

钢-GPC 栓钉连接界面抗剪性能

郑莲琼^{1,2}, 章超勇¹

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福州市绿色建造与建筑工业化行业技术创新中心, 福建 福州 350118)

摘要: 为探究钢-地质聚合物混凝土 (geopolymer concrete, GPC) 栓钉连接的界面抗剪性能, 对4组栓钉连接的钢-混凝土试件进行推出试验, 分析其破坏模式、荷载-滑移曲线、抗剪承载力以及延性等力学性能, 得到混凝土类型、GPC 抗压强度以及栓钉直径对界面黏结性能的影响规律。结果表明: GPC 试件中栓钉表现出剪断破坏, 与普通混凝土试件破坏形态一致, GPC 翼板无明显裂缝, 整体性较好; GPC 栓钉抗剪承载力与普通混凝土栓钉试件相近, 刚度偏低, 但具有更好的延性; 提高 GPC 抗压强度和栓钉直径可有效提高栓钉的抗剪承载力和刚度。基于实测结果, 提出栓钉连接的钢-GPC 抗剪承载力计算公式和界面黏结-滑移本构模型。

关键词: GPC; 推出试验; 抗剪承载力; 黏结-滑移

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)03-0205-07

Study on shear performance of steel-GPC interfaces with studs

ZHENG Lianqiong^{1,2}, ZHANG Chaoyong¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fuzhou Technology Innovation Center of Green Construction and Building Industrialization, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To study the shear performance of steel-geopolymer concrete (GPC) interfaces with studs, four groups of push-out tests were carried out. The mechanical properties including damage mode, load-slip curve, shear capacity and ductility were analyzed to obtain the effects of concrete type, compressive strength of GPC and diameter of stud on the shear performance. The test results show that the specimen studs in GPC exhibit shear damage, which is consistent with the specimens of studs in ordinary concrete; the shear bearing capacity of studs in GPC is similar to that of studs in ordinary concrete, and the shear stiffness is low, but the ductility is good; increasing the compressive strength and diameter of studs embedded in GPC can effectively improve the shear bearing capacity and stiffness of studs. Finally, based on the measured results, the shear bearing capacity calculation formula and bond-slip principal structure model of steel-GPC connected by studs are proposed.

Keywords: geopolymer concrete (GPC); push-out test; shear bearing capacity; bond-slip

地质聚合物混凝土 (geopolymer concrete, 简称 GPC) 具有绿色低碳、早强快硬、结构致密、耐久性好以及耐高温等优点, 但在相同抗压强度下, GPC 与普通混凝土相比, 弹性模量和断裂性能偏低, 在受拉情况下具有更明显的脆性^[1]。钢-混

凝土组合梁是由抗剪连接件将钢梁和混凝土组合而成的结构, 将 GPC 应用于组合梁的受压翼板中, 可充分利用 GPC 良好的受压性能, 避免其受拉脆性较大等缺点; 同时 GPC 具有优越的界面黏结性能^[2], 预期通过抗剪连接件能够很好地与钢

收稿日期: 2023-03-19

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2020J01887)

第一作者简介: 郑莲琼 (1982—), 女, 福建福清人, 教授, 博士, 研究方向: 组合结构。

梁形成整体共同受力。栓钉作为钢-混凝土组合梁中重要的抗剪连接件,是组合梁协同工作的关键,由于 GPC 材料属性与普通混凝土的差异,会造成 GPC 翼板通过栓钉连接件与钢梁的协同工作机理不同,因此,开展基于栓钉连接的钢-GPC 界面力学性能研究十分必要。

目前,国内外学者通过大量推出试验^[3]发现栓钉直径、长径比、极限强度以及混凝土强度等是影响栓钉连接界面抗剪性能的主要因素,并提出普通混凝土中栓钉抗剪承载力计算公式和界面黏结-滑移本构。部分学者对钢与轻骨料混凝土^[4]、超高性能混凝土^[5]、高延性纤维增强水泥基复合材料^[6]以及橡胶混凝土^[7]中栓钉抗剪性能进行了研究,而对栓钉连接的钢-GPC 界面抗剪性能的试验和理论研究较少。本文通过推出试验探究栓钉连接的钢-GPC 界面抗剪性能,并提出 GPC 中栓钉的抗剪承载力计算公式和界面黏结-滑移模型,为 GPC 应用于组合梁结构提供理论依据。

