



# 冻融循环下 CFRP-高性能混凝土的粘结性能

王玉田<sup>a,b</sup>, 姜福香<sup>a,b</sup>, 赵铁军<sup>a</sup>, 张凯<sup>b</sup>, 殷彦波<sup>b</sup>

(青岛理工大学 a. 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心; b. 土木工程学院, 山东青岛 266033)

**摘要:**通过双面剪切试验,研究了冻融环境下 CFRP-高性能混凝土界面粘结性能的发展规律。对比分析了未经冻融和经历 25、50、100、150、200 及 300 次冻融循环作用试件的破坏特征、剪应变分布、荷载滑移曲线、粘结承载力以及粘结破坏机理。结果表明,所有试件的界面破坏均发生在混凝土表层内,但随着冻融循环次数的增加,破坏界面有向胶层发展的趋势;经受冻融循环次数较少时(25、50 次),界面的粘结强度、刚度及开裂荷载的变化不明显,甚至略微提高;但随着冻融循环次数的进一步增加,界面粘结性能有明显的变化,界面粘结强度、端部滑移量减小,刚度退化,初始开裂荷载水平降低,非线性特征增强。粘结极限承载力与混凝土立方体抗压强度均随冻融循环次数的增长存在先提高后下降的趋势,混凝土强度变化是界面粘结性能变化的最重要因素。

**关键词:**碳纤维增强复合材料(CFRP);高性能混凝土;冻融循环;粘结性能;耐久性

**中图分类号:** TU528. 572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0085-07

## Bond properties of CFRP-high performance concrete subjected to freeze-thaw cycles

Wang Yutian<sup>a,b</sup>, Jiang Fuxiang<sup>a,b</sup>, Zhao Tiejun<sup>a</sup>, Zhang Kai<sup>b</sup>, Yin Yanbo<sup>b</sup>

(a. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone;

b. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** By adopting double shear test, the developing law of interface bonding properties between CFRP and high performance concrete exposed to freeze-thaw environment was studied. The damage characteristics, shear strain distribution, the paths of the load-slip curves, adhesive capacity and failure mechanisms of specimens without freeze-thaw damage and with 25, 50, 100, 150, 200 and 300 times freeze-thaw cycle effect were compared and analyzed. The results showed that interface damage occurred within the concrete surface layer for all of the specimens, but with the increase of freeze-thaw cycles, destroyed interface had the tendency to the adhesive resins layer. Subjected to less freeze-thaw cycles such as 25 times and 50 times, the interface bond strength, rigidity and cracking load did not change obviously, even slightly elevated but with the further increase of freeze-thaw cycles, interface bond properties changed obviously.

**收稿日期:** 2014-08-06

**基金项目:** 国家重点国际合作项目(51420105015); 青岛市基础研究-联合基金计划项目(13-1-4-115-jch)

**作者简介:** 王玉田(1972-), 男, 博士(后), 高级实验师, 主要从事结构检测评估与加固技术研究, (E-mail) wyt-wkl@163.com。

**Received:** 2014-08-06

**Foundation item:** Key Project of International Cooperation from National Science Foundation of China(No. 51420105015); Joint Basic Research Project Fund Plan of Qingdao(No. 13-1-4-115-jch)

**Author brief:** Wang Yutian(1972-), PhD, senior experimentalist, main research interests: structural testing evaluation and reinforcement technology, (E-mail) wyt-wkl@163.com.

Interfacial bond strength and slippage in the end of CFRP decreased. The rigidity degeneration and nonlinear characteristics were obvious and the initial cracking load was lowered. The ultimate bearing capacity and the concrete cube compressive strength both declined after increasing with the growth of the number of freeze-thaw cycles. The change of concrete strength was an important factor for the changes of interfacial bond properties.

