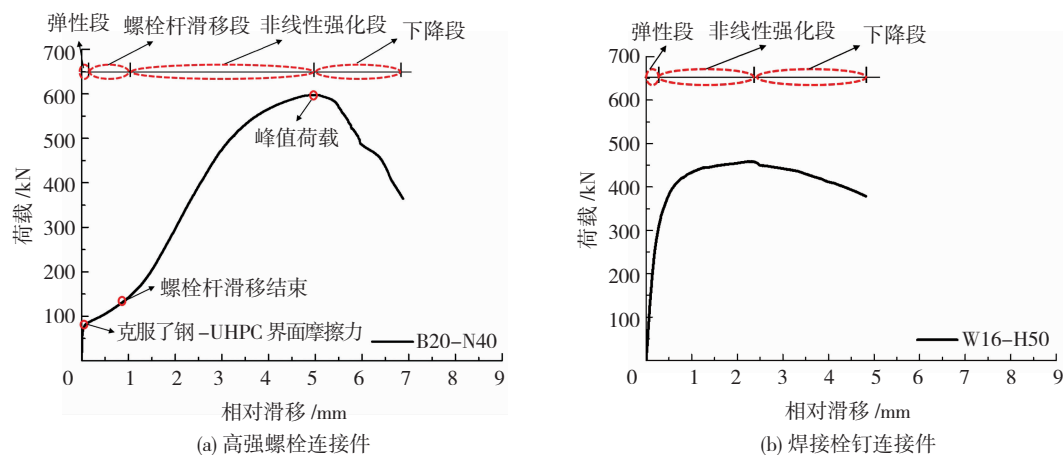


图 13 不同抗剪连接件典型的荷载 – 相对滑移曲线

Fig. 13 Typical load–relative slip curves of different shear connectors

表 5 推出试验结果汇总

Tab. 5 Push-out test results

试件编号	峰值荷载			峰值滑移			极限滑移		
	实测值/kN	平均值/kN	变异系数	实测值/kN	平均值/kN	变异系数	实测值/kN	平均值/kN	变异系数
B16 – N30	1 353.35	354.53	0.005	4.43	4.20	0.079	4.88	4.83	0.016
	2 355.70			3.96			4.77		
B16 – N40	1 362.41	375.14	0.046	2.77	2.98	0.070	3.30	3.65	0.084
	2 395.04			3.19			3.79		
	3 367.97			2.99			3.86		
B16 – N50	1 362.75	379.74	0.043	3.61	3.63	0.099	4.15	4.21	0.086
	2 395.06			4.00			4.60		
	3 381.41			3.28			3.88		
B12 – N40	1 211.99	208.25	0.017	2.71	3.05	0.146	3.12	3.52	0.105
	2 207.65			3.55			3.85		
	3 205.11			2.88			3.60		
B20 – N40	1 594.78	598.69	0.008	5.15	4.97	0.035	6.39	6.24	0.043
	2 597.62			4.97			5.93		
	3 603.66			4.80			6.39		
NB16 – N40	1 95.16	91.19	0.038	7.73	7.84	0.014	7.73	7.84	0.014
	2 88.58			7.96			7.96		
	3 89.82			7.82			7.82		