1 试验研究

1.1 试件设计

按文献[8]设计 4 组推出试件,其中一组为普通混凝土对比试件,研究栓钉直径(d)、GPC 立方体抗压强度(f_{cu})对 GPC 中栓钉连接件抗剪承载力和钢-GPC 界面力学性能的影响规律,各组试件参数如表 1。试件编号:开头 3 个字母代表混凝土类型(GPC 代表地质聚合物混凝土,OPC 代表普通混凝土);数字 50、70 分别代表 C50、C70;第一个“-”后数字代表栓钉直径;最后数字 1、2 代表每组参数制作 2 个试件。

表 1 试件参数
Tab.1 Parameters of specimens

编号	混凝土类型	d/mm	f_{cu}/MPa
GPC50-13-1	GPC	13	50
GPC50-13-2	GPC	13	50
GPC50-16-1	GPC	16	50
GPC50-16-2	GPC	16	50
OPC50-16-1	OPC	16	50
OPC50-16-2	OPC	16	50

续表			
编号	混凝土类型	d/mm	f_{cu}/MPa
GPC70-16-1	GPC	16	70
GPC70-16-2	GPC	16	70

如图 1 推出试件选用 HW250×250×14×14 规格的型钢;在型钢翼缘分别焊接 2 根栓钉后两侧与配筋混凝土板连接;栓钉长 70 mm,材质为 ML15,横向间距 80 mm;混凝土板尺寸为 500 mm×450 mm×150 mm,板内双向按间距 120 mm 布置直径为 10 mm 的 HRB335 钢筋;留出钢梁向下滑移的空间 50 mm。GPC 配合比及实测试验时 GPC 的立方体抗压强度 f_{cu} 、轴心抗压强度 f_c 和弹性模量 E_c 等力学性能如表 2,实测钢材屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 、弹性模量 E_s 和泊松比 σ_s 等力学性能指标如表 3。

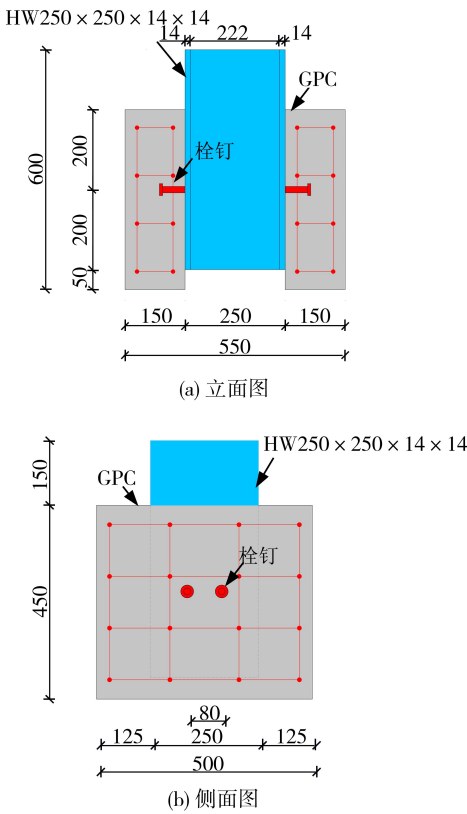


图 1 推出试件尺寸(单位:mm)

Fig.1 Dimensions of specimens (unit: mm)

1.2 试验加载与测试

为确保试件受力均匀,在试件顶端放置 20 mm 的矩形钢板,并在试件底部铺设一层细沙,加载装置如图 2 所示。

表 2 混凝土配合比及力学性能

Tab.2 Mix proportion and mechanical properties of concrete

混凝土类型	配合比/(kg · m ⁻³)						力学性能/ MPa		
	碱激发剂(水)	粉煤灰	矿渣	水泥	砂	石	f_{cu}	f_c	E_c
OPC50	166.3	—	—	350.6	677.3	1 204.3	55.81	37.91	35 142
GPC50	306.0	417.1	139.0	—	674.7	1 243.1	59.72	41.57	24 760
GPC70	306.0	389.3	166.8	—	674.7	1 243.1	69.62	46.45	27 850

表 3 钢材力学性能

Tab.3 Mechanical properties of steel

材质	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /MPa	σ_s
14 mm 钢材	420	562	194 774	0.286
16 mm 栓钉	484	552	209 333	0.301
13 mm 栓钉	411	463	199 000	0.297
10 mm 钢筋	366	507	171 325	0.243

