

UHPC-普通混凝土的界面抗剪性能试验研究

范科玮

[上海浦东路桥(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要:近年来UHPC-普通混凝土组合铺装体系应用得越来越多,然而关于UHPC与普通混凝土间界面抗剪性能的专项研究成果与应用实践并不多。以沪南公路(闸航公路—G1503)改建工程新建申江南路跨线桥为载体,通过斜剪试验和弯拉试验,对比研究采用了凿毛、刻槽、光滑和植筋等措施处理的UHPC-普通混凝土界面抗剪性能。研究表明:相比光滑界面,凿毛、刻槽和植筋等措施均能大幅度提升界面的抗剪性能,且凿毛试件的斜剪破坏和弯拉破坏符合设计要求,工程操作简单、便捷。

关键词: UHPC;混凝土;抗剪;凿毛;斜剪;弯拉

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0342-04

Experimental Study on Interface Shear Resistance Performance of UHPC - Ordinary Concrete

FAN Kewei

[Shanghai Pudong Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: In recent years, the application of UHPC - ordinary concrete composite pavement system has been increasing. However, there are not many special research results and application practices in the interface shear resistance performance between UHPC and ordinary concrete. Taking the new built South Shenjiang Road Overpass in the Hunan Highway (Zhahang Highway — G1503) Reconstruction Project as the carrier, the interface shear resistance performances of UHPC - ordinary concrete treated by the measures of roughening, grooving, smoothing and reinforcement planting are compared and studied through the oblique shear tests and bending tensile tests. The research results indicate that compared with the smooth interfaces, the measures of roughening, grooving and planting reinforcement can significantly improve the interface shear performance, and the oblique shear failure and bending tensile failure of chiseled specimens meet the design requirements. The engineering operation is simple and convenient.

Keywords: UHPC; concrete; shear resistance; roughening; oblique shear; bending tensile

0 引言

近年来,UHPC-普通混凝土组合铺装结构因其高强度、稳定性好、耐久、施工方便等特点^[1-6]而备受工程界青睐,不少从业者研究其抗剪、抗弯、冲切等性能^[7-10]。在各项性能中,少数研究人员对UHPC-普通混凝土的抗剪性能进行了研究,程文强等人^[11]研究栓钉连接对预制UHPC-现浇普通混凝土抗剪性能的影响,发现20 mm栓钉使得组合试件的抗剪强度和抗剪刚度达到最大,是光滑界面的4.16倍。吴奇泽^[12]采用于界面植筋方式,进行了UHPC-普通混凝土的粘结界面30°斜剪和Z形直剪试验,试验结果表

明采用凿毛+开槽处理可以获得更大的界面粘结强度。谢剑等人^[13]基于所收集的521组试验数据,通过理论分析与数据拟合提出了UHPC-普通混凝土界面抗剪强度的计算方法。张阳等人^[14]开展7组抗剪试验,进一步证实UHPC-混凝土优异的抗剪粘结性。吕昭旭等人^[15]设计与制作27组试件,研究早强自密实补偿收缩高性能混凝土和普通混凝土的界面粘结性能。黄荆等人^[16]运用极限平衡法以及分项叠加法研究超高性能混凝土-窄幅钢箱组合梁结构抗剪承载力计算方法。谢剑等人^[17]在广泛搜集国内外文献中相关试验数据基础上,建立包含521组试验数据的UHPC-NC界面抗剪试验数据库,通过理论分析与数据拟合提出了UHPC-NC界面抗剪强度的计算方法。

