DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2024.06.019

文章编号:1671-2579(2024)06-0176-09

NRC-UHPC 界面抗剪性能试验研究

陈振侃¹,李军生²,时权²,方浩圳³,莫凡³,姜海波^{3*}

(1.广州交通投资集团有限公司 营运分公司,广东 广州 511430;2.广州广明高速公路有限公司,广东 广州 511430;3.广东工业大学 土木与交通工程学院,广东 广州 510006)

摘要:为了探讨植筋螺杆直径以及超高性能混凝土(UHPC)浇筑方法对普通钢筋混凝土(NRC)与UHPC间抗剪受力性能的影响,该文设计了两组共6个推出试件,并进行抗剪性能试验。试验结果表明:NRC-UHPC界面混凝土黏结力失效后,植筋螺杆仍可继续发挥抗剪作用,从而使荷载达到峰值后的试件破坏过程呈现出延性特征;对于使用直径为12 mm和16 mm螺杆的试件,随着螺杆直径的增大,试件的抗剪承载力和界面破坏时的延性均得到提升。在采用后浇UHPC层的试件(ZJ组)中,当螺杆直径为16 mm时,其破坏形态介于剪断与拔出之间。而使用高强砂浆作为填充材料的试件(GJ组)的界面,在荷载-滑移曲线上表现出的延性低于后浇UHPC试件(ZJ组)。此外,基于试验结果,对比了ACI、AASHTO和FIB规范给出的抗剪公式发现,同时考虑了剪-摩擦和销栓效应的FIB公式能较为准确地描述试件的界面抗剪承载力。因此,建议采用FBI规范来计算使用UHPC加固的植筋NRC结构的抗剪承载力。 关键词:桥梁工程;抗剪性能;推出试验;UHPC;植筋;延性

中图分类号:U444 文献标志码:A

Experimental Study on Shear Behavior between NRC-UHPC Interface

CHEN Zhenkan¹, LI Junsheng², SHI Quan², FANG Haozhen³, MO Fan³, JIANG Haibo^{3*} (1.Operating Branch, Guangzhou Communications Investment Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511430, China; 2.Guangzhou Guangming Expressway Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511430, China; 3.School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: In order to investigate the effect of the screw diameter of planted bars and ultra-high performance concrete (UHPC) pouring method on the shear behavior of normal reinforced concrete (NRC) and UHPC, two groups of six push-out specimens were designed for shear behavior tests. The results show that after the failure of the concrete bonding force in the NRC-UHPC interface, the screw can maintain shear behavior so that the failure process of the specimen after the load reaches the peak shows ductile characteristics. For specimens with screw diameters of 12 mm and 16 mm, greater screw diameter indicates higher shear capacity of the specimens and ductility after interface failure. When the screw diameter is 16 mm, the specimens in Group ZJ using the post-pouring UHPC layer fail in a mode of partial shearing off and partial pulling out. The ductility at the interface of the specimens in Group GJ using high-strength mortar as filling material is lower than that of the specimens in Group ZJ using the post-pouring UHPC layer formulas of ACI, AASHTO, and FIB specifications are compared. The FIB formula, which considers both the shear friction and the bolt pin effect, can accurately describe the interfacial shear capacity of the specimens. Therefore, it is recommended to use the FBI specification to calculate the shear capacity of NRC structures reinforced with UHPC.

Keywords: bridge engineering; shear behavior; push-out test; UHPC; planted bar; ductility

收稿日期:2023-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778150);广州交通投资集团有限公司科技项目(编号:YXGL211GZ1890) 作者简介:陈振侃,男,工程师.E-mail:37914019@qq.com

^{*}通信作者:姜海波,男,博士,教授.E-mail:hbjiang@gdut.edu.cn

0 引言

由于建设时间较早、投入使用时间较长,加上历 史局限性的设计缺陷、自然灾害以及人为因素等影 响,中国境内的危桥数量日益增多。许多旧桥因混 凝土开裂、剥落等问题导致结构承载力下降,采用合 适的方法对这些旧桥进行加固修复,不仅能避免桥 梁拆除所带来的种种不便,还能因其实施的低碳行 为而取得良好的社会与经济效益^[1-2]。