加载程序分为预加载和正式加载。预加载采用位移控制,以 0.5 mm/min 的速度加载至 30% $P_{u,c}$ ($P_{u,c}$ 为极限荷载,按文献[8]中栓钉抗剪承载力公式计算)后卸载,重复 3 次,消除钢材与混凝土自然黏结力的影响,确保试件与试验装置各个部位接触良好,并检查位移计和力传感器等设备是否正常工作。待各项工作都符合要求后正式加载,采用位移控制,以速率 0.5 mm/min 加载直至试件破坏。

在试件栓钉高度处前后对称布置 4 个位移计测量钢-GPC 翼板界面的相对滑移,在试件顶端放置力传感器,从而获得试件的荷载-滑移曲线。

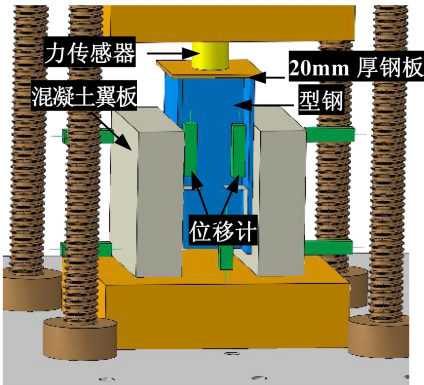


图 2 加载装置

Fig.2 Test set-up

2 试验结果分析

2.1 试验现象和破坏形态

各试件加载过程试验现象及破坏形态相近,以试件 GPC50-16-1 为例,受荷初期荷载增长速率较快,几乎没有滑移;继续加载至 0.6 P_u (P_u 为试件实测极限荷载)左右,栓钉根部达到屈服,开始产生塑性变形,荷载增长速率变缓而滑移增长速率加快,伴有混凝土挤压的声音;在经过塑性段的缓慢发展,荷载逐渐接近峰值,试件突然发出巨大的剪断声,一侧混凝土板中的栓钉断裂,导致混凝土板与型钢分离并向一侧倾斜,试件失去承载能力。GPC 试件均为栓钉剪断破坏,与普通混凝土试件破坏模式一致,如图 3(a)所示。

试验结束后观察钢梁翼缘面,没有出现明显的焊缝破坏,表明栓钉焊接质量良好,如图 3(b)所示。观察混凝土翼板面,普通混凝土翼板面除了栓钉根部下方存在局部破损,还出现多条横向裂缝,而 GPC 板则没有明显裂缝,栓钉之间区域整体性较好;相比普通混凝土破损区域,GPC 板的破损区域面积更小,表面保持良好的整体性,表明地质聚合物与骨料的黏结性更强。随着 GPC 强度的提高,GPC 板面更平整密实,栓钉下方压溃的面积也较小;当栓钉直径增大时,GPC 破损面积增大,表明栓钉直径的增大对混凝土挤压力更大。不同参数下 GPC 翼板面破坏如图 3(c)所示。

2.2 荷载-滑移曲线

图 4 给出各组试件的荷载(P)-滑移(s)曲线。可见各组试件的荷载-滑移曲线趋势一致,以试件 GPC50-16-1 曲线为例,加载初期试件处于弹性阶段,荷载增长速率快而相对滑移很小,曲线近似直线,试件抗剪刚度较大;继续加载至 0.6 P_u 时进入塑性阶段,荷载增长速率变缓,相对滑移增长速率加快,非线性特征明显,试件刚度逐



图 3 试件典型破坏模式
Fig.3 Typical failure mode

渐退化且幅度加大;逐渐临近极限荷载,曲线逐渐趋于水平,荷载几乎不再增长,存在较长的水平段,表现出较好的延性;当栓钉达到极限抗剪承载力时被剪断,试件破坏,下降段短且陡。各组试件曲线与其平均曲线的优度指标 R^2 均在 $0.94 \sim 0.97$,表明每组实测曲线差异性较小,可靠度高。

图 4(a)表明, GPC 试件的刚度低于普通混凝土试件,这主要是由于相同强度等级下, GPC 的弹性模量较低,其受到栓钉挤压而产生较大的变形,从而在钢与 GPC 间形成较大的滑移; GPC 试