**Key words:** carbon fiber reinforced composites (CFRP); high performance concrete; freeze-thaw cycled; interfacial bond properties; durability

近年来,纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称 CFRP)在混凝土结构的加固和改造工程中得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。CFRP 与混凝土的粘结界面对传递有效应力、保证加固结构的完整性和可靠性起到重要的作用<sup>[2-4]</sup>。有关统计表明,FRP 加固混凝土梁的破坏约有 63% 是由于 FRP 与混凝土界面粘结失效造成的<sup>[5]</sup>。然而,实际加固工程结构常处于恶劣的环境下,粘结界面的长期性能受到威胁,从而影响加固结构的可靠性。在寒冷地区,冻融破坏是普遍存在的混凝土结构病害,CFRP 加固混凝土结构也不可避免地受到冻融循环作用的影响,导致其耐久性劣化进程加快。

对外贴 FRP 加固混凝土结构耐久性的研究开始于 20 世纪 90 年代初,但迄今为止针对其在冻融环境下粘结破坏机理的研究仍不够充分<sup>[6-9]</sup>。Bisby 等<sup>[6]</sup>研究了 3 类 CFRP-混凝土界面的抗冻性能,发现 200 次或 300 次冻融循环作用对界面性能没有太大的影响。Ahmad 等<sup>[7]</sup>的研究则表明冻融循环作用大大降低了试件的承载能力。中国在这方面的研究相对较晚,文献<sup>[10-12]</sup>等的研究发现,冻融循环作用对界面粘结有不利影响。王苏岩<sup>[13]</sup>的研究则发现,经受过冻融循环作用后的 CFRP 与高强混

土的粘结强度有一定的增长。可见,有关冻融循环作用对 CFRP-混凝土界面粘结性能影响的研究结论存在分歧,而对于高性能混凝土的相关研究很少。这势必在一定程度上制约 CFRP 材料在寒冷地区高性能混凝土结构中的推广应用。

笔者利用双面剪切试验,重点研究冻融循环作用对 CFRP 与高性能混凝土界面粘结性能的影响。通过分析粘结区 CFRP 的应变、加载端的端部粘结滑移、极限粘结承载力发展规律,研究冻融循环下碳纤维与高性能混凝土界面粘结的耐久性退化规律和机理。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验所用混凝土为双掺粉煤灰和矿粉的高性能混凝土,设计强度等级为 C50。原材料包括 P. O 42.5 级普通硅酸盐水泥,II 级粉煤灰,S95 级矿粉,粒径 5~25 mm 连续级配的碎石作为粗骨料,青岛大沽河河砂作为细骨料(最大粒径 5 mm,细度模数 2.4,中砂),搅拌水为普通自来水。另外,还使用了减水率为 25% 的 HSC-A 型聚羧酸高效减水剂。具体配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比及抗压强度

Table 1 Composition of the concrete and the compressive strength

混凝土配合比(kg·m <sup>-3</sup> )									减水剂/%		立方体抗压强度/MPa	
胶凝材料	水泥	粉煤灰	矿粉	砂子	碎石	水	水胶比			28 d	56 d	
470	250	75	145	730	1095	160	0.33	1.5		55.5	59.5	

试验采用上海优士康化工有限公司生产的 YC-190-300g 单向 CFRP 片材,实测抗拉强度为 3 356 MPa,弹性模量  $2.16 \times 10^5$  MPa,伸长率 1.62%,名义厚度 0.167 mm。浸渍胶为该厂生产的 YC-189-A 胶(由甲、乙两组份按 2:1 质量比混合而成)。抗拉强度 40 MPa,弹性模量 2 500 MPa,伸长率 1.5%。

### 1.2 试件设计

混凝土立方体抗压强度采用 100 mm×100 mm×100 mm 试件。粘结性能采用双面剪切试件<sup>[3,14]</sup>,混

凝土的试件尺寸为 100 mm×100 mm×150 mm,CFRP 布总长度为 540 mm,宽度为 50 mm,粘结区的长度为 100 mm,加载端边界上留有 30 mm 的非粘结区。将 CFRP 布按 U 型粘贴在混凝土试件的两个相对侧面上,粘贴层数为一层,如图 1 所示。碳纤维布的具体粘贴方法按《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》(CECS 146:2003)的要求进行。立方体试件和粘结试件每组均为 3 个试件。