现有加固钢筋混凝土结构的方法包括预应力加 固法、复合材料粘贴加固法、粘贴钢板加固法、植筋 加固法和增大截面加固法等,学界已对这些加固方 法的优缺点进行了大量研究^[3-8]。在增大截面法中, 使用普通混凝土作为加固材料时,因混凝土层厚度 大及配筋等需求,会增加桥梁的负担;而采用UHPC 材料进行增大截面加固时,则能凭借其超高的抗压、 抗拉强度,优异耐久度与抗渗性,以及加入纤维后展 现出的良好韧性[9-11],实现减轻自重与部分配筋的效 果,相较于传统方式,加固效果更佳且更经济。因此, UHPC开始在国内外桥面板及梁体的加固维护工程 中得到应用^[12-15]。对于采用UHPC加固的结构,首要 解决的问题是确保 UHPC 与普通钢筋混凝土(NRC) 之间具有足够的界面黏结强度,以使结构在承受荷载 时,界面两侧的混凝土能够共同受力,从而达到理想 的加固效果^[16]。为此,近年来国内外学者已进行了大 量关于UHPC与NRC界面黏结性能的试验研究。

Carbonell Muñoz 等^[17]通过对普通混凝土(NC) 立方块界面进行凿毛处理后浇筑UHPC,测得 UHPC与NC界面的抗拉强度可达NC抗拉强度的 1.2~2.9倍;Hussein等^[18]在界面不同粗糙程度的NC 试件上浇筑UHPC,并进行直拉和斜剪试验,得出可 用于其所提计算公式中描述界面黏结强度的摩擦系 数;Jiang等^[19-20]通过对NRC端部进行不同界面处理 或键齿布置的"Z"字形试件进行单剪试验,得出用于 计算UHPC-NRC界面直剪强度的公式;张阳等^[21]通 过推出试验,得出不同界面处理方式下使用UHPC 加固的试件与同等级普通混凝土抗剪强度的比值。 上述试验均表明:UHPC与NC黏结效果优于NC本 身。然而,现有文献大多聚焦于UHPC和普通混凝 土两种材料经不同处理方式处理后的界面间黏结强 度,但工程实际中多采用界面结合植筋的方式进行 加固。因此,有必要对使用 UHPC 加固的植筋 NRC 结构界面的受力性能进行深入研究。

本研究设计了两组试件:① 后浇UHPC加固层的ZJ组试件;② 先预制UHPC再在UHPC与NRC基体间填充高强砂浆的GJ组试件。通过这两组试件,研究螺杆直径、不同浇筑方式对加固后的NRC基体抗剪承载力以及界面破坏时结构延性的影响,确定影响界面连接性能的关键因素,并校验现有公式的适用性。为使用UHPC结合螺杆植筋进行NRC结构加固的工程提供参考。

1 试验准备

1.1 推出试验

本试验共设计两组试件,每组3个试件。试件尺 寸与钢筋布置图见图1,试件的命名与参数见表1。 其中,试件命名方式为"制作方式+螺杆直径",如 "ZJ-12"表示使用直径为12 mm螺杆进行植筋并采用 后浇UHPC层的试件,"GJ-12"表示使用直径为12 mm螺杆进行植筋,先预制UHPC层并在UHPC与 NRC基体间填充高强砂浆的试件。另外,分别采用 直径为12 mm和25 mm的HRB425钢筋作为NRC 基体的箍筋和主筋,采用直径分别为12~16 mm的镀 锌螺杆作为界面抗剪连接件。其中,抗剪连接件参 照某采用直径为12 mm的带肋钢筋对旧梁进行贯穿 植筋处理的增大截面加固法工程实例,又考虑本试 验的加固层较薄且GJ组试件预制UHPC层装配问 题,采用可以安装螺母的螺杆进行植筋以增大该抗 剪连接件的抗拔能力。

试件制作过程如图2所示。先进行普通混凝土 结构部分浇筑,并在龄期为3d时进行凿毛,随后浇 筑 ZJ组试件的UHPC层以及GJ组试件的预制 UHPC层,浇筑次日脱模并使用温度超过80℃的热 水养护。当UHPC龄期为3d时,浇筑GJ组试件的 高强砂浆层,养护至高强砂浆龄期为28d时对试件 进行加载。另外,为了保证足够的锚固强度,在浇筑 ZJ试件组UHPC层前先将螺杆的螺母与垫片固定于 螺杆的末端[图2(b)]。3种材料的配合比如表2所 示,其中UHPC和高强砂浆所用水泥为P•II 52.5R水 泥,C50所用水泥为P•II 42.5R。采用带端钩形钢纤 维,直径0.22 mm,长13 mm,抗拉强度2600 MPa。 高强砂浆为基于UHPC配比的基础上优化细骨料比例