件具有更长的塑性发展段,峰值荷载时滑移值也更大,表明 GPC 试件具有优越的延性; GPC 试件的极限承载力与普通混凝土试件相近。图 4(b)表明,当栓钉直径由 13 mm 增大到 16 mm 时,试件弹性段刚度显著提高,曲线弹塑性发展阶段也相对较短,但 16 mm 的栓钉在被剪断前具有更长的塑性发展,不同直径的试件峰值荷载对应的滑移值相当,两个试件均具有良好的延性。图 4(c)表明,随着 GPC 抗压强度的提高,栓钉的抗剪承载力也得到了明显的提高,但延性有所降低。

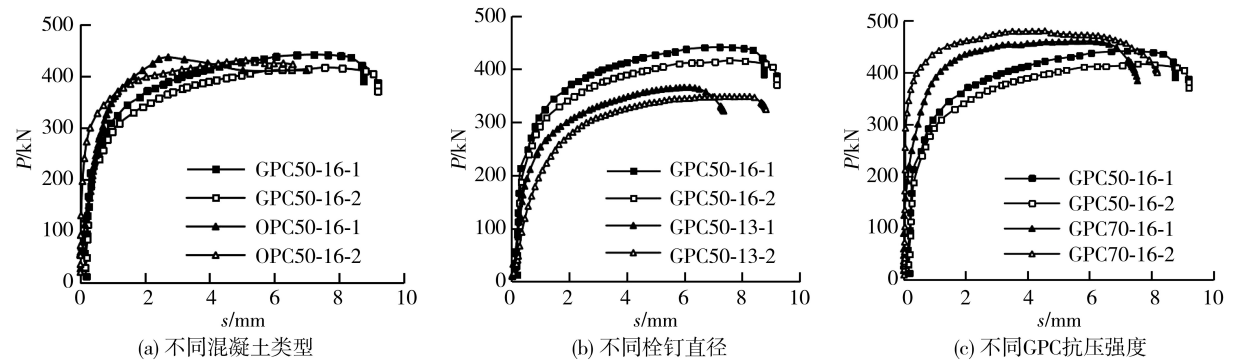


图 4 荷载-滑移曲线
Fig.4 Load-slip curves

2.3 栓钉抗剪承载力与延性

表 4 为各组试件中栓钉的极限抗剪承载力 P_u 、抗剪承载力平均值 $P_{u,m}$ 、峰值滑移 δ_u 及其平均值 $\delta_{u,m}$,图 5 为不同参数对栓钉抗剪承载力和试件延性的影响。由图 5 可见, GPC 与 OPC 试件的抗剪承载力分别为 110.79、108.38 kN,两者相近,即 GPC 中栓钉表现出与普通混凝土中相近的承载力。对比两者延性, GPC 试件峰值滑移值 6.99 mm,比普通混凝土试件提高 71.32%,表明 GPC 中栓钉试件表现出优越的延性。原因是

GPC 具备优越的黏结性能使其强度和延性得到有效发挥。

GPC 中栓钉直径由 13 mm 增大到 16 mm,抗剪承载力由 85.03 kN 变化为 108.37 kN,峰值滑移值由 6.14 mm 提高到 6.99 mm,两者分别提高了 27.45% 和 13.84%,表明增大栓钉直径可以显著提高试件的抗剪承载力和延性。这是由于随着栓钉直径增大,用于传递剪力的栓钉根部与钢梁和下方混凝土接触区域就越大,故栓钉传递剪力性能得以充分发挥。

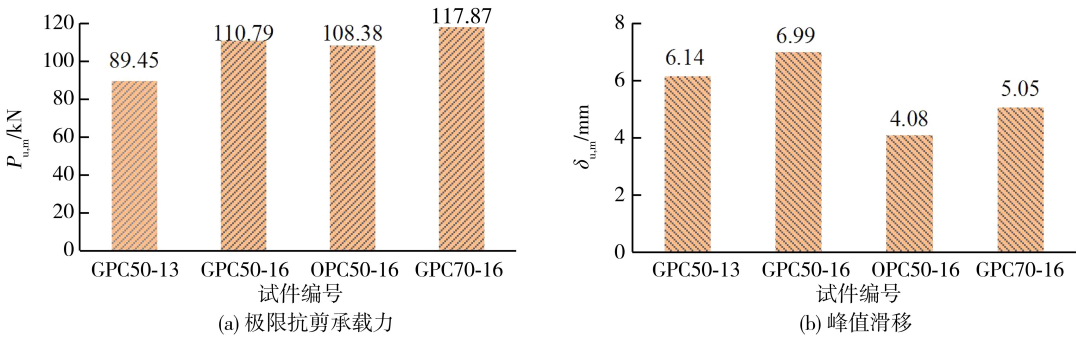


图 5 不同参数对栓钉力学性能影响

Fig.5 Effects of different parameters on mechanical performance of studs

将 GPC 抗压强度由 C50 提高至 C70 时,栓钉抗剪承载力由 110.79 kN 变化到 117.87 kN,提高了 8%,而其峰值滑移值由 6.99 mm 变化到 5.05 mm,降低了 38.41%,表明提高混凝土强度对其抗剪承载力提升幅度不大,对延性影响较大。

