

# 冻融循环作用下表层嵌贴 CFRP-混凝土界面 黏结性能试验研究\*

彭晖<sup>1,2†</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 付俊俊<sup>1</sup>, 苏鹏<sup>1</sup>, 刘扬<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 南方地区桥梁长期性能提升技术国家地方联合工程实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**以嵌贴 CFRP-混凝土黏结的冻融耐久性为研究对象,通过拔出试验考察了冻融循环作用下嵌贴 FRP 与具有不同强度或抗冻性能混凝土的黏结性能,讨论了冻融循环下嵌贴 FRP-混凝土界面黏结的退化机理;分析了冻融循环作用下混凝土槽至试件边缘距离、胶层厚度等因素对试件界面黏结性能的影响. 试验结果表明:冻融循环作用下普通 C30 混凝土力学性能退化显著,添加引气防冻剂和减水剂的 C30 混凝土强度下降显著小于普通 C30 混凝土,C60 混凝土强度反而有所提高;冻融循环导致了嵌贴 CFRP-普通 C30 混凝土的黏结承载力下降和破坏模式转变,但嵌贴 CFRP 与抗冻混凝土间的黏结承载力没有显著降低,表明混凝土冻融损伤是冻融循环下嵌贴 FRP-混凝土黏结退化的主要原因;槽壁厚度较小时,加载端槽壁混凝土出现锥形斜裂缝;胶层厚度较薄时,冻融循环作用下试件黏结承载力的降低较胶层较厚的试件更为显著.

**关键词:**表层嵌贴;CFRP;黏结性能;冻融循环;混凝土

**中图分类号:**TU378

**文献标志码:**A

## Experimental Study of Bond between Near-surface Mounted CFRP Strips and Concrete under Freeze-thawing Cycles

PENG Hui<sup>1,2†</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, FU Junjun<sup>1</sup>, SU Peng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Technology for Long-term Performance Enhancement of Bridges in Southern District, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The durability of the interface between NSM FRP and concrete under freeze-thawing cycles was examined. The pull-out tests were conducted to investigate the influence of freeze-thawing cycles on the bond performance between NSM FRP and concrete with normal strength, high strength, or additional frost resistance. The mechanism of the bond degradation between NSM FRP and concrete under the freeze-thawing cycles was also discussed. Moreover, the influences of the distance between concrete edge and

\* 收稿日期:2016-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578078), National Natural Science Foundation of China(51578078); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057701), Project of National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2015CB057701); 湖南省教育厅科学研究重点项目(14A005), Key Project of Science Research of Hunan Educational Committee(14A005); 长沙市科技计划项目(K1508020-31), Science Plan Project of Changsha(K1508020-31)

作者简介:彭晖(1976-),男,湖南长沙人,长沙理工大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: anchor1210@126.com

groove (edge distance) and the thickness of epoxy adhesive on the bond durability of the NSM FRP were studied. The test results show that freeze-thawing cycling resulted in the strength deterioration of ordinary concrete, while the high strength concrete and the concrete with frost resistance showed no significant deterioration under freeze-thawing cycles. Freeze-thawing cycling also caused the transformation of failure mode and the relatively significant decrease in bond capacity for specimens using ordinary concrete. Nevertheless, it had no substantial impact on the bond performance of specimens made by concrete with high strength or frost resistance. This result indicates that the bond deterioration of NSM FRP under freeze-thawing cycles was caused by low strength of concrete. Moreover, the decrease of edge distance resulted in cone-shape cracks at the loading end. When the thickness of epoxy adhesive was reduced, the bond strength degradation induced by freeze-thawing cycles was more significant compared with that of specimens with thicker epoxy adhesive.

**Key words:** near-surface mounted; CFRP; bond performance; freeze-thawing cycles; concrete

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)具有轻质、高强和耐久性好等优点,被广泛应用于土木工程结构的加固<sup>[1]</sup>.但目前应用的外贴(Externally bonded, EB) FRP方法加固混凝土结构尤其是受弯构件时,容易发生FRP与结构之间的剥离,导致加固效率降低和结构过早失效.近年来表层嵌贴(Near Surface Mounted, NSM) FRP技术逐渐得到发展,该技术将FRP嵌入预先开出的混凝土槽中,通过FRP与混凝土的三面甚至四面黏结,大幅增大两者间的黏结面积,显著提高FRP-混凝土界面的黏结承载力,因此可更好地发挥FRP材料强度,并且FRP材料因嵌入混凝土保护层而拥有了更好的耐久性能,因此表层嵌贴FRP技术在未来的钢筋混凝土结构加固领域具有显著的潜力<sup>[2]</sup>.

近年来国内外众多学者对室温环境下外贴和表层嵌贴FRP-混凝土界面的黏结性能开展了大量工作.许多学者针对黏结强度、破坏模式以及黏结长度、混凝土强度、开槽构造等因素的影响进行了较为系统的探索<sup>[3-8]</sup>.这些工作取得了一些共识,如黏结强度随混凝土强度提高而增大;嵌贴剥离界面存在残余摩擦,因此黏结承载力随着黏结长度的增大而提高<sup>[6-9]</sup>;但也还存在若干分歧,如De Lorenzis<sup>[3]</sup>试验发现Hassan等<sup>[10]</sup>给出的变形FRP筋最小净间距和槽边距的建议值不足以消除NSM FRP和混凝土之间的相互作用,试件仍然出现了混凝土剥落破坏.但总体上,通过上述工作研究人员对嵌贴FRP的黏结性能已经建立了一定程度的认识.