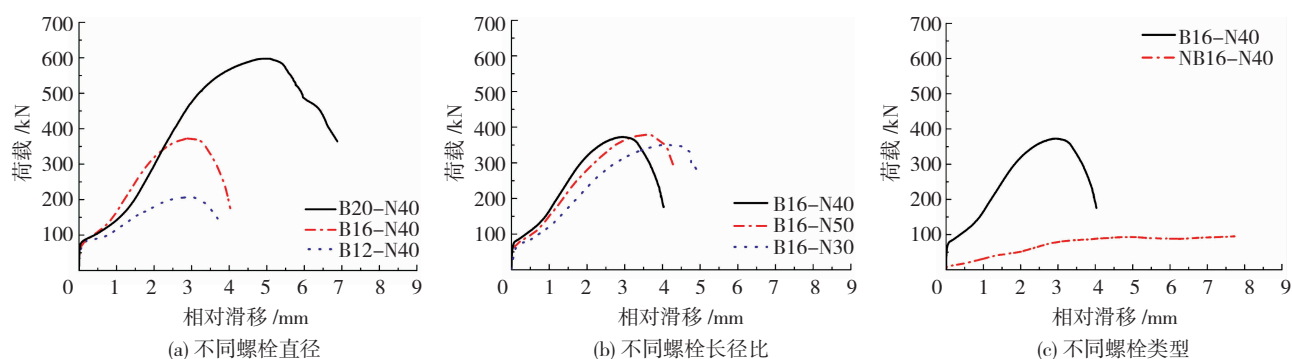


图 14 各组试件参数分析

Fig. 14 Parametric analysis of each group of specimens

2.4 抗剪刚度

针对不同类型抗剪连接件的抗剪刚度计算方法有很多种,主要分为经验系数法和基于荷载-滑移曲线的割线刚度法。考虑到割线刚度法不受抗剪连接件的类型、混凝土类型、混凝土强度等因素的影响,本文拟采用基于荷载-滑移曲线的割线刚度来计算高强螺栓连接件的抗剪刚度。然而,不同割线刚度法采用的起点和终点不尽相同,Eurocode 4^[14]建议割线的起点为原点,终点为 0.7 倍抗剪承载力对应的荷载滑移点,而 Johnson 等^[15]则指定起点为原点,终点为 0.5 倍抗剪承载力对应的荷载-滑移点。另外,Qi 等^[16]建议的抗剪刚度为相对滑移为 0.2 mm 和 2 mm 对应的割线刚度。根据不同方法计算的抗剪刚度见表 6,可以看出,文献[14-15]提出的计算方法所得到的高强螺栓连接件的抗剪刚度离散性较大,这是因为现有的计算方法主要基于焊接栓钉试验结果推导而来,而忽略了高强螺栓连接

件中螺栓杆与螺栓孔之间的间隙。而文献[16]的抗剪刚度计算值的变异系数较小,这是因为以 0.2 mm 对应的荷载-滑移点为起点可有效减轻螺栓杆滑移段对抗剪刚度计算的影响,故本文建议采用文献[16]建议的抗剪刚度计算公式进行新型高强螺栓抗剪刚度计算。

对于负泊松比螺栓而言,抗剪刚度同样明显小于高强螺栓连接件的抗剪刚度,且表现出较小的离散性。因此,在负泊松比螺栓连接件抗剪刚度和抗剪承载力均较小的前提下,可将高强螺栓和负泊松比螺栓联合应用于钢-UHPC 组合构件中,高强螺栓连接件用于钢-UHPC 组合构件的正弯矩区段,负泊松比螺栓则用于负弯矩区段,这样在高强螺栓连接件有效约束钢构件与 UHPC 间滑移、保证钢构件与 UHPC 组合作用的前提下,也可以有效减小负弯矩区段 UHPC 所受到的拉应力,避免负弯矩区段 UHPC 出现开裂。

表 6 各试件剪切刚度
Tab.6 Shear stiffness of each specimen

试件编号		文献[14]			文献[15]			文献[16]		
		计算值/ (kN·mm ⁻¹)	平均值/ (kN·mm ⁻¹)	变异系数	计算值/ (kN·mm ⁻¹)	平均值/ (kN·mm ⁻¹)	变异系数	计算值/ (kN·mm ⁻¹)	平均值/ (kN·mm ⁻¹)	变异系数
B16-N30	1	111.99	114.74	0.03	121.22	116.32	0.06	88.05	89.58	0.03
	2	117.48			111.43			91.11		
B16-N40	1	180.02	167.21	0.07	170.78	170.13	0.15	124.60	117.87	0.05
	2	157.85			145.12			112.43		
	3	163.77			194.50			116.60		
B16-N50	1	110.60	146.07	0.26	109.39	152.95	0.30	87.38	110.04	0.19
	2	143.15			149.55			114.96		
	3	186.37			199.91			127.78		
B12-N40	1	125.89	103.60	0.20	142.71	124.73	0.19	62.99	55.59	0.13
	2	84.25			97.19			55.39		
	3	100.66			134.29			48.39		
B20-N40	1	160.46	158.27	0.04	158.99	150.26	0.06	130.28	125.47	0.05
	2	162.37			150.14			128.08		
	3	151.97			141.65			118.07		
NB16-N40	1	26.58	26.66	0.03	27.46	28.37	0.11	11.89	10.78	0.09
	2	27.51			31.89			10.24		
	3	25.90			25.76			10.21		