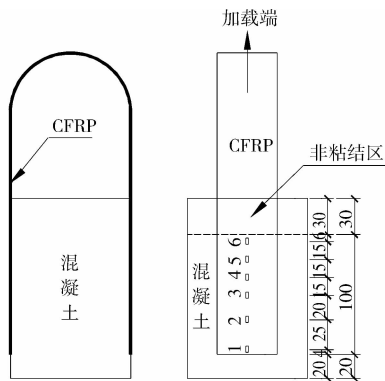


图 1 双面剪切试件及应变片粘贴示意图

Fig. 1 Schematic representation of the double shear specimen and strain gauge paste

### 1.3 冻融试验方案

立方体试件拆模后,标准养护(温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 相对湿度 95% 以上) 24 d 后从养护室取出,放在  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  水中浸泡 4 d,在 28 d 龄期时开始进行冻融试验。粘结试件标准养护 28 d,置于常温环境中 3 d 达到面干后,粘贴 CFRP 布,继续在室温下养护 7 d,饱水 4 d,再进行快速冻融试验。冻融试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)建议的快速冻融法,采用 KDR-V9 型混凝土快速冻融试验机进行。每个冻融循环周期约为 3 h,试件中心最低和最高温度分别控制在  $-18 \pm 2^\circ\text{C}$  和  $5 \pm 2^\circ\text{C}$ 。待冻融循环次数达到 25、50、100、150、200、300 次后,分别从冻融箱中取出立方体试件和粘结试件,自然晾干后进行立方体抗压强度试验和双面剪切试验。

### 1.4 加载装置及测试内容

冻融循环达到预定次数后,将立方体试件从冻融箱中取出,进行抗压强度测试。

粘结试件则待其自然晾干后,沿 CFRP 中心方向依次粘贴应变片,用于加载过程中测定粘结区域内 CFRP 的应变值,具体粘贴位置见图 1。采用引伸计(见图 2)测量 CFRP 自由端部与混凝土的相对滑移(端部滑移量),数据通过电脑自动采集,取用两侧的平均值作为最终值。

粘结试件加载采用日本津岛 SES-1000 型电子拉伸试验机(250 kN)实施。拉伸荷载通过自行设计的 CFRP-混凝土界面双面剪切试验加载装置施加于试件,见图 2。试验中,加载速率为  $0.1 \text{ mm/min}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土立方体抗压强度

经观察,在预定冻融循环次数下,各混凝土试块均无明显的表面剥落现象(参见图 4)。混凝土立方体抗压强度依据常规方法测试,结果列于表 2。

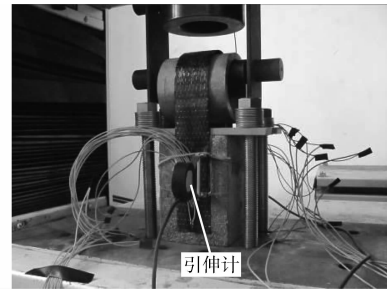


图 2 双面剪切试验加载装置

Fig. 2 Test loading device for double shear

表 2 冻融循环后混凝土立方体抗压强度平均值  
Table 2 The average cubic compressive strength of concrete after freeze-thaw cycles

冻融循环/次	抗压强度/MPa	下降百分比/%
0(对比)	55.5	0.0
25	60.9	-9.7
50	59.9	-7.9
100	55.0	0.9
150	51.1	7.9
200	46.4	16.4
300	34.5	37.8

注:未经冻融循环损伤(0次)的试件为标准养护 28 d,按照标准试验方法测得的立方体抗压强度。

试验结果表明,经过较少次数的冻融循环后,混凝土立方体抗压强度与 28 d 抗压强度相比有一定程度的提高,文献[15-16]的研究也有类似的现象。经 25 次和 50 次冻融循环后,混凝土抗压强度分别提高了 9.7% 和 7.2%。分析原因,一方面是由于试验采用了 C50 高性能混凝土,粉煤灰和矿粉双掺配合比设计,使得混凝土孔隙率低、密实性较高,从而使该混凝土具有良好的抗冻性(另文介绍)。另一方面,随着冻融循环次数的增加,在静水压和渗透压作用下,混凝土内部孔隙及微裂缝逐渐扩展,外部水分就会沿微缺陷渗透到混凝土内部,从而加速水泥的二次水化。混凝土的水胶比为 0.33(低于水泥颗粒完全水化而无毛细孔所需的理论水胶比 0.38)二次水化效果较为明显。