另一方面,FRP加固结构的耐久性也是研究者与工程人员关心的主要问题之一,国内外对侵蚀环境下外贴FRP加固混凝土结构的耐久性,尤其是冻

融循环作用下EB FRP-混凝土黏结界面的耐久性开展了相当多的工作.Yun等<sup>[11]</sup>通过单剪试验发现,经历冻融循环作用后,外贴CFRP-混凝土的黏结承载力出现了不同程度的降低,大部分试件的破坏模式均是混凝土表面剥离破坏.任慧韬等<sup>[12]</sup>提出,冻融环境作用对CFRP加固混凝土结构的影响主要表现为黏结面性能退化,CFRP-混凝土黏结强度的降低是因为混凝土剪切强度下降和界面黏结力下降共同作用的结果.Green等<sup>[13]</sup>通过试验发现随着冻融次数的增加,CFRP-混凝土界面的黏结承载力没有降低,试件破坏模式逐渐由混凝土内聚破坏向黏结界面转移,因而认为:破坏模式的转变不是因为冻融导致混凝土强度降低引起的,而是黏结树脂的剪切模量降低导致的.李杉<sup>[14]</sup>和Qiao等<sup>[15]</sup>均认为CFRP-混凝土黏结性能的降低是因为冻融侵蚀作用导致黏结界面损伤引起.由上述文献可看出,关于冻融环境下外贴FRP-混凝土界面的损伤退化机理,研究人员间尚存在分歧.

与上述研究相对的是,关于冻融循环下表层嵌贴FRP-混凝土界面的黏结性能国内外的研究非常匮乏<sup>[16]</sup>,基于已有的研究成果难以深入认识冻融循环作用对表层嵌贴FRP-混凝土黏结性能的影响,而这对于在寒冷地区如我国北方应用该项技术具有重要的现实意义.鉴于此,本文对经历了不同冻融次数的嵌贴FRP-混凝土试件实施拔出试验,研究冻融环境作用对嵌贴FRP-混凝土界面黏结性能的影响,分析界面性能的退化机理,考察混凝土性能、胶层厚度等因素所导致的黏结性能变化,以期把握冻融环境下嵌贴FRP-混凝土界面的黏结耐久性,为表层嵌贴FRP加固技术的应用提供理论依据.

## 1 试验方案

### 1.1 试件及参数设计

本文试件由混凝土棱柱体及嵌贴的 CFRP 板条组成,混凝土棱柱体采用 150 mm×150 mm×300 mm 和 150 mm×150 mm×500 mm 两种尺寸规格,其中 500 mm 长试件采用较长模具浇筑;混凝土开槽宽度和深度分别为 10 mm 和 30 mm,试件制作时 CFRP 板条均埋置在槽中部.制作工艺包括:1)在试件表面标出黏结区域,用无水酒精清洗槽内并风干;2)按要求均匀拌合黏结树脂,将树脂注入槽内至一半槽深,并用灰刀插捣挤压保证树脂密实;3)将 CFRP 板条垂直、对中插入槽中,

用带卡槽的木条封堵黏结区域两端并固定板条,以保证板条水平并且埋深准确;4)再注入黏结树脂,用灰刀压实、抹平,保证胶层表面平整,将试件放置于室温环境下养护 7 d.

混凝土棱柱体分别采用 C30,CA30(添加具有引气、减水和防冻功能的早强防冻剂)、CW30(添加高效减水剂)以及 C60 等 4 种不同混凝土制作,各型号混凝土试件同时制作对应的标准立方体试件.试验选用美国 Aslan 公司的 500 型 CFRP 板条,截面规格分别为 16 mm×2.0 mm 和 16 mm×4.5 mm 两种.试验所用的黏结剂为瑞士 Sika 公司生产的 Sikadur-30 型树脂.上述材料的力学性能指标如表 1 所示,各试件的参数设计如表 2 所示.

表 1 材料性能

Tab.1 Properties of test materials

材料类型	抗拉强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	伸长率 /%	混凝土类型及强度等级	实测立方体抗压强度/MPa	混凝土类型及强度等级	实测立方体抗压强度 /MPa
CFRP	2068	131	1.71	C30	34.8	CW30	44.5
黏结树脂	31.9	2.632	1.47	CA30	33.5	C60	61.9

表 2 试件参数设计

Tab.2 Test parameters

试件编号	冻融循环次数	混凝土强度等级	槽壁厚度 /mm	黏结长度 /mm	板厚 /mm	胶层厚度 /mm	埋置深度 /mm
C30-L300-0	0						
C30-L300-150	150						
C30-L300-300	300						
CW30-L300-0	0						
CW30-L300-150	150	C30					
CW30-L300-300	300						
CA30-L300-0	0						
CA30-L300-150	150	CW30	70	300			
CA30-L300-300	300						
C60-L300-0	0	CA30			2	4	
C60-L300-150	150						
C60-L300-300	300	C60					
G40-L300-0	0						30
G40-L300-150	150		40	250			
G40-L300-300	300						
T2.0-L250-0	0						
T2.0-L250-150	150						
T2.0-L250-300	300	C30					
T4.5-L450-0	0		70				
T4.5-L450-150	150			450	4.5	2.7	
T4.5-L450-300	300						

注:试件编号中,T表示板条厚度(Thickness);C表示混凝土(Concrete);A表示防冻剂(Antifreeze);W表示减水剂(Water reducing agent);G表示槽距试件边缘距离(Distance from groove to block edge);L表示黏结长度(Bond length).

### 1.2 冻融试验方法

本次冻融循环试验参照 ASTM C 666/C 666M-03《混凝土抗速冻和速融的标准试验方法》采用快速冻融法,在国产 TDS-300 型冻融试验机(内径尺寸 1 175 mm×520 mm×500 mm)上进行,每次冻融循环为 4 h,试

验中心温度分别为 $(-18\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 和 $(4\pm 2)^{\circ}\text{C}$ .试验冻融循环次数分别选择为 0 次、150 次和 300 次.

### 1.3 试验加载与量测

本文试验采用单剪拔出试验方法,试验装置如图 1 所示.