2.5 抗剪承载力

由现行 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[17]中焊接栓钉的抗剪承载力计算公式分析可知,连接件的抗剪承载力主要与混凝土的抗压强度和栓钉的抗拉强度有关。由于 UHPC 的超高抗压强度以及预埋带垫套筒对高强螺栓的高约束效应,抗剪性能不受混凝土强度控制,在此比较高强螺栓的抗剪承载力实测值与高强螺栓的抗拉强度计算值,见图 15,

可以看出高强螺栓的抗剪承载力约为螺栓抗拉强度计算值的 55.8%。

与图 1 已有的钢混组合螺栓连接件试验结果对比^[6-7,12],在相同直径和强度的前提下,本文提出的新型高强螺栓连接件抗剪承载力相对较大,这是因为 UHPC 的超高抗压强度以及预埋的带垫套筒对高强螺栓的高约束效应,限制了螺栓的弯曲变形,使得螺栓基本处于纯剪状态,而其他几种则处于弯剪复合状态。

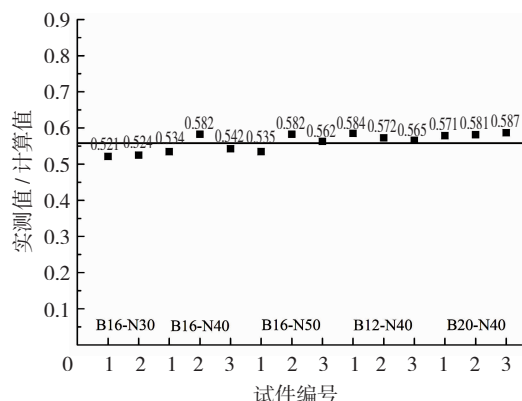


图 15 高强螺栓实测抗剪承载力与螺栓抗拉强度对比

Fig. 15 Comparison between measured shear capacity and calculated tensile strength of high-strength bolts

3 结 论

1) 提出了一种应用于钢 - 超薄 UHPC 组合构件的新型可拆卸式抗剪连接构造形式,由高强螺栓、预埋于超薄 UHPC 板的带垫加长螺母组成,有利于钢 - UHPC 组合结构的快速装配式安装、更换、循环利用。

2) 开展了 5 组高强螺栓连接和 1 组负泊松比螺栓连接的推出试验,推出试件的破坏形态均为螺栓杆被剪断,UHPC 板表面无损坏,破坏后的试件方便拆卸。

3) 对于高强螺栓连接件来说,该类型抗剪连接件的荷载 - 滑移曲线不同于传统焊接栓钉的荷载 - 滑移曲线,主要是因为螺栓杆与螺栓孔之间的间隙,其典型曲线主要分为弹性段、螺栓杆滑移段、非线性强化段和下降段。

4) UHPC 板厚相同时,高强螺栓直径越大,则对应的抗剪承载力和极限滑移越大。随着高强螺栓直径越大,极限滑移逐渐满足 Eurocode 4 规定的延性抗剪连接件的滑移需求。而不同的高强螺栓长径比对抗剪承载力和极限滑移影响不大。高强螺栓连接件的抗剪承载力约为螺栓抗拉强度的 55.8%。