图 3 所示为混凝土抗压强度  $f_d$  随冻融循环次数  $N$  的变化情况。可见,随着冻融循环次数的增加,水泥继续水化对混凝土强度增长的作用越来越低于冻融损伤导致的混凝土强度损失,抗压强度总体呈下降的趋势。经历 100 次冻融循环时,混凝土强度开始低于 28 d 抗压强度。冻融循环 300 次后,强度已经降低为 28 d 强度的 62.2%。

对 25 ~ 300 次冻融循环后的试验数据进行线性拟合,得到关系式为

$$f_d = 64.51 - 0.096N \quad (1)$$

其线性相关系数为 0.994。

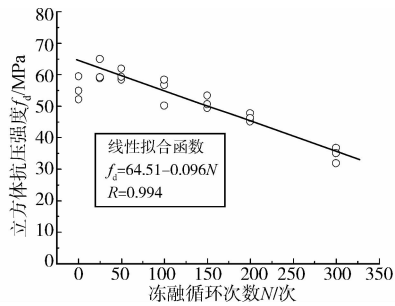


图 3 立方体抗压强度随冻融循环次数的变化

Fig. 3 The cubic compressive strength along with the change of freeze-thaw cycles

## 2.2 界面粘结破坏特征

经预定冻融循环次数作用后,各剪切试件也均未见明显的混凝土表面剥落现象。界面剪切破坏后,观察 CFRP 片材的表面,发现所有粘结试件的破坏均发生在粘结界面下较浅的混凝土表层内。可见,剥离破坏模式在高强混凝土情况下,不仅仅取决于混凝土,与胶层也有很大的关系。随着冻融循环次数的增加,片材表面粘附的混凝土颗粒自厚变薄。可见,对比试件和冻融循环 100 次以下的试件在破坏时 CFRP 表面粘有大量的混凝土颗粒,被剪下的混凝土层相对较厚。随着冻融循环次数的增加,破坏界面逐渐向胶层发展,当冻融循环次数达到 200 次和 300 次时,CFRP 表面只能看到少量的混凝土颗粒,破坏层接近胶层。分析原因,主要是由于 CFRP 与混凝土的粘结界面存在气孔、裂纹等缺陷,融解状态时水分易于侵入。随冻融次数增加,界面裂缝逐渐发展,导致界面粘结性能逐渐降低,且相比而言,其影响超过了混凝土强度降低的影响,从而导致破坏面逐渐向胶层发展。文献[10]和[17]得到类似的结论,典型的破坏形态如图 4 所示。

## 2.3 界面粘结极限承载力

表 3 所列为试验所得不同冻融次数下 CFRP-混凝土粘结试件的破坏极限承载力( $F_b$ )。

表 3 冻融循环下 CFRP-混凝土界面粘结承载力平均值  
Table 3 Average-bearing capacity of CFRP-concrete interface under freeze-thaw cycles

冻融次数/次	极限承载力/kN	下降百分比/%
0	17.1	0
25	17.5	-2.3
50	17.6	-2.9
100	16.8	1.8
150	16.2	5.3
200	15.0	12.1
300	13.7	19.9