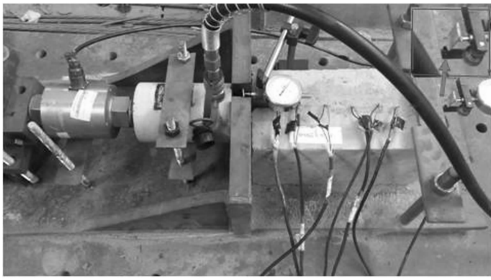


图1 加载装置  
Fig.1 Loading device

试验采用荷载传感器控制加载荷载的大小,以  $1 \text{ kN/min}$  的加载速率进行加载,CFRP 应变采用 TDS-530 静态应变仪记录.沿 CFRP 板条的黏结长度布置多个应变测试点,在加载端附近应变片适当加密,取  $30 \text{ mm}$  间距连续布置 3 个电阻应变片,之后取间距  $40 \text{ mm}$  直至自由端,应变片布置如图 2 所示.另外,在 CFRP 板条加载端和自由端布置 CDP 位移传感器以测量滑移值.

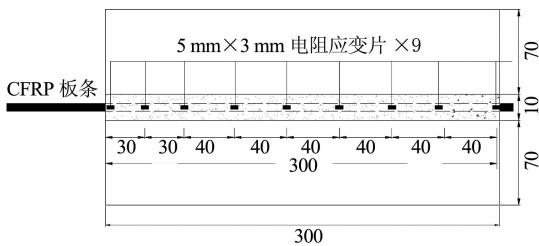


图2 CFRP 应变测点布置  
Fig.2 Disposal of CFRP strain sensors

## 2 试验结果及分析

### 2.1 冻融循环作用对混凝土性能的影响

如前所述,大量研究表明冻融循环作用对 FRP 与混凝土之间的黏结有显著影响<sup>[11-15]</sup>.但对于这一影响的作用机理现有研究仍存在明显分歧:部分学者认为冻融循环是通过劣化混凝土力学性能降低了 FRP-混凝土间黏结性能,另有研究人员提出冻融循环是削弱了 FRP 与黏结树脂的结合能力.鉴于此,本文考察具有不同抗冻性能的混凝土,包括 C30, C60,掺减水剂的 CW30 和防冻剂的 CA30 等,在冻融循环作用下与 FRP 黏结性能的变化规律,以揭示冻融循环对 FRP-混凝土黏结的劣化机制.

本文试验首先考察了冻融循环作用下,C30, C60 两种强度等级的混凝土,以及掺减水剂的 C30 混凝土(CW30)、掺防冻剂的 C30 混凝土(CA30)的力学性能变化规律.其中 C30, C60 混凝土的立方体

试块分别经历 0 次,150 次,225 次和 300 次冻融循环;CW30, CA30 混凝土分别承受 0 次、150 次和 300 次冻融循环,再通过荷载试验测试其抗压强度,结果如图 3 所示.

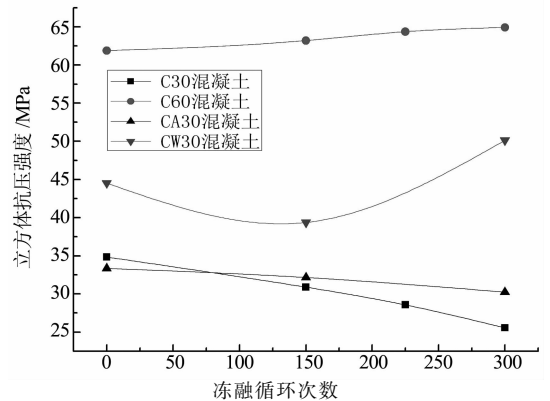


图3 冻融循环作用下混凝土强度变化  
Fig.3 Concrete strength versus number freeze-thaw cycles

由图 3 可知 C30 混凝土受冻融循环作用后,强度降低相当明显,冻融 300 次强度下降达  $26.6\%$ ,这说明冻融循环造成了 C30 混凝土的显著损伤和性能下降.但 C60 混凝土反而出现强度增大现象,这可能是因为:一方面 C60 混凝土内部孔隙率较低,密实性较好,因此抗冻能力较强;另一方面 C60 混凝土的水灰比较低,随着冻融循环有少量水分进入到混凝土内部,致使 C60 混凝土进一步水化,在冻融循环次数不过高时,水化对混凝土强度的提高效应大于冻融环境的退化效应,因此 C60 混凝土强度有所增长.

降低水灰比和掺防冻剂也是提高混凝土抗冻性能的有效手段,因此本文还考察了设计强度同样为 C30,但掺有减水剂(CW30)和引气防冻剂(CA30)的混凝土在冻融循环下的力学性能变化规律.试验结果表明,经历 150 次和 300 次冻融循环后,CA30 的力学性能略有下降,立方体抗压强度分别降低了  $3.6\%$  和  $9.4\%$ ,远较 C30 混凝土为小;CW30 的力学性能出现了起伏,150 次冻融循环后立方体抗压强度下降了  $11.6\%$ ,但 300 次冻融循环后立方体抗压强度却提高了  $12.6\%$ ,这应该是由混凝土强度的离散性所致.总体上,掺防冻剂和减水剂都有效改善了混凝土的抗冻性能,在此基础上本文进一步比较了不同混凝土抗冻性能对冻融下嵌贴 CFRP-混凝土黏结的影响.