图1 推出试件尺寸与配筋图(单位:mm)



		表1 推	出试件参	数			
	Table	1 Parameters	s of push	-out specimens			
编号	螺杆直 径/mm	螺杆位置	UHPC 浇筑方式	界面处理方式			
ZJ-12	12						
ZJ-14	14	UHPC保护层	后浇	普通凿毛,暴露			
ZJ-16	16	厚度 20 mm		NRC粗骨料			
GJ-12	12	Hart Hard Data		普通凿毛,暴露NRC粗骨			
GJ-14	14	際什超出 UHPC 早 50 mm	预制	料,并在UHPC和NRC			
GJ-16	16	云 30 mm		之间填充高强砂浆			

得到,所用细骨料中粒径介于0.6 mm和0.3 mm的石英砂占比30%,粒径小于0.3 mm的石英砂占比70%。

1.2 材料基本力学性能

在试件加载当天(高强砂浆龄期为28d时),根

据相关规范^[22-24]对试件中所用3种混凝土进行立方体轴心抗压强度、圆柱体劈裂强度以及圆柱体弹 性模量等力学性能试验,结果如表3所示。根据厂家 所提供的报告,HRB 400 钢筋的弹性模量为1.98× 10⁴ MPa, 屈服强度 460.85 MPa, 极限抗拉强度 579.44 MPa;螺杆的弹性模量为2.02×10⁴ MPa, 屈服 强度 680.48 MPa, 极限抗拉强度 732.33 MPa。

1.3 加载设备及加载方案

加载设备如图 3 所示。采用 100 t 压力机进行加载,试验中在加固界面的中间位置放 4 个量程为 50 mm的位移计采集试验过程中界面的相对滑移,试验过程中荷载与位移计读数均由采集仪采集得到。试验开始时,先对构件施加 50 kN的荷载,然后卸载至 0 并开始正式逐级加载,每级加载 20 kN 直至构件破坏。



(a) 试件制作流程

(b) NRC 基体界面处理

图 2 试件制作流程与界面处理细节图

Figure 2 Fabrication procedure of specimens and interface processing details

表2 3种混凝土材料配合比

	Table 2	Mix pr	oportions of th	ree kinds	of concret	e mate	erials	kg/m^3	
混凝土类型	水泥	微硅粉	纳米碳酸钙	粗骨料	细骨料	水	减水剂	钢纤维	
UHPC	828	214	33	_	1 024	192	28	156	
高强砂浆	828	214	33	—	1 024	192	28	—	
C 50	408			1 1 2 4	663	200			

表 3 3 种混凝土的材料力学性能试验结果

 Table 3
 Mechanical properties of three kinds of

混凝土种类	轴心抗压 强度/MPa	圆柱体劈裂 强度/MPa	裂 弹性模量/ Pa (10 ⁴ MPa)		
C50	52.34	2.41	3.46		
UHPC	138.28	10.77	4.37		
高强砂浆	103.55	4.03	3.42		





2 试验结果

2.1 荷载-滑移曲线

试件加载过程中界面的相对滑移量采用位移计 的平均值,图4为两组试件的荷载-滑移曲线。结合 图4与加载过程现象可知:除试件GJ-14外,两组试件 均经历了"荷载达到第一峰值(P₁)、一边界面开裂破



Figure 4 Load-slip curves of push-out specimens

坏→承载能力骤降→荷载达到第二峰值(P₂)、另一边 界面开裂破坏→承载能力骤降→两边界面完全破 坏,螺杆剪断"的过程。出现两个峰值的原因是试件 两侧的NRC-UHPC界面并未在加载中同时破坏,而 是随荷载施加一侧界面先破坏,此时荷载到达第一 峰值但本阶段所有试件在加载过程中均未观察到 UHPC层的剥离现象,界面处也未出现可见裂缝;在 随后的继续加荷过程中另一侧界面也发生破坏,此 时荷载达到第二峰值。