表 4 试验结果
Tab.4 Experimental results

编号	P_u /kN	$P_{u,m}$ /kN	δ_u /mm	$\delta_{u,m}$ /mm
GPC50-13-1	91.51	89.45	6.08	6.14
GPC50-13-2	87.40		6.20	
GPC50-16-1	112.40	110.79	7.10	6.99
GPC50-16-2	109.18		6.88	
OPC50-16-1	109.12	108.38	3.20	4.08
OPC50-16-2	107.65		4.96	
GPC70-16-1	115.30	117.87	5.85	5.05
GPC70-16-2	120.45		4.25	

3 栓钉的抗剪承载力计算方法

3.1 GPC 中单栓钉抗剪承载力

表 5 是各国规范中栓钉抗剪承载力计算公式,设计原则都是取栓钉自身承载力和混凝土承载力较小值作为极限抗剪承载力。表 6 和图 6 给出本文试验试件采用各国规范公式计算值与实测值比较,表 6 中 P_{u1} 、 P_{u2} 、 P_{u3} 、 P_{u4} 以及 P_u 分别为 EN 1994-1-1-2004^[8]、GB50917-2013^[9]、AASHTO-2014^[10]、GB50017-2017^[11] 规范公式计算值和实测值, α_i 为各国规范公式计算值与实测承载力比值 P_{ui}/P_u ; 图 6 中横轴

$P_{u,0}$ 为实测抗剪承载力值,纵轴 $P_{u,c}$ 为公式计算值。由表 6、图 6 可见,各规范公式计算结果均偏于保守,因此有必要提出 GPC 中栓钉的抗剪承载力计算公式。

表 5 各规范中栓钉抗剪承载力计算公式

Tab.5 Calculation formula of stud shear bearing capacity in different codes

规范	抗剪承载力公式
EN 1994-1-1-2004 ^[8]	$P_u = \min \{ 0.64f_uA_s, 0.29\alpha d^2 \sqrt{f_cE_c} \}$
GB 50917-2013 ^[9]	$P_u = \min \{ 0.43\eta A_s \sqrt{f_cE_c}, 1.19A_s \sqrt{\left(\frac{E_c}{E_s}\right)^{0.2} \left(\frac{f_{cu}}{f_u}\right)^{0.1}} \}$
AASHTO-2014 ^[10]	$P_u = \min \{ \varphi 0.5A_s \sqrt{f_cE_c}, \varphi A_s f_u \}$
GB 50017-2017 ^[11]	$P_u = \min \{ 0.43A_s \sqrt{f_cE_c}, 0.7A_s f_y \}$

注: A_s 为栓钉横截面积 (mm²); f_u 为栓钉的极限抗拉强度 (MPa); E_s 为栓钉的弹性模量 (MPa); E_c 为混凝土弹性模量 (MPa); f_c 为混凝土轴心抗压强度 (MPa); α 是栓钉的长度影响系数,当 $3 \leq h/d \leq 4$ 时, $\alpha = 0.2[(h/d+1)+1]$; 当 $h/d > 4$ 时, $\alpha = 1.0$, 其中 d 为栓钉直径 (mm), h 为栓钉长度 (mm); φ 为抵抗系数,取 0.85。

上述试验结果表明,在同样为栓钉剪断破坏的情况下, GPC 的强度等级越高,栓钉抗剪承载力越高,而 EN 1994-1-1-2004、AASHTO-2014、GB50017-2017 中的设计公式采用栓钉剪断和混凝土压碎破坏取小值的方式,无法反应栓钉剪断情况下, GPC 材料性能对栓钉抗剪承载力的影响。Oehlers^[12] 和薛伟辰等^[13] 认为栓钉抗剪性能由混凝土和栓钉材性共同决定,提出了式 (1) 模型分析计算栓钉的抗剪承载力,式中 k 、 α 、 β 为常数,可由实测结果回归得到。

$$P_u=kA_sf_u\left(\frac{E_c}{E_s}\right)^\alpha\left(\frac{f_{cu}}{f_u}\right)^\beta\tag{1}$$