### 2.2 冻融循环作用下混凝土性能对界面黏结的影响

在考察冻融循环对混凝土力学性能影响的基础

上,本文进一步研究了 C30,CA30,CW30 和 C60 等 4 种不同性能的混凝土与 FRP 黏结拔出试验分别进行不同次数冻融侵蚀后的静力试验,试验结果如表 3 及图 4 所示.由表 3 中数据可知,随着冻融循环次数的增加,普通 C30 混凝土试件的黏结承载力逐渐降低,同时破坏模式也由 CFRP 板条的拉断破坏转变为黏结界面的剥离(图 5).黏结性能的退化和破坏模式的转变应该是主要因为冻融循环对 C30 系列试件的混凝土力学性能产生了劣化作用.如前所述,冻融次数为 300 次时 C30 混凝土的立方体抗压强度降低了 26.6%,也可观察到棱柱体试件表面混凝土呈现明显的酥松状,这导致了混凝土表面薄层与树脂的结合力下降,从而出现黏结界面剥离,黏

结承载力降低 15%.

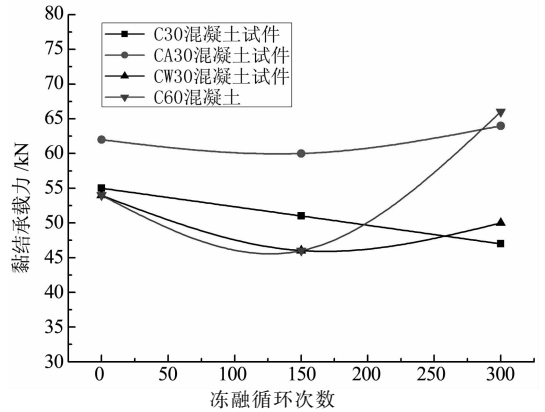


图 4 冻融循环作用下不同混凝土试件黏结承载力  
Fig. 4 Bond strength of specimens with different kinds of concrete

表 3 不同混凝土试件试验结果

Tab. 3 Test results of specimens with different kinds of concrete

试件编号	极限荷载 /kN	破坏模式	试件编号	极限荷载 /kN	破坏模式
C30-L300-0	55	FRP 拉伸断裂	CW30-L300-0	54	FRP 拉伸断裂
C30-L300-150	51	黏结界面剥离	CW30-L300-150	46	FRP 拉伸断裂
C30-L300-300	47	黏结界面剥离	CW30-L300-300	50	FRP 拉伸断裂
CA30-L300-0	62	FRP 拉伸断裂	C60-L300-0	54	FRP 拉伸断裂
CA30-L300-150	60	黏结界面剥离	C60-L300-150	46	FRP 拉伸断裂
CA30-L300-300	64	黏结界面剥离	C60-L300-300	66	FRP 拉伸断裂



图 5 试件 C30-L300-300 的黏结剥离破坏形态  
Fig. 5 Debonding failure of specimen C30-L300-300

如前所述,CA30 系列试件通过对混凝土掺防冻剂提高了混凝土的抗冻性能,经历 300 次冻融循环后混凝土立方体抗压强度下降 9.35%,远远低于 C30 混凝土.混凝土抗冻性能的变化导致了冻融循环作用下表层嵌贴的 CFRP 与混凝土间黏结性能没有出现显著退化,试件 CA30-L300-0 在 62 kN 时破坏于 CFRP 拉伸断裂,而经历了冻融循环的试件 CA30-L300-150 和 CA30-L300-300 分别于 60 kN 和 64 kN 时破坏于黏结界面剥离(图 6).经历 300 次冻融循环后 CFRP 与抗冻混凝土间的黏结承载力显著高于 CFRP 与普通 C30 混凝土(试件 C30-

L300-150 和 C30-L300-300);并且,虽然破坏模式不同,但试件 CA30-L300-300 破坏时的极限荷载甚至略高于 CA30-L300-0.



图 6 试件 CA30-L300-300 的黏结剥离破坏形态  
Fig. 6 Debonding failure of specimen CA30-L300-300

混凝土立方体强度试验表明,降低水灰比也有效控制了冻融循环对混凝土的劣化,CW30 混凝土的强度经历过冻融后强度没有被显著削弱,CW30-300 的强度反而有所增加.与之对应的是,掺减水剂的 CW30 系列试件破坏模式均为 FRP 拉伸断裂. CW30-L300-0 在 54 kN 时 CFRP 板条被拉断, CW30-L300-150 在 46 kN 时发生 CFRP 断裂,这可能是因为锚具的安装问题所致,而 CW30-L300-300

是在 50 kN 出现 FRP 断裂,对比试件 C30-L300-300 在 47 kN 时的黏结剥离破坏模式,有理由认为掺减水剂引起的混凝土抗冻性能增强也提高了 CFRP-混凝土界面黏结的抗冻融循环能力。

与 CW30 试件类似,C60 系列试件的破坏模式也均为 CFRP 板条拉断,其中试件 C60-L300-300 甚至在 66 kN 发生 FRP 断裂而不是黏结剥离破坏,说明经过 300 次冻融后,嵌贴 CFRP-混凝土间的黏结承载力也超过了 66 kN. 与 CA30-L300-300 在 64 kN 发生黏结剥离破坏相比,C60-L300-300 更高的界面黏结承载力应该是 C60 试件混凝土强度更高所致. 从上述试件的试验对比可得出结论,冻融循环作用所导致的表层嵌贴 CFRP-混凝土黏结性能降低主要源自于冻融作用下混凝土的损伤和性能退化,当混凝土抗冻性能得到改善时,冻融循环对嵌贴 CFRP 与混凝土间黏结性能的退化效应也得到了显著控制。

图 7 和图 8 描绘了经过 300 次冻融循环后,混凝土具有不同抗冻性能的试件在 30 kN 拉伸荷载作用下的 CFRP 应变和界面黏结应力分布. 由图 7 可看出,相同荷载作用下试件 C30-L300-300 的应力传递长度显著大于其它混凝土具有一定抗冻性能的试件,这说明经过冻融循环作用后,混凝土的退化导致了 CFRP 与混凝土界面的黏结强度显著下降,需要更大的应力传递长度以抵抗相同的拉拔荷载. 图 8 更加清晰地反映了这一点,在 30 kN 的拉伸荷载下试件 C30-L300-300 的界面黏结应力峰值已经向自由端移动,而 CW30-L300-300 和 C60-L300-300 的黏结应力峰值仍在加载端。