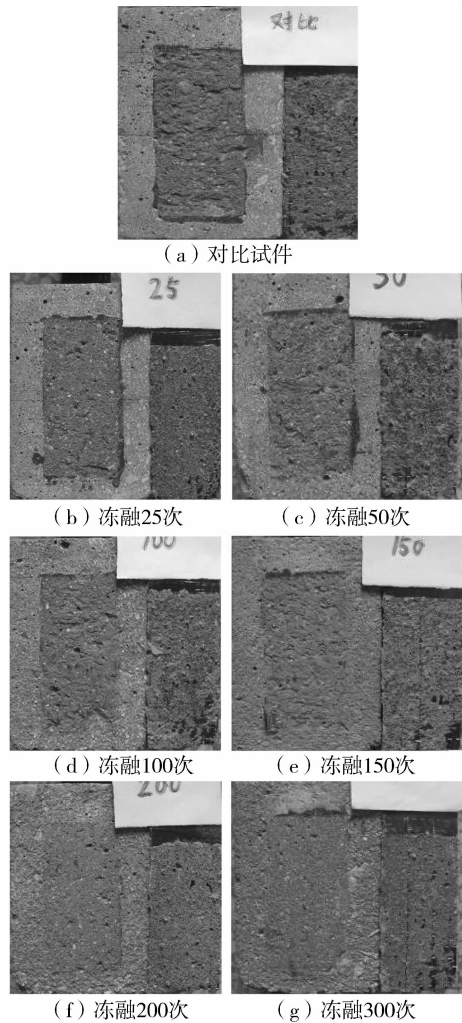


图 4 CFRP-混凝土界面粘结破坏形态

Fig. 4 Failure pattern of CFRP-concrete interface bonding

从表 3 可以看出,粘结极限承载力随冻融循环次数的变化与混凝土抗压强度变化存在类似的规律,即在冻融循环次数较少( $\leq 50$  次)时,极限承载力有所提高。25 次和 50 次时,分别提高了 2.3% 和 2.9%。在冻融循环 50 次以上,则呈线性下降的趋势(如图 5,线性相关系数为 0.996)。冻融循环达 300 次时,极限荷载降低了 19.9%。

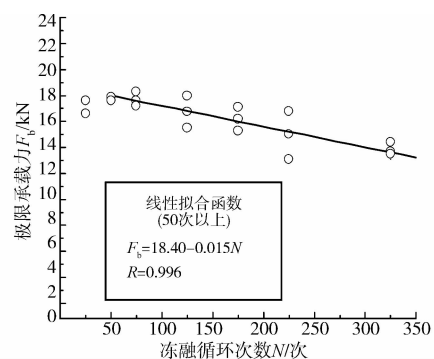


图 5 极限承载力随冻融次数的变化

Fig. 5 The ultimate bearing capacity along with the change of freezing-thawing cycles



已有研究表明<sup>[11,13,18]</sup>,混凝土强度越高,CFRP与混凝土之间的粘结强度也越高。图 6 所示为冻融循环作用下混凝土立方体抗压强度与界面粘结承载力下降百分比。可见,两者的变化规律类似,但前者比后者的变化幅度大。分析原因,冻融循环初期,粘结承载力的提高,主要是由此阶段二次水化引起的混凝土强度提高决定的。但由于胶层的包裹作用,一定程度上阻止了水泥的二次水化,所以,此阶段粘结承载力提高的幅度低于表面裸露混凝土强度的提高的幅度,且粘结承载力最大峰值出现的时间较晚(冻融循环 50 次)。随着冻融循环次数的增加,混凝土强度进入下降段。同时,冻融循环作用会扩大胶层表面初始的微缺陷,由于 CFRP 与混凝土的热膨胀系数差别较大<sup>[19]</sup>,温度在升降过程中胶层与混凝土会产生周期性的温度应力,降低其与混凝土的粘结效果,当达到一定程度即表现为粘结强度的降低。但由于胶层对混凝土的保护作用,界面层受冻融作用的损伤程度也低于表面裸露的混凝土,即界面粘结承载力下降的百分比小于相同循环次数下立方体抗压强度下降的百分比。

### 2.3 CFRP 的应变分布

图 7 和图 8 分别给出了未经受冻融损伤的试件和经受不同次数冻融循环作用的 CFRP 应变分布情况,应变曲线的斜率反映了相应阶段界面应变发展的速率。

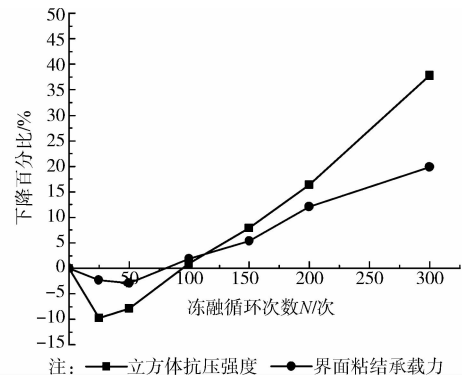


图 6 立方体抗压强度与界面粘结承载力下降百分比对比图  
Fig. 6 Comparison chart of cube compressive strength and interface bonding strength decreased percentage