GPC 中栓钉抗剪承载力与普通混凝土情况相似, GPC 中栓钉抗剪承载力的主要因素为: GPC 强度等级、GPC 弹性模量、栓钉横截面面积、栓钉强度等, 为综合考虑 GPC 和栓钉各影响参数, 本文 GPC 中栓钉抗剪承载力公式采用式(1)作为基本模型。基于 3 组 GPC 推出试验和本课题组其

余 6 组共 16 个推出试验实测值进行拟合, 得到 GPC 中栓钉剪断破坏下的抗剪承载力计算公式见式(2), 拟合公式计算值与实测值比较见图 6。由图 6 可见, 本文提出的 GPC 中栓钉抗剪承载力公式计算值误差在±10% 以内, 拟合优度 R^2 为 0.86, 拟合效果较好。

$$P_u=1.59\times10^{-6}A_sf_u\left(\frac{E_c}{E_s}\right)^{-4.46}\left(\frac{f_{cu}}{f_u}\right)^{1.90}\tag{2}$$

表 6 各国规范公式计算值与试验值

Tab.6 Calculated values and experimental values of standard formula of different countries

编号	P_{u1}/kN	P_{u2}/kN	P_{u3}/kN	P_{u4}/kN	P_u/kN	α_1	α_2	α_3	α_4
GPC50-13-1	35.01	38.96	46.37	43.02	87.40	0.401	0.378	0.531	0.587
GPC50-13-2	35.01	38.96	46.37	43.02	76.15	0.46	0.434	0.609	0.674
GPC50-16-1	62.27	69.13	82.72	77.68	103.53	0.570	0.531	0.758	0.597
GPC50-16-2	62.27	69.13	82.72	77.68	109.18	0.601	0.56	0.799	0.629
GPC70-16-1	62.30	71.89	82.72	77.68	115.30	0.540	0.519	0.717	0.565
GPC70-16-2	62.30	71.89	82.72	77.68	120.45	0.517	0.497	0.593	0.541
均值	-	-	-	-	-	0.515	0.487	0.668	0.598
方差	-	-	-	-	-	0.067	0.062	0.096	0.043

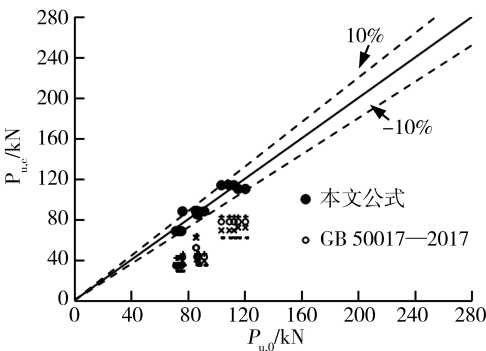


图 6 各栓钉承载力公式计算值与实测值比较

Fig.6 Comparison between calculated value and measured value of bearing capacity formula of each stud

3.2 钢-GPC 栓钉连接界面荷载-滑移本构

表 7 为不同学者提出钢-普通混凝土栓钉连接界面的荷载-滑移本构模型。图 7 为不同学者提出的荷载-滑移模型与本文实测曲线的对比。可以看出, Ollgaard 提出的曲线模型弹性刚度较大, 与试验曲线差距较大, 不适用于钢-GPC 连接面; 王连广、An 和 Cederwall 提出的曲线模型前半段与试验曲线较为接近, 但进入塑性段后曲线的

刚度和承载力均比试验曲线大, 故也不适用。

表 7 栓钉荷载-滑移本构
Tab.7 Load-slip constitutive of stud

学者	抗剪承载力公式
Ollgaard ^[14]	$P=(1-e^{-18s})^{0.4}P_u$
王连广 ^[15]	$P=\frac{s}{0.829+0.676s}P_u$
An 和 Cederwall ^[16]	$P=\frac{2.24(s-0.058)}{1+1.98(s-0.058)}P_u$