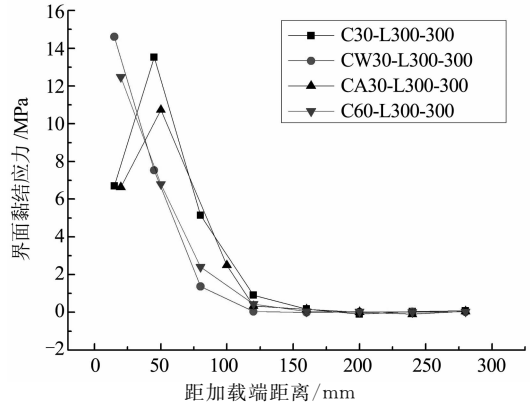


图 8 不同混凝土试件界面黏结应力分布  
Fig. 8 Distribution of bond stress of specimens with different kinds of concrete

经过 300 次冻融循环后各试件的加载端荷载滑移曲线如图 9 所示. 由图可以看出加载初期各试件的荷载滑移曲线较为接近,随着荷载增大试件 C30-L300-300 的滑移增量显著大于其它试件,这验证了之前的分析:相比其他试件而言,普通 C30 混凝土试件受冻融侵蚀更加严重,冻融引起的普通 C30 混凝土性能退化导致了嵌贴 CFRP-普通 C30 混凝土界面黏结强度下降. 另外,图 10 绘制了各试件的加载端黏结应力-滑移曲线. 可以看出,冻融试件 C60-L300-300 和 CW30-L300-300 和 C30-L300-300 的黏结滑移曲线应力峰值依次递减,相同冻融次数下 C30-L300-300 的峰值应力较 C60-L300-300 降低了约 26%,并且峰值应力对应的滑移值也有显著增加,因此黏结滑移曲线上升段的割线斜率显著减小,可见混凝土性能提高可以明显地改善冻融循环作用下嵌贴 CFRP-混凝土试件的黏结性能。

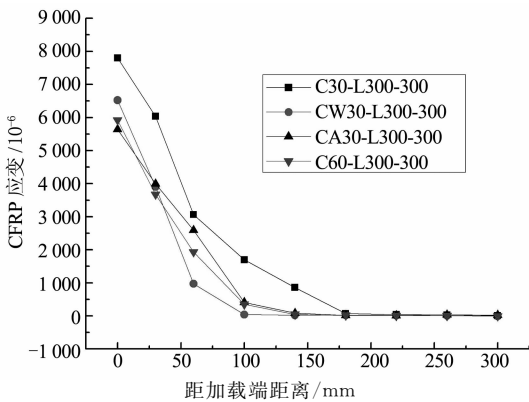


图 7 不同混凝土试件 CFRP 应变分布  
Fig. 7 Distribution of CFRP strain of specimens with different kinds of concrete

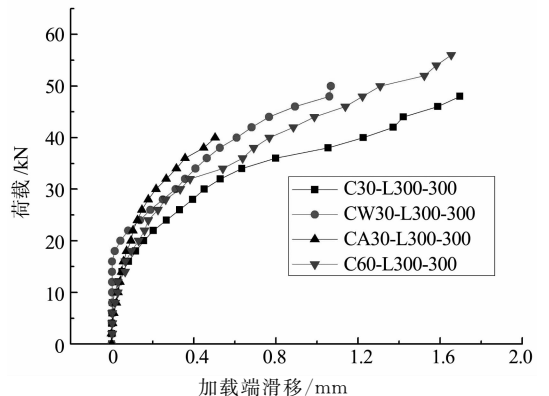


图 9 不同混凝土试件荷载-滑移曲线  
Fig. 9 Curves of loads versus slip of specimens with different kinds of concrete

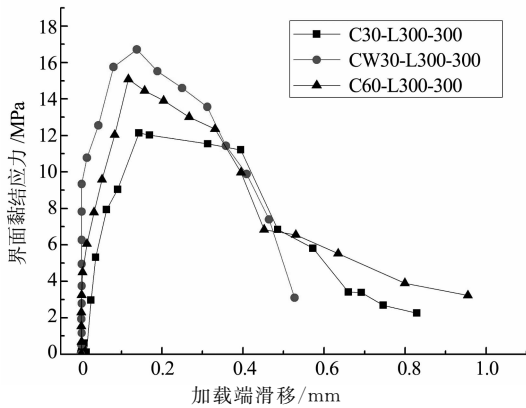


图 10 不同试件黏结滑移曲线图

Fig. 10 Curves of bond stress versus slip of specimens with different kinds of concrete

### 2.3 冻融循环作用下槽壁厚度对界面黏结的影响

作者已有工作表明<sup>[9]</sup>,槽壁厚度(槽壁至试件边缘距离)对嵌贴 FRP-混凝土的黏结性能有显著影响,过薄的槽壁混凝土难以抵抗由嵌贴 CFRP 传递来的剪应力和拉应力,因此槽壁厚度较小时可能发生槽壁混凝土的剪切破坏;另一方面较小的槽壁厚度也对应着较小的截面刚度,降低了对嵌贴 FRP 的约束.鉴于此,本文对冻融条件下槽壁厚度对嵌贴 CFRP-混凝土黏结性能的影响进行了探索.