ZJ组试件的荷载-滑移曲线发展趋势十分相似, 以试件 ZJ-16 为例,荷载在达到第二峰值前,先经历 了一个线性阶段,线性阶段结束时,荷载约为0.65P; 随后进入非线性阶段与下降阶段。试件ZJ-12、ZJ-14 和ZJ-16在荷载达到第二峰值 P_2 时,与第一峰值 P_1 的 比值分别为0.93、0.98和0.99,对应滑移值分别为 0.99 mm、1.54 mm 和 3.36 mm;表明相较于第一峰 值,螺杆直径的增大提高了ZJ组试件的第二峰值及 其对应延性。对于GJ组试件,试件GJ-12达到第一 峰值后滑移并未变化,当荷载达到第二峰值时,两个 峰值荷载与滑移均相同,随后进入下降段;试件 GJ-14 在达到峰值荷载时,两边界面同时被剪坏,随 即进入下降段;而试件GJ-16在达到第一峰值前,荷 载达到1000 kN后,由于灌浆层高强砂浆的开裂,曲 线斜率变大,且与其他试件不同,其第二峰值仅为 0.59P1。这可能是因为该试件所承受的荷载较大,荷 载达到第一峰值时,另外一边的界面虽未有可见裂 缝但已轻微损坏。

2.2 螺杆直径的影响

ZJ组试件和GJ组试件的荷载-滑移曲线对比如 图 5 所示。试件的第一峰值、第一峰值对应界面抗 剪强度、第二峰值以及第一、二峰值对应的滑移汇总 如表 4 所示,其中峰值对应界面抗剪强度由公式 τ= *P*/(2*ab*)求得,式中:*a* 为界面的长,*a*=600 mm;*b* 为 界面的宽,*b*=350 mm。

由图5及表4可知:两组试件中使用直径为 16 mm 螺杆的试件所测得的抗剪承载力与使用直径 为12 mm 螺杆的试件相比均有所增大(由于试件 ZJ-14与GJ-14测得的较小的峰值,在本节及章节3中 分析各因素对试件峰值影响时忽略这两个试件),表 明螺杆直径的增大可以提高试件的抗剪承载能力。 对于ZJ组,试件ZJ-16在加载过程中表现出了良好的 延性,其第二峰值对应滑移相较于试件ZJ-12和试件 ZJ-14分别提升了239.4%和118.2%。GJ组试件在 荷载达到第二峰值时的延性较ZJ组试件低得多,但 螺杆直径增大后相应滑移能力却提高了333.3%。此 外,所有试件在两个界面完全破坏后,由于螺杆的存



(c) 试件 ZJ-16 和 GJ-16

图5 不同制作方式荷载-滑移曲线对比

Figure 5 Comparison of load-slip curves with different fabrication methods

表4 推出试验结果

Table 4	Experimental	results of	push-out	test

试件	P ₁ / kN	P ₁ 对应界 面抗剪强 度/MPa	P ₁ 对应滑 移/mm	P ₂ / kN	P ₂ 对应 滑移/mm
ZJ-12	920.17	2.19	0.02	910.62	0.99
ZJ-14	749.10	1.78	0.07	737.69	1.54
ZJ-16	1 048.07	2.50	0	975.53	3.36
GJ-12	838.08	2.00	0.09	838.08	0.09
GJ-14	654.81	1.56	0.07	_	—
GJ-16	1 204.20	2.87	0.16	713.99	0.39

在且尚未被剪断,试件仍存在一定的承载力,并未表 现出脆性破坏的现象。在其中一边的螺杆剪断时, 相对滑移超过10mm(图4中未给出)。产生这一现 象是因为对NRC基体进行植筋后,直剪试验过程中 由界面和螺杆共同受力,且NRC基体与加固UHPC 层之间的螺杆的连接件具有较好的延性,在界面完 全破坏后仍能继续受力而使得加固构件的延性得到 较大提升,而不是因界面被剪坏而直接丧失承载力。 上述分析表明:螺杆的存在,不仅可以改善试件在界 面破坏后的受力模式,螺杆直径的增大,也可以提高 试件界面的抗剪承载力以及界面破坏时的滑移能 力。另外值得一提的是,尽管在试验前已将螺帽与 垫片固定于螺杆端部以增大螺杆在UHPC薄层中的 抗拉拔能力,试验结束后仍发现ZJ-16螺杆顶部介于 剪断与被拔出之间的状态[图6(c)]。