考虑到以上本构曲线均与试验有差距, 其中学者 An 和 Cederwall 提出的曲线模型与试验结果最为接近, 因此采用 An 和 Cederwall 本构模型的基础形式并进行修正, 得到 GPC 中栓钉的荷载-滑移本构关系如式(3)所示。从图 7 可见, 修正后的本构曲线与试验实测荷载-滑移曲线较为吻合, 故本文修正的公式可以更好地模拟钢-GPC 栓钉连接界面荷载-滑移本构。

$$P=\frac{4.44(s-0.13)}{1+4.3(s-0.05)}P_u\tag{3}$$

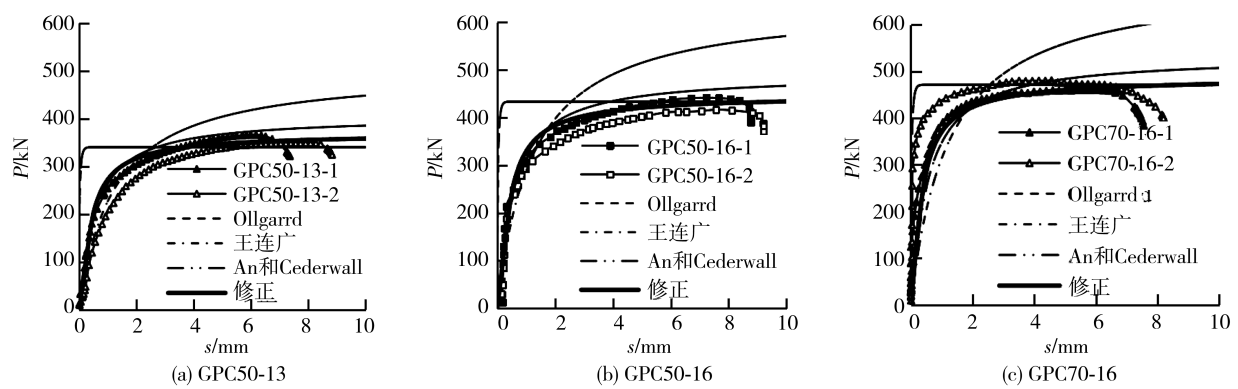


图 7 公式预测与实测荷载-滑移曲线比较

Fig.7 Comparison between formula prediction and measured results of load-slip curve

4 结论

1) GPC 致密性较好,在栓钉剪断后 GPC 翼板面没有明显的裂缝,且根部下方混凝土破损区域面积更小;GPC 中栓钉表现出与普通混凝土试件相近的承载力,其刚度偏小,但延性更优。

2) 提高栓钉直径和混凝土抗压强度,可有效提高 GPC 试件的刚度和栓钉抗剪承载力,但随着 GPC 抗压强度的提高,试件延性降低。

3) 基于实测抗剪承载力和荷载-滑移曲线,提出钢-GPC 中栓钉的抗剪承载力计算公式以及界面黏结-滑移本构模型。

参考文献:

[1] NOUSHINI A, ASLANI F, CASTEL A, et al. Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 136-146.

[2] SYAHYADI R, FAUZI A, MAJUAR E, et al. Brief review of geopolymer binder[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 242-263.

[3] 丁发兴,倪鸣,龚永智,等. 栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 98-106.

[4] LIU L, ZHANG L, ZHU L, et al. Study on mechanical properties of stud connectors in steel-lightweight aggregate concrete composite structures[J]. Structures, 2023, 47: 1072-1085.

[5] 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(2): 222-234, 243.

[6] 王飞,吴佳杰,曹贤明,等. 钢-ECC 组合桥面板中栓钉抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 757-761.

[7] HAN Q H, WANG Y H, XU J E, 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] British Standards Institution. EN 1994-1-1:2004 Design of composite steel and concrete structures; Part 1.1: General rules and rules for buildings[S]. Belgium: European Committee for Standardization, 2004.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

[10] AASHTO. AASHTO-LRFD bridge design specifications[S]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.

[11] 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.

[12] OEHLERS D J. Design and assessment of shear connectors in composite bridge beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(2): 214-224.

[13] 薛伟辰,丁敏,王骅,等. 单调荷载下栓钉连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 95-100.

[14] Ollgaard J G, Slutter R G, Fisher J W. Shear strength of stud shear connectors in lightweight and normal-weight concrete[J]. AISC Engineering Journal, 1971, 8(2): 55-64.

[15] 王连广,刘之洋,曹阅. 钢-火山渣混凝土组合梁连接件及交界面滑移分析[J]. 工业建筑, 1995(3): 18-23, 33.

[16] AN L, 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.