尽管国内一些研究人员对UHPC-普通混凝土界面的抗剪性能进行了研究,但是总体而言,目前理论

收稿日期: 2025-01-23

作者简介: 范科玮(1990—),男,学士,工程师,从事公路、市政等工程施工与技术管理工作。

研究成果、基于理论的工程实践案例等仍然比较少。因此,课题组依托上海市沪南公路(闸航公路—G1503)改建工程,通过采取凿毛、植筋、不处理和刻槽,重点研究了UHPC-普通混凝土界面的抗剪性能,采取斜剪试验和弯拉试验测试UHPC与普通混凝土界面的粘结性能,确定可靠可行的界面处理方法,同时针对不同方式处理的界面破坏特征进行研究分析,为该项目中跨线桥主桥UHPC-混凝土的施工提供理论和技术支撑以及工程案例参考。

1 工程概况

沪南公路(闸航公路—G1503)改建工程西起闸航公路,东至G1503,全长18.7 km,规划红线宽度40 m,为城市主干路。该项目中的新建申江南路跨线桥,跨径布置为 $(6\times 35)+(40+60+40)+(5\times 35)=525\text{ m}$,桥面宽度16.5 m,双向4车道布置。为解决普通钢筋混凝土桥面板经常开裂、破损的问题,该桥采用钢-混凝土-UHPC三层组合桥面板结构代替普通混凝土桥面板,用于改善桥面板的使用状况,如图1所示。

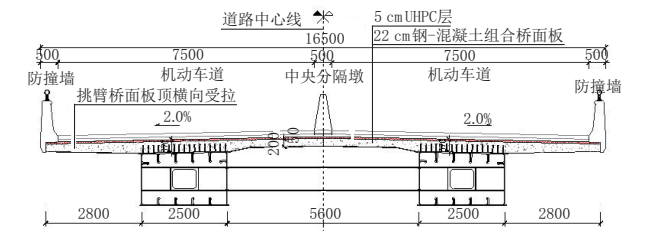


图1 负弯矩区断面图(单位:mm)

2 试件设计与制作

2.1 试件设计

界面试验试件的设计参数以及变量如表1所示,试验主要考虑了凿毛、植筋、不处理和刻槽四类界面处理方式,界面倾斜角度取60°。

表1 界面试验试件设计参数表

试件尺寸/mm	界面处理方式	界面倾斜角度/(°)
100×100×300/150×150×600	凿毛	60
100×100×300/150×150×600	植筋	60
100×100×300/150×150×600	不处理	60
100×100×300/150×150×600	刻槽	60

斜剪试验和弯拉试验试件的设计如图2和图3所示。

2.2 试件制作与加工

斜剪试验和弯拉试验试件的试块制作、模板加工、界面处理等过程如图4所示。制作与加工斜剪

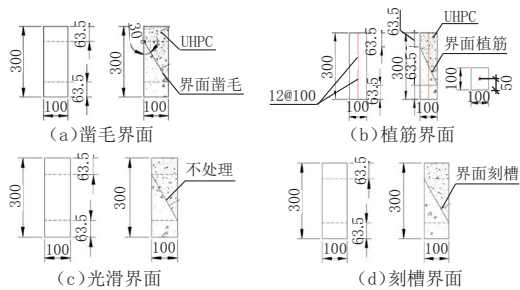


图2 斜剪试验试件设计图(单位:mm)

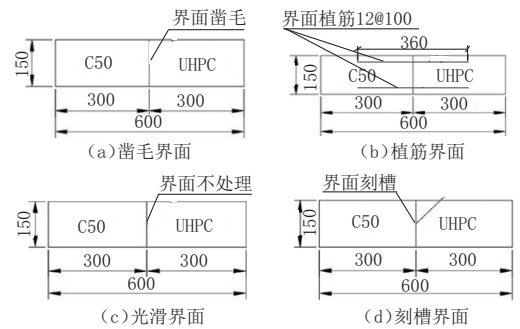


图3 弯拉试验试件设计图(单位:mm)