5) 负泊松比螺栓连接件的抗剪承载力、抗剪刚度均相对较小,但表现出良好的延性,建议将负泊松比应用于钢 - UHPC 组合构件的负弯矩区段,在满足负弯矩区段不需要很高抗剪承载力的需求下,可以有效减小负弯矩区段 UHPC 所受到的拉应力,降低 UHPC 的开裂风险。

参考文献

- [1] 王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等. UHPC 的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):165
WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, et al. Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12):165. DOI: 10.11918/j. issn. 036706234. 201705148
- [2] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报,2007,40(9):65

- HUANG Wei. Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9):65. DOI: 10.15951/j. tmge. 2007. 09. 004
- [3] 邵旭东,张松涛,张良,等. 钢 - 超薄 UHPC 层轻型组合桥面性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1):22
SHAO Xudong, ZHANG Songtao, ZHANG Liang, et al. Performance of light-type composite bridge deck system with steel and ultra-thin UHPC layer [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(1):22. DOI: 10.3969 /j. issn. 1674 - 0696. 2016. 01. 05
- [4] 刘扬,曾丹,曹磊,等. 钢 - UHPC 组合结构桥梁研究进展[J]. 材料导报,2021,35(3):3104
LIU Yang, ZENG Dan, CAO Lei, et al. Advances of steel-UHPC composite bridge[J]. Materials Reports, 2021, 35(3):3104. DOI: 10.11896 /cldb. 19090024
- [5] HIGASHIYAMA H, YOSHIHDA K, INAMOTO K, et al. Fatigue of headed studs welded with improved ferrules under rotating shear force[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92:211. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2013. 09. 012
- [6] KWON G, ENGELHARDT M, KLINGNE R. Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4):532. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2009. 09. 012
- [7] KWON G, ENGELHARDT M, KLINGNE R. A case study of bridge strengthening through the use of post-installed shear connectors [C]//Structures Congress 2010. Orlando: Structural Engineering Institute of the ASCE, 2010:666
- [8] KWON G, ENGELHARDT M, KLINGNE R. Experimental behavior of bridge beams retrofitted with post-installed shear connectors[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4):536. DOI: 10.1061/(ASCE)BE. 1943 - 5592. 0000184
- [9] CHEN Y, ZHAO Y, WEST J, et al. Behaviour of steel-precaster composite girders with through-bolt shear connectors under static loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103:168. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2014. 09. 001
- [10] DAI X, LAM D, SAVERI E. Effect of concrete strength and stud collar size to shear capacity of demountable shear connectors [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(11):04015025 - 1. DOI: 10.1061/(ASCE)ST. 1943 - 541X. 0001267
- [11] WANG Junyan, GUO Junyuan, JIA Liangjiu, et al. Push-out tests of demountable headed stud shear connectors in steel-UHPC composite structures [J]. Composite Structures, 2017, 170:69. DOI: 10.1016/j. compstruct. 2017. 03. 004
- [12] 杨飞,刘玉擎,姜智博,等. 新型钢混螺栓连接件抗剪性能试验[J]. 中国公路学报,2018,31(12):50
YANG Fei, LIU Yuqing, JIANG Zhibo, et al. Experiment on shear performance of novel steel-concrete bolted connector [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):50. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001 - 7372. 2018. 12. 004
- [13] LIU Xinpei, BRADFORD M, LEE M. Behavior of high-strength friction-grip bolted shear connectors in sustainable composite beams [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 141(6):04014149. DOI: 10.1061/(ASCE)ST. 1943 - 541X. 0001090
- [14] European Committee for Standardization. Eurocode 4—design of composite steel and concrete structures: EN 1994 - 2:2005 [S]. Brussels: CEN, 2005
- [15] JOHNSON R, MAY I. Partial-interaction design of composite beams[J]. Structural Engineer, 1975, 8(53):305
- [16] QI Jianan, WANG Jingquan, LI Ming, et al. Shear capacity of stud shear connectors with initial damage: experiment, FEM model and theoretical formulation[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 25(1):79. DOI: 10.12989/scs. 2017. 25. 1. 079
- [17] 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, 2017
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structure: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017

(编辑 赵丽莹)