表 4 比较了不同槽壁厚度试件在经过不同次数冻融循环后的黏结性能变化.从表中可看出,槽壁厚

度由 70 mm 减小至 40 mm 后,试件黏结承载力有所降低,破坏模式由 FRP 拉断变为了黏结界面剥离,并且在加载端较薄槽壁侧混凝土出现了斜裂缝.说明本文试验中 40 mm 的槽壁厚度无法抵抗 CFRP 受拉所引起的混凝土内剪应力及拉应力,槽壁开裂后混凝土对 CFRP 板条的约束减小,导致界面发生黏结剥离破坏.

经过 150 次冻融后,试件 C30-G40-150 的极限荷载较 C30-L300-150 略小,破坏模式也同样为界面黏结剥离破坏,但因为槽壁厚度较薄,前者的黏结行为呈现出了较大的不同:20 kN 时在较薄的槽壁一侧 20 mm 处(约槽壁厚度一半)出现斜向 FRP 板发展的裂缝,荷载增加至 34 kN 时另一侧槽壁同样出现斜裂缝,两侧裂缝共同形成锥形的混凝土破坏面,如图 11 所示;继续增加荷载至 40 kN 时,沿 CFRP 板出现裂缝并随着荷载的增加逐渐向自由端扩展,48 kN 时发生界面黏结剥离,CFRP 板条被拔出,加载端混凝土呈现较明显的锥形破坏面.需要指出的是,槽壁厚度为 70 mm 的 C30-L300-150 没有出现类似的裂缝形态.出现锥形斜裂缝的原因应是冻融循环作用导致混凝土力学性能下降后,40 mm 的槽壁厚度不足以抵抗荷载引起的拉应力.由此可看出,减小槽壁厚度导致嵌贴 FRP 的界面黏结性能进一步下降.试件 C30-G40-300 由于夹锚问题,在 38 kN 时发生 FRP 断裂的非正常破坏.

表 4 不同槽壁厚度试件试验结果

Tab. 4 Test results of specimens with different edge distance

试件编号	槽壁厚度 /mm	极限荷载 /kN	破坏模式	试件编号	槽壁厚度 /mm	极限荷载 /kN	破坏模式
C30-L300-0	70	55	FRP 拉伸断裂	C30-G40-0	40	52	黏结界面剥离
C30-L300-150	70	51	黏结界面剥离	C30-G40-150	40	48	黏结界面剥离
C30-L300-300	70	47	黏结界面剥离	C30-G40-300	40	38	*

注: \* 夹锚操作失误致 CFRP 过早断裂.



图 11 试件 C30-G40-150 混凝土斜裂缝

Fig. 11 Diagonal crack at loaded end of specimen

图 12 描绘了不同槽壁厚度试件在不同次数冻融后的黏结滑移曲线.从图 12 可看到,与冻融 150 次后相比,冻融 300 次后 C30-G40 系列试件和 C30-L300 系列试件的黏结峰值应力都有显著下降,其中 C30-L300-300 的峰值应力较 C30-L300-150 降低 19.8%,C30-G40-300 较 C30-G40-150 降低 24.2%,反映出冻融循环削弱了 FRP-混凝土界面的黏结能力,而槽壁较薄时其性能下降幅度更大;另一方面,试件 C30-G40-150 对应峰值黏结应力的滑移值略大于 C30-L300-150, C30-G40-300 也略大于 C30-

L300-300,从图中也可看到 C30-G40 系列试件的黏结-滑移曲线上升段的斜率更小,表现出了更明显的黏结强度退化趋势。

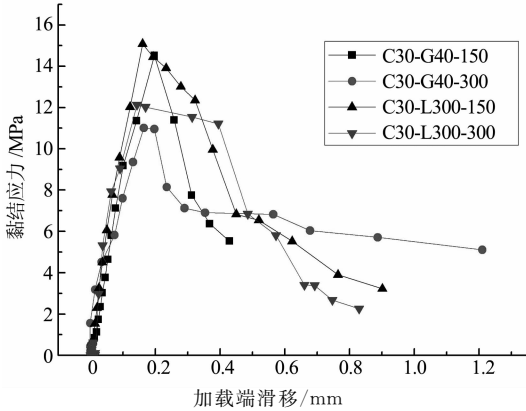


图 12 不同槽壁厚度试件黏结滑移曲线  
Fig. 12 Curves of bond stress versus slip of specimens with different edge distance

从上述分析可看出,减小槽壁厚度增大了混凝土内应力,加上冻融循环侵蚀下混凝土强度降低,可

能导致槽壁混凝土开裂,嵌贴 FRP 受到的约束被削弱,界面黏结强度进一步降低,更容易发生剥离破坏.在冻融侵蚀环境下,为充分发挥 CFRP 板条的抗拉强度并避免槽壁混凝土开裂,需保证一定的槽壁厚度。

## 2.4 冻融循环作用下胶层厚度对界面黏结的影响

表层嵌贴 FRP 与混凝土之间的胶层厚度显著大于外贴的 FRP.在冻融循环条件下不同的胶层厚度能否导致不同的黏结性能,是研究人员关心的问题之一.本文试验通过采用不同厚度的板条改变胶层厚度,考察了冻融循环作用下不同胶层厚度的影响,试验结果如表 5 所示.表中 T4.5-L450 系列试件采用了厚度为 4.5 mm 厚的 CFRP 板条,黏结长度相应延长到了 450 mm,所采用的混凝土棱柱体尺寸为 150 mm×150 mm×500 mm,混凝土强度与 C30-L300 系列试件相同,槽宽也同样为 10 mm,则平均胶层厚度为 2.7 mm。

表 5 不同胶层厚度试验结果  
Tab. 5 Test result of specimens with different resin thickness

试件编号	胶层厚度 /mm	极限荷载 /kN	破坏模式	试件编号	胶层厚度 /mm	极限荷载 /kN	破坏模式
C30-L300-0	4	55	FRP 拉伸断裂	T4.5-L450-0	2.7	130	FRP 拉伸断裂
C30-L300-150	4	51	界面黏结剥离	T4.5-L450-150	2.7	86	界面黏结剥离
C30-L300-300	4	47	界面黏结剥离	T4.5-L450-300	2.7	84	界面黏结剥离