2.3 浇筑方法的影响

对于使用螺杆直径为12 mm的试件,在预制 UHPC 层与 NRC 基体之间填充高强砂浆的试件 GJ-12相较于使用后浇的UHPC层的试件ZJ-12,其第 一峰值P1与P1对应界面峰值抗剪强度分别下降了8.9% 和8.7%,两边界面均破坏时试件GJ-12界面滑移仅不到 0.1 mm。与使用直径为12 mm螺杆的两个试件类 似,虽然试件GJ-14的荷载-滑移曲线仅有一个峰值, 但其破坏时界面滑移不到0.1 mm,峰值与试件ZJ-14 的差值也为接近10%,而对于使用螺杆直径为16mm 的试件,试件ZJ-16与试件GJ-16相比同样表现出更 高的第二峰值与更好的延性,但试件GJ-16的第一峰 值P1和P1对应界面峰值抗剪强度与试件ZJ-16相比 分别提高了14.9%和14.8%。试验结果表明:与后浇 UHPC层相比,先预制UHPC层后在其与NRC基体 间填充高强砂浆的方法在使用直径较大螺杆时可以 有效提高试件的承载能力及刚度,但是试件相应的 滑移能力则呈现相反的趋势,GJ-12和GJ-16第二峰 值对应的滑移与ZJ-12和ZJ-16对应滑移比值均约为 10%。此外,使用直径为12 mm的螺杆时该方法起 到了负面效果。这可能是由于峰值过后,使用后浇 UHPC的试件在界面破坏后UHPC与螺杆依旧紧密 连接形成约束,螺杆依旧处于三向受力状态;而GJ组 试件在加载过程中填充层高强砂浆的劈裂与界面滑 移使得界面处螺杆下侧砂浆与螺杆分离 [图 6(f)],从 而导致使用高强砂浆作为填充材料的试件的界面滑

移能力较差。此外,两种浇筑方法制作的试件除了 在加载过程中表现出较大区别,在图6的各试件破坏 模式中也可观察到,ZJ组各试件最终沿着UHPC和 NRC基体之间的界面接缝破坏,而对于GJ组试件, 在靠近加载面的位置其破坏面发生在砂浆层和NRC 基体之间的界面接缝,但在远离加载面的螺栓位置 剪力的传递路径出现偏角,破坏面转移到砂浆层和 UHPC 层的界面接缝,砂浆层较弱的抗劈裂能力也 导致了GJ组试件较低的抗滑移能力。







(f) GJ-16

(d) GJ-12

图6 各试件破坏模式

Figure 6 Failure modes of push-out specimens

现有规范界面抗剪承载力计算结果 3 比较

3.1 不同规范界面抗剪承载力计算结果

根据ACI 318-19 (2017)^[25] 第 22.9.4 节 "Nominal Shear Strength"规定,基于剪-摩擦理论,对于使用钢 筋等作为抗剪连接件且其垂直于剪切面的情况,界 面的名义抗剪强度应按照公式(1)计算:

$$V_{\rm n} = \mu A_{\rm vf} f_{\rm y} \tag{1}$$

式中:µ为摩擦系数,对于在原结构上整体植筋、凿毛 并后浇混凝土情况,取1.4;Ayr为剪切界面中抗剪连 接件的横截面面积;f,为抗剪连接件的屈服强度。

规范 AASHTO(2017)^[26]第 5.7.4.3 节"Interface Shear Resistance"所提公式同时考虑了混凝土界面与 抗剪连接件由剪-摩擦效应提供的抗剪承载力,其所 提界面的名义抗剪强度应按照公式(2)计算:

$$V_{\rm p} = cA_{\rm cv} + \mu (A_{\rm vf} f_{\rm v} + P_{\rm c}) \tag{2}$$

式中:c为混凝土界面系数,对于在原结构上整体植筋、凿毛并后浇混凝土的情况取2.80 MPa;Aev为剪切界面面积;µ、Avt和fy取值同公式(1);Pe为水平约束力,本试验中试件组GJ仅将螺母固定于UHPC表面,故取0。