试验试件和弯拉试验试件各12个。

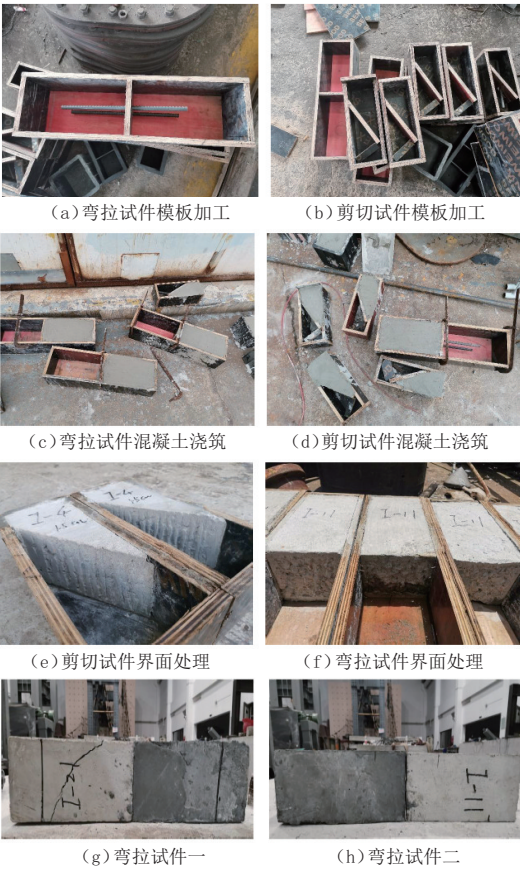


图4 界面试验试件制作与加工全过程

3 试验测试与结果

3.1 斜剪试验测试与结果

(1)测试

采用液压千斤顶对试件进行加载,开展斜剪试

验,加载千斤顶的额定吨位为 100 t,在斜剪过程中,压力传感器时时测量试验荷载值。采用单点连续加载方式进行加载,在试验开始前先进行预压,然后将荷载逐步卸载掉,直至为 0,再逐级正式加载,加载速率为 5 kN/s。

(2)现象

斜剪试件破坏现象如图 5 所示。



图 5 斜剪试件破坏现象

(3)结果

基于斜剪试验试件破坏的特征与破坏面的位置情况,可将 UHPC-普通混凝土界面破坏类型分为三类:

- a. A 类-界面完全破坏,表现为剪切破坏出现于界面粘结线上,破坏时混凝土未出现损伤或者脱落,普通混凝土和 UHPC 两种材料的表面都保持光滑或是 UHPC 表面粘结少量混凝土;
- b. B 类-界面完全破坏+混凝土轻微损伤,表现为剪切破坏出现在界面过渡区,破坏时 UHPC 表面粘结混凝土基体或骨料;
- c. C 类-界面轻微损伤+混凝土被压碎,表现为界面附近的混凝土基体被剪切破坏,UHPC-普通混凝土界面出现轻微损伤。

斜剪试验结果如表 2 所列。

表 2 斜剪试验结果

试件	峰值荷载/ kN	剪应力/ MPa	正应力/ MPa	破坏 类型	备注
I-1-F1	212.00	9.18	5.30	C	凿毛
I-1-F2	269.34	11.66	6.73	C	凿毛
I-1-F3	231.83	10.04	5.80	C	凿毛
I-2-F1	364.73	15.79	9.12	C	植筋
I-2-F2	214.05	9.27	5.35	C	植筋
I-2-F3	299.24	12.96	7.48	C	植筋
I-3-F1	151.72	6.57	3.79	A	光滑
I-3-F2	159.00	6.88	3.98	A	光滑
I-3-F3	170.00	7.36	4.25	A	光滑
I-4-F1	249.46	10.80	6.24	C	刻槽
I-4-F2	207.86	9.00	5.20	C	刻槽
I-4-F3	236.10	10.22	5.90	C	刻槽

凿毛界面和刻槽界面由于混凝土的表面粗糙度较高,导致界面之间的接触面积和摩擦阻力增加,进而提升了界面的抗剪强度;植筋界面由于界面粗糙、外露钢筋等原因,提升界面的粘结力和机械咬合力,略高于凿毛界面和刻槽界面;光滑界面由于界面未作处理,界面抗剪强度最小。