经历 150 次冻融循环后,试件 T4.5-L450-150 在加载至 66 kN 时挡板处混凝土边缘出现裂缝,这是由于加载端混凝土受压不均匀所致,此时黏结界面完好,没有出现裂纹.继续增加荷载至 72 kN 时,加载端槽两侧的树脂-混凝土黏结界面出现裂纹(图 13),且随着荷载进一步增加界面裂缝不断扩展且听到其发展声音,继续增加荷载至 82 kN 时黏结试件出现通长裂纹,自由端可见明显裂缝,继续加载至 86 kN 时荷载突然大幅下降至 66 kN,继续加载时荷载无法维持,加载至 68 kN 后荷载又下滑至 50 kN,继续补加荷载时荷载值掉至 30 kN,保持稳定。

试件 T4.5-L450-300 加载至 30 kN 时加载端槽两边的混凝土出现细小裂纹,但黏结界面保持完好,没有出现开裂迹象,加载至 70 kN 时加载端黏结界面突然出现长度约为 5 cm 的裂缝,当荷载继续增加时裂缝逐渐向自由端扩展(图 14),加载端滑移也出现突然的显著增长.当荷载增加至 84 kN 时,

FRP 板条突然断裂破坏.鉴于 FRP 板条断裂荷载远小于其抗拉承载力,并且断裂时黏结界面已经出现超过大半黏结长度且持续发展的明显裂缝,因此判断 FRP 断裂是锚具安装误差所致,该试件破坏模式仍应为界面黏结破坏。



图 13 试件 T4.5-L450-150 槽两侧黏结界面的裂缝  
Fig. 13 Cracks at interface on both sides of groove of specimen T4.5-L450-150





图 14 试件 T4.5-L450-300 的混凝土-树脂界面裂缝  
Fig. 14 Crack at epoxy-concrete interface of specimen T4.5-L450-300

由上述描述可知,经历冻融循环后,胶层厚度减小的试件发生了显著的黏结承载力退化,并且破坏模式由 CFRP 拉断转变为在树脂-混凝土界面发生的黏结破坏,清晰表明冻融循环作用引起的混凝土性能退化导致了嵌贴 FRP-混凝土黏结性能的下降.值得注意的是,胶层厚度较小的 T4.5-L450 试件其黏结承载力的降低幅度显著大于 C30-L300 试件(前者经历 150,300 次冻融循环后承载力分别降低 33.8%,35.4%;后者分别降低 7.2%,14.5%),这应当是胶层厚度减小和黏结长度增加所共同导致.

由于黏结破坏面位于树脂-混凝土界面,胶层厚度较小时,对应着较小的黏结面积(图 15),因此冻融循环作用下破坏模式由 FRP 拉断转变为界面黏结破坏时,除了界面黏结性能下降之外,胶层厚度对应的较小的黏结面积也导致黏结承载力进一步减小.另外,与外贴 FRP 不同,嵌贴 FRP 与混凝土之间发生黏结剥离之后在界面上仍存在残余摩擦力,沿黏结长度的黏结应力和残余摩擦应力分布如图 16 所示.经历冻融循环后,剥离界面的残余摩擦应

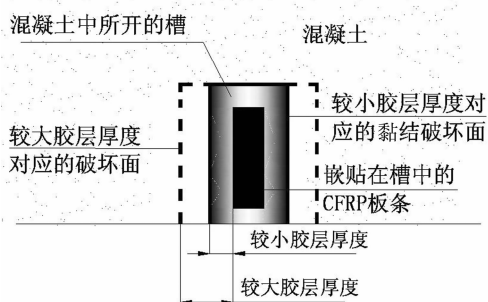


图 15 胶层厚度对应破坏面  
Fig. 15 Failure plane corresponding to epoxy thickness

力由于混凝土性能的退化而降低,由于 T4.5-L450 系列试件黏结长度(450 mm)大于 C30-L300 系列试件(300 mm),更大的黏结长度对应更显著的冻融所致残余摩擦力损失,因此 T4.5-L450 系列试件的黏结承载力退化显著大于 C30-L300 系列试件.

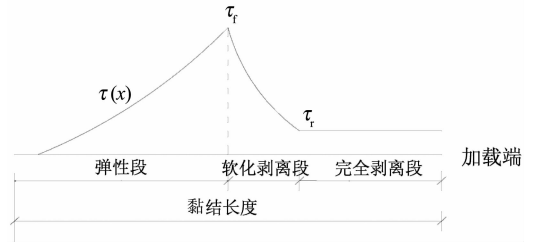


图 16 沿黏结长度黏结应力分布  
Fig. 16 Distribution of bond stress along bond length

### 3 结 论

本文通过 24 个混凝土立方体试件的冻融抗压试验和 21 个嵌贴 CFRP-混凝土棱柱体试件的拔出试验,研究了冻融循环作用对混凝土强度的影响,分析了冻融循环对嵌贴 FRP 黏结的退化机理,讨论了冻融循环作用下混凝土强度、槽壁厚度及胶层厚度等因素对嵌贴 CFRP-混凝土试件界面黏结性能的影响,得出以下结论:

1) 普通 C30 混凝土冻融 300 次后强度降低 26.6%;但高强混凝土如 C60 因二次养护效应,其在 300 次冻融作用后的强度反而稍有提高;冻融循环对掺入减水剂和防冻剂的混凝土 CW30 和 CA30 均没有显著影响.拔出试验表明,冻融引起的混凝土性能退化导致了嵌贴 FRP-混凝土黏结承载力降低及破坏模式转变,但对于具有防冻能力其性能未出现显著下降的混凝土 CW30,CA30 和 C60,其与嵌贴 FRP 之间的黏结性能没有明显降低.这一结果表明,冻融循环作用引起的嵌贴 FRP-混凝土黏结性能下降主要源于混凝土性能的退化.