与规范 AASHTO 2017^[26]类似,规范 Fib Model Code for Concrete Structures $(2013)^{[27]}$ 在 6.3节"Concrete to Concrete"中同时考虑了剪-摩擦理论提供的 承载力,但是此规范还按销栓效应计算了抗剪连接 件对结构承载力的贡献,其所提界面的名义抗剪强 度 τ_u 及名义剪切力 V_u 应按照公式(3)、(4)计算:

$$\tau_{\mathrm{u}} = \tau_{\mathrm{a}} + \mu(\sigma_{\mathrm{n}} + K_{\mathrm{1}}\rho f_{\mathrm{y}}) + K_{\mathrm{2}}\rho \sqrt{f_{\mathrm{y}}f_{\mathrm{cc}}} \qquad (3)$$

$$V_{\rm u} = \tau_{\rm u} A_{\rm c} \tag{4}$$

式中: τ_a 为界面两侧黏结力提供的抗剪强度,根据文 献[28], $\tau_a = \beta \tau_c A_c$,当界面为UHPC-NRC时 $\beta =$ 0.454,当界面为高强砂浆-NRC时 $\beta =$ 0.483, $\tau_c =$ 0.75($f_{cel}f_c$)^{0.5}, f_{cel} 为C50圆柱体轴心抗压强度, f_{cel} 为C50圆柱体劈裂强度, A_c 为剪切界面面积; μ 为摩擦 系数,根据文献[28]取值为1.385; σ_a 为界面水平压应 力,本试验中取0;系数 $K_1 = 0.5$; ρ 为剪切界面抗剪连 接件配筋率($\rho = A_s/A_c$, A_s 为抗剪连接件面积, A_c 为剪 切界面面积);根据文献[28],系数 $K_2 = 0.9$; f_y 为抗剪 连接件的屈服强度, f_{ce} 为NRC结构混凝土的圆柱体 轴心抗压强度。

3.2 公式计算结果对比

将试验中各数据代入上述公式中可得本试验中 各试件的抗剪承载能力理论计算值,其与实际测得 的极限抗剪承载能力比值如表5所示。

Та	ble 5	Comparison	is between	experiment	tal results	and theore	etical r	esults	
		//h /1	TT /1 NT		抗剪承载力/kN		计算值/试验值		
规氾	试件	$\neq V_{cc}/kN$	$V_{\rm bc}/{\rm kN}$	V _b /klN	计算值	试验值	比值	平均值	方差
	ZJ-12	_	107.69	_	107.69	920.17	0.12		0.04
ACI	ZJ-14	—	146.58	—	146.58	749.10	0.20		
	ZJ-16	_	191.45	—	191.45	1 048.07	0.18		
	GJ-12	—	107.69	—	107.69	838.08	0.13	0.17	
	GJ-14	—	146.58	—	146.58	654.81	0.22		
	GJ-16	—	191.45	—	191.45	1 204.20	0.16		
	ZJ-12	588.00	107.61	_	695.61	920.17	0.76	0.85	0.16
	ZJ-14	588.00	146.47	—	734.47	749.10	0.98		
	ZJ-16	588.00	191.31	—	779.31	1 048.07	0.74		
AASHTO	GJ-12	588.00	107.61	—	695.61	838.08	0.83		
	GJ-14	588.00	146.47	—	734.47	654.81	1.12		
	GJ-16	588.00	191.31	—	779.31	1 204.20	0.65		
	ZJ-12	676.87	120.66	34.33	831.859	920.17	0.90	1.05	
	ZJ-14	676.87	164.23	46.73	887.828	749.10	1.19		
FIB	ZJ-16	676.87	214.50	61.04	952.407	1 048.07	0.91		0.90
	GJ-12	720.11	120.66	34.33	875.096	838.08	1.04		0.20
	GJ-14	720.11	164.23	46.73	931.064	654.81	1.42		
	GJ-16	720.11	214.50	61.04	995.643	1 204.20	0.83		