3.2 弯拉试验

(1)测试

弯拉试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[18]实施。弯拉试件的加载示意图如图 6 所示。

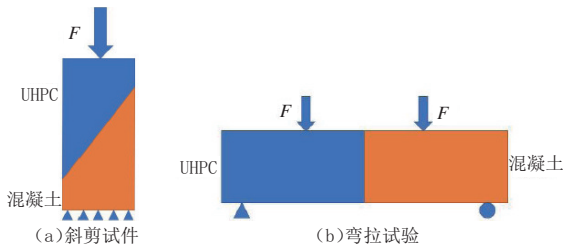


图 6 加载示意图

(2)现象

弯拉试件破坏现象如图 7 所示。

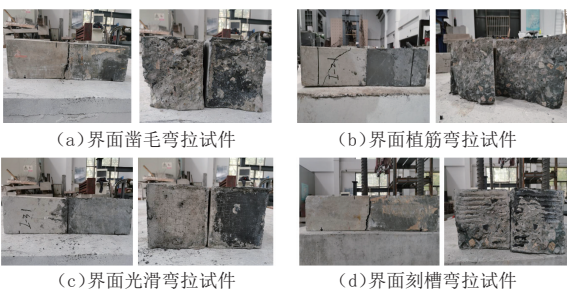


图 7 弯拉试验试件破坏现象

(3)结果

UHPC 与混凝土交界面弯拉试验的破坏现象可分为四类,Ⅰ表示 UHPC 端拉裂,Ⅱ表示交界面弯拉破坏,Ⅲ表示混凝土端拉裂,Ⅳ表示混凝土侧剪切破坏。弯拉试验结果如表 3 所列。

据表 3 可知,不同界面处理的 UHPC-普通混凝土界面弯拉强度存在一定的差异。植筋界面由于钢筋与混凝土、UHPC 的粘结作用,弯拉试件抗弯承载力明显提升,最终试件发生弯剪破坏,界面无明显损伤;光滑界面由于界面未进行任何处理,因此其界面弯拉强度最小;凿毛界面、刻槽界面由于混凝土的表面粗糙度较高,提升了界面接触面积和摩擦阻力,其界面表现出较高的弯拉强度。

刻槽界面由于刻槽间距较为稀疏(1.5 ~ 2 cm),且刻槽深度仅为 3 ~ 5 mm,故实际试验结果略低于

表 3 弯剪试验结果

试件	界面处理 方式	峰值荷载/ kN	抗弯拉强度/ MPa	破坏 类型
I-11-1	凿毛	14.12	1.93	Ⅲ
I-11-2		12.82		Ⅲ
I-11-3		16.50		Ⅲ
I-21-1	植筋	88.19	—	Ⅳ
I-22-2		104.97		
I-22-3		102.65		
I-3-F1	不处理	6.57	1.58	Ⅱ
I-3-F2		6.88		
I-3-F3		7.36		
I-4-F1	刻槽	10.80	2.23	Ⅲ
I-4-F2		9.00		
I-4-F3		10.22		

凿毛界面。由于稳定的界面是组合结构能发挥协同作用的关键,因此针对界面处理,《第二代欧洲结构设计标准》(EN 1990:2023)^[19]和《FIB 混凝土结构模型规范 2010》^[20]也给出了对应的规定(见表 4)。

表 4 界面处理相关规定

规范	界面特征	摩擦系数	粘结系数(粘结力)
欧规 2	非常光滑	0.5	0.025
	光滑	0.6	0.200
	粗糙	0.7	0.400
	非常粗糙	0.9	0.500
FIB2010	非常光滑	≤0.5	—
	光滑	0.5~0.7	—
	粗糙	0.7~1.0	(1.5, 2.5) MPa
	非常粗糙	1.0~1.4	(2.5, 3.5) MPa