2) 冻融循环作用下减小槽壁厚度可能导致破坏模式转变及更显著的黏结性能退化.槽壁厚度由 70 mm 减小至 40 mm 时,未经历冻融循环的试件破坏模式变为界面黏结破坏,表明较薄槽壁对嵌贴 FRP 的约束较小;经历 150 次冻融循环后,由于混凝土强度降低和槽壁厚度减小导致拉应力增大,试件先在 40 mm 厚槽壁侧出现斜向裂缝,继而在另一侧也出现相同裂缝,共同构成混凝土锥形破坏面.另外槽壁厚度从 70 mm 减小至 40 mm 时,冻融循环 150 次后界面黏结峰值应力的降低幅度由 19.8% 增大至

24.2%,峰值应力对应的滑移也略有增加。

3)本文试验中,胶层厚度减小为2.7 mm,黏结长度为450 mm的试件在经历150,300次冻融循环后,黏结承载力分别下降33.8%和35.4%,破坏模式转变为树脂-混凝土界面黏结破坏。这应是因为较小的胶层厚度减小了黏结破坏面的面积;同时冻融循环作用引起的混凝土性能退化导致了黏结界面的强度和剥离界面的残余摩擦力都有所降低;两者叠加效应导致了破坏模式的转变和黏结承载力显著减小。

## 参考文献

- [1] SERACINO R, JONES N M, ALI M S M, *et al.* Bond strength of near-surface mounted FRP-to-concrete joints [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2007, 11(4): 401-409.
- [2] DE LORENZIS L, TENG J. Near-surface mounted FRP reinforcement: an emerging technique for strengthening structures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38(2): 119-143.
- [3] DE LORENZIS L. Strengthening of RC Structures with near surface mounted FRP rods[D]. Lecce: College of Civil Engineering, University of Lecce, 2002: 12-16.
- [4] BLASCHKO M. Bond behaviour of CFRP strips glued into slits[C]//Proceedings RPRCS-6. Singapore: World Scientific, 2003: 205-214.
- [5] PARRETTI R, NANNI A. Strengthening of RC members using near surface mounted FRP composites: design overview [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2004, 7(6): 69-83.
- [6] 姚谏,朱晓旭,周延阳. 混凝土表层嵌贴 CFRP 板条的黏结承载力[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2008, 42(1): 34-38. 169  
YAO Jian, ZHU Xiaoxu, ZHOU Yanyang. Bond failure loads of near surface mounted CFRP strips bonded to concrete[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2008, 42(1): 34-38, 169. (In Chinese)
- [7] 周朝阳,胡志海,贺学军,等. 内嵌式碳纤维板条与混凝土黏结性能的拉拔实验[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2007, 38(2): 357-361.  
ZHOU Chaoyang, HU Zhihai, HE Xuejun, *et al.* Bond behavior of NSM CFRP plate-concrete interface in pull-out experiment[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 38(2): 357-361 (In Chinese)
- [8] 尚守平,李知兵,彭晖. 碳纤维板-混凝土界面黏结性能的试验研究与有限元分析[J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(6): 45-51.  
SHANG Shouping, LI Zhibing, PENG Hui. Experimental research and finite element analysis of the interfacial bonding behavior of CFRP-concrete interface[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 4(6): 45-51. (In Chinese)
- [9] 彭晖,张建仁,陈俊敏,等. 表层嵌贴 CFRP 板条-混凝土界面黏结性能的试验研究[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(6): 70-79.  
PENG Hui, ZHANG Jianren, CHEN Junmin, *et al.* Experimental study of bond performance of interface between near-surface-mounted CFRP strips and concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(6): 70-79. (In Chinese)
- [10] HASSAN T, RIZKALLA S. Bond mechanism of near-surface-mounted fiber-reinforced polymer bars for flexural strengthening of concrete structures[J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(6): 830-839.
- [11] YUN Y, WU Y F. Durability of CFRP-concrete joints under freeze-thaw cycling[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65(3): 401-412.
- [12] 任慧韬,胡安妮,赵国藩. 纤维增强塑料与混凝土黏结抗冻融性能研究[J]. *大连理工大学学报:自然科学版* 2003, 43(4): 495-499.  
REN Huitao, HU Anni, ZHAO Guofan. Freeze-thaw resistance behavior of bonded joints between FRP and concrete[J]. *Journal of Dalian University of Technology: Science and Technology*, 2003, 43(4): 495-499. (In Chinese)
- [13] GREEN M F, BISBY L A, BEAUDOIN Y, *et al.* Effect of freeze-thaw cycles on the bond durability between fibre reinforced polymer plate reinforcement and concrete[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27(5): 949-959.
- [14] 李杉. 环境与荷载共同作用下 FRP 加固混凝土耐久性[D]. 大连:大连理工大学土木工程学院, 2009: 44-49.  
LI Shan. Durability of concrete strengthened with FRP under environmental and loading conditions[D]. Dalian: College of Civil Engineering, Dalian University of Technology. 2009: 44-49. (In Chinese)
- [15] QIAO P Z, XU Y. Effects of freeze-thaw and dry-wet conditionings on the mode-I fracture of FRP-concrete interface bonds[C]//Proceedings of Ninth Biennial Conference on Engineering, Construction and Operations in Challenging Environments. Houston, Texas: American Society of Civil Engineers, 2004: 601-608.
- [16] SOLIMAN S M, EL-SALAKAWY E, BENMOKRANE B. Bond performance of near-surface-mounted FRP bars [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(1): 103-111.