表5 试验值与理论计算值比较

注: Vee为由界面两侧混凝土黏结力提供的抗剪承载力; Vbe为由螺杆的剪-摩擦效应提供的抗剪承载力; Vb为由螺杆与混凝土的销栓效应提供的抗剪承载力。

由表5可知:对于本试验试件抗剪承载力,ACI 与AASHTO规范给出的公式计算结果与试验结果 平均比值分别为0.17和0.85,而FIB规范给出的模型 比值为1.05,虽然其也得出最大的方差,但也仅为 0.20。表明对于本试验研究的试件,FIB规范的模型 所预测的值最为准确,而ACI和AASHTO规范所提 供公式的预测值则相对保守。这是由于虽然三者都 基于剪-摩擦机理,但ACI规范的公式主要考虑了抗 剪连接件剪-摩擦效应的贡献;AASHTO公式在考 虑抗剪连接件的贡献基础上,还考虑了混凝土间黏 结力的影响;FIB同时考虑了混凝土界面和抗剪连接 件的剪-摩擦效应以及抗剪连接件的销栓作用。综 合试验值与规范预测值,建议设计采用FIB规范计算 使用UHPC加固的植筋NRC结构抗剪承载力。

4 结论

本文通过研究使用UHPC加固的钢筋混凝土结构界面抗剪性能,结合不同制作方式与螺杆直径试件的试验结果并与现有规范公式进行比较分析,得出以下结论:

(1)螺杆的存在可以改善试件在界面破坏后的 受力模式,试件的极限抗剪承载力与界面破坏时的 滑移能力总体趋势与螺杆直径呈正相关。

(2) 对于后浇 UHPC 的情况,当加固层厚度为 50 mm 时应采用直径小于16 mm 的螺杆进行植筋以 充分发挥其抗剪作用;对于预制加固层并采用灌浆 制作工艺的情况,试件具有极限抗剪承载能力离差 大且抗滑移能力较差的特点。

(3)对ACI、AASHTO及FIB规范中植筋新旧 混凝土界面抗剪承载力计算公式进行计算比较,ACI 和AASHTO公式对于界面的抗剪承载力计算偏向 保守,同时考虑了剪-摩擦效应与销栓效应的FIB规 范计算值与试验值吻合较好,建议采用此规范或其 公式计算方式计算使用UHPC加固的植筋NRC结 构的抗剪承载力。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述・2014[J].中国公路学报,2014,27(5):1-96.
 Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014[J]. China Journal of Highway and Transport,2014,27(5): 1-96.
- [2] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述・ 2021[J].中国公路学报,2021,34(2): 1-97.

Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(2):1-97.

- [3] 夏凯,张万国.旧桥桥梁粘贴钢板加固技术的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(6):66-68.
 XIA Kai, ZHANG Wanguo. Application of strengthening technology of old bridges by sticking steel plates[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition),2019,15(6): 66-68.
- [4] 胡承泽,宋重阳.体外预应力在某鱼腹式箱梁桥加固中的应用与研究[J].中外公路,2022,42(4):113-117.
 HU Chengze, SONG Chongyang. Application and research of external prestress in strengthening of a fishbelly box girder bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(4):113-117.
- [5] 王小威.复合机械锚固下 FRP加固钢筋混凝土梁弯剪性 能研究[D].深圳:深圳大学,2019.
 WANG Xiaowei. Research on bending and shearing behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP under composite mechanical anchoring[D].Shenzhen:
- [6] 王伟.增大截面加固构件长期性能试验研究[D].重庆: 重庆交通大学,2017.

Shenzhen University,2019.

WANG Wei. Experimental study on long-term performance of reinforced section reinforcement[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2017.

- [7] 施明峰.不同参数下预应力钢绞线加固 RC 梁疲劳性能和破坏机制研究[D].泉州:华侨大学,2019.
 SHI Mingfeng. Experimental study on fatigue behavior and failure mode of RC beams strengthened with prestressed steel wire under different parameters[D].
 Quanzhou: Huaqiao University,2019.
- [8] 郭福宽,周尚猛.典型正交异性桥面板病害分析与加固 技术研究[J].中外公路,2023,43(3):134-138.
 GUO Fukuan, ZHOU Shangmeng. Research of disease analysis and reinforcement technology for typical orthotropic bridge deck[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(3):134-138.
- [9] JIANG H B,HU Z B,FENG J H,et al.Flexural behavior of UHPC-filled longitudinal connections with non-contacting lap-spliced reinforcements for narrow joint width[J]. Structures,2022,39: 620-636.
- [10] FANG H Z, GU M G, ZHANG S F, et al. Effects of steel fiber and specimen geometric dimensions on the mechanical properties of ultra-high-performance concrete [J].Materials,2022,15(9): 3027.