根据规范可知,试验所测界面粘结力均处于较好的水平,且凿毛界面按照欧洲规范可知,属于非常粗糙界面。凿毛试件斜剪破坏和弯拉破坏现象符合设计要求。因此,考虑施工便捷和界面性能的要求,建议现场采用凿毛的方式对 UHPC-混凝土界面进行处理。

3.3 现场施工界面处理

基于前述研究成果,课题组在沪南公路(闸航公路—G1503)改建工程新建申江南路跨线桥时进行了实践,在完成混凝土施工及养护后,对其表面采用抛丸凿毛处理,现场处理如图 8 所示,凿毛深度在 1 ~ 2 cm 之间,清理干净混凝土表面的浮浆、浮沉和松软层,露出粗骨料,然后再施工 UHPC。在界面处理时间方面,应通过混凝土的抗压强度和浇筑后时间两个方面进行确定。

(1)强度

- a. 当采用人工凿毛时,混凝土强度需≥2.5 MPa;
- b. 当采用风动机、抛丸机等机械凿毛时,混凝土



(a)混凝土施工
(b)表面抛丸
图 8 普通混凝土施工与表面抛丸凿毛

强度需≥10 MPa。
(2)处理时间
混凝土终凝后 24 h 后进行凿毛。

4 结 语

上述斜剪试验和弯拉试验的结果表明:相比光滑界面,凿毛、刻槽和植筋试件界面的粘结力和机械咬合力显著增加,使其表现出较高的抗剪强度;在这几种界面处理措施中,凿毛试件的斜剪破坏和弯拉破坏符合设计要求;采用抛丸凿毛措施对沪南公路(闸航公路—G1503)改建工程新建申江南路跨线桥的混凝土铺装层进行凿毛后并浇筑 UHPC 处理,施工操作过程简便,达到设计与研究预期效果。

参考文献:

[1] 刘国光,张伟,周云岗.钢-UHPC-普通混凝土组合桥面板受力特点和不同厚度比受力特征分析[J].中国市政工程,2023(5):89-94.
[2] 王巍,马磊,黄少文,等.基于 UHPC 预制 π 梁的 UHPC-RC 组合梁设计方案及工程应用[J].城市道桥与防洪,2019(9):101-105;121.
[3] 刘君平,徐帅,陈宝春.钢-UHPC 组合梁与钢-普通混凝土组合梁抗弯性能对比试验研究[J].工程力学,2018,35(11):92-98;145.
[4] 苗新歌,袁爱民,朱文广,等.全高预制桥面板 PC 组合梁 UHPC 后浇剪力连接件剪切性能试验研究[J].工程力学,2023(40):1-13.
[5] 王德弘,沈彤,鞠彦忠,等.后浇普通混凝土与预制 UHPC 的黏结受剪性能研究[J].建筑结构学报,2020(41):411-419.
[6] 霍文斌,张阳,黄龙田,等.配筋 UHPC 湿接缝界面抗弯性能及影响因素[J].建筑材料学报,2021,24(3):525-532.
[7] 季文玉,过民龙,李旺旺.RPC-NC 组合梁界面受力性能研究[J].中国铁道科学,2016,37(1):46-52.
[8] 梁兴文,汪萍,徐明雪,等.免拆 UHPC 模板 RC 梁受弯性能试验及承载力分析[J].工程力学,2019,36(9):95-107.
[9] 周建庭,胡天祥,杨俊,等.键槽构造 UHPC-NC 界面粘结性能试验研究[J].材料导报,2021,35(16):16050-16057;16064.
[10] 王静,王洋,张云龙.UHPC-混凝土组合柱研究综述[J].四川水泥,2019(6):306.
[11] 程文强,耿健,周志杰,等.栓钉连接对预制 UHPC-现浇普通混凝土抗剪性能影响[J].低温建筑技术,2023,45(8):87-90.

(下转第 352 页)