- [11] 张杰,蔺鹏臻.UHPC加固钢筋混凝土简支梁后可靠度分析[J].中外公路,2023,43(5):72-77.
 ZHANG Jie, LIN Pengzhen. Reliability analysis of RC simply supported beams strengthened by UHPC[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(5):72-77.
- [12] ZMETRA K M, MCMULLEN K F, ZAGHI A E, et al. Experimental study of UHPC repair for corrosiondamaged steel girder ends[J]. Journal of Bridge Engineering,2017,22(8): 04017037.
- [13] 刘超,马汝杰,王俊颜,等.超高性能混凝土薄层加固法在 槽形梁桥中的应用[J].桥梁建设,2017,47(5): 112-116.
 LIU Chao, MA Rujie, WANG Junyan, et al. Application of reinforcement method of UHPC thin layers to trough beam bridges[J].Bridge Construction,2017,47(5): 112-116.
- [14] 邵旭东,邱明红,晏班夫,等.超高性能混凝土在国内外桥梁工 程中的研究与应用进展[J].材料导报,2017,31(23): 33-43.
 SHAO Xudong,QIU Minghong,YAN Banfu,et al.A review on the research and application of ultra-high performance concrete in bridge engineering around the world[J].
 Materials Reports,2017,31(23): 33-43.
- [15] 龙屹宇,陈双庆,唐春燕,等.基于断裂力学的UHPC加固 钢桥面板性能分析[J].中外公路,2023,43(4):170-175.
 LONG Yiyu, CHEN Shuangqing, TANG Chunyan, et al. Performance analysis of steel bridge deck reinforced by UHPC based on fracture mechanics[J].Journal of China & Foreign Highway,2023,43(4):170-175.
- [16] 孙航行,周建庭,徐安祺,等.UHPC加固技术在桥梁工程中的研究进展[J].混凝土,2020(1): 136-143.
 SUN Hangxing, ZHOU Jianting, XU Anqi, et al. Research progress of UHPC reinforcement technology in bridge engineering[J].Concrete,2020(1): 136-143.
- [17] CARBONELL MUÑOZ M A,HARRIS D K,AHLBORN T M, et al. Bond performance between ultrahighperformance concrete and normal-strength concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(8): 04014031.
- [18] HUSSEIN H H, WALSH K K, SARGAND S M, et al. Interfacial properties of ultrahigh-performance concrete and high-strength concrete bridge connections[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 1-10.
- [19] JIANG H B, HUANG C W, FENG J H, et al. Direct shear behavior of castellated dry RPC joints in precast concrete segmental bridges[J].Structures, 2021, 33: 4579-4595.
- [20] 姜海波,方鑫,郭文华.桥梁加固中沟槽植筋新旧混凝土 界面抗剪性能试验研究[J].公路交通科技,2016,33(6):

68-75.

JIANG Haibo, FANG Xin, GUO Wenhua. Experimental sudy on shear behavior of grooved interface between newly poured and existing concrete with reinforcement in bridge rehabilitation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2016,33(6):68-75.

- [21] 张阳,王兴旺.UHPC加固RC结构交界面抗剪性能试验研究[J].中外公路,2017,37(2):105-111.
 ZHANG Yang, WANG Xingwang. Experimental study on shear behavior of RC structure interface strengthened by UHPC[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (2):105-111.
- [22] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002
 [S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
 Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of

China. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2003.

- [23] ASTM International. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C496/C496M-11[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2011.
- [24] ASTM International. Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression:ASTM C469/C469M-14[S].West Conshohocken, PA,USA: ASTM International, 2014.
- [25] American Concrete Institute. Building code requirement for structural concrete and commentary: ACI318-19[S]. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute (ACI),2019: 431-434.
- [26] AASHTO. Bridge design specifications, 8th edn[S].
 Washington, D. C., USA: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2017: 78-79.
- [27] International Federation for Structural Concrete.Fib model code for concrete structures 2010[S]. Berlin, Germany: International Federation for Structural Concrete (FIB), 2013:176-185.
- [28] ZHANG Y, ZHU P, WANG X W, et al. Shear properties of the interface between ultra-high performance concrete and normal strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118455.