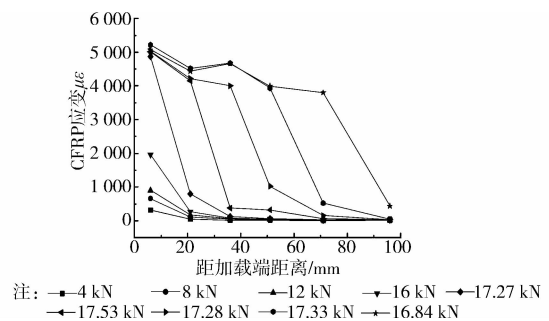


图 7 对比试件 CFRP 应变分布  
Fig. 7 Strain distribution of CFRP in contrast specimen

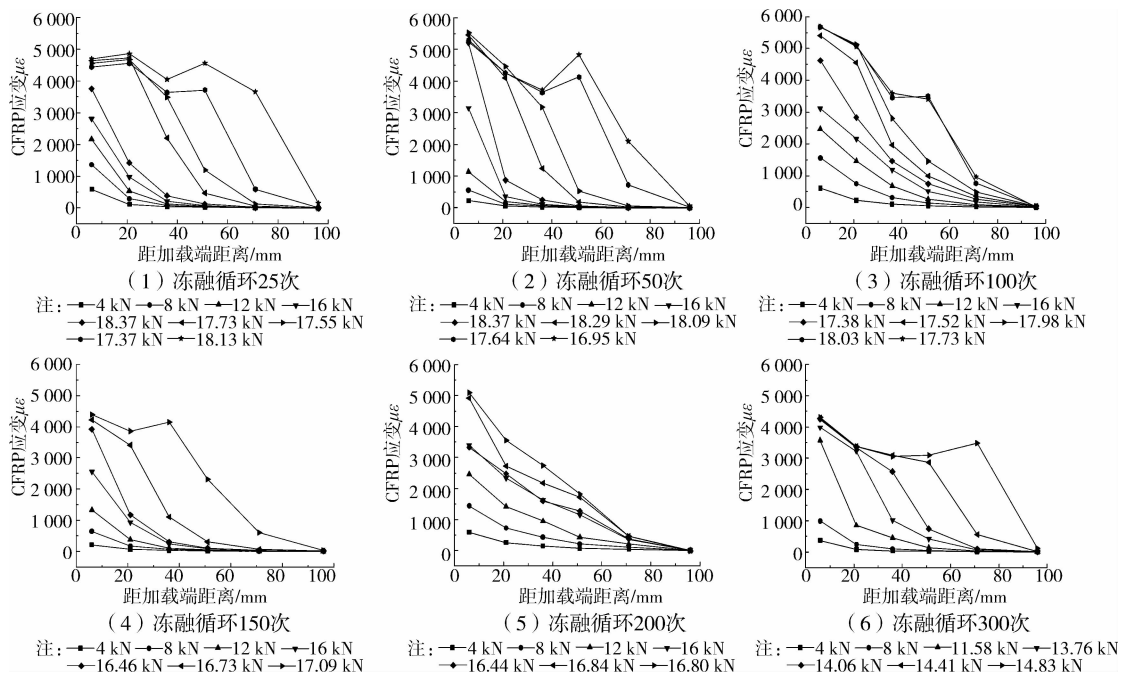


图 8 不同冻融循环次数下 CFRP 应变分布

Fig. 8 Strain distribution of CFRP under different freeze-thaw cycles

由图可见,各个试件沿粘结长度上的 CFRP 应变分布及发展规律大致相同。在加载初始阶段,与加载端较近部位的 CFRP 拉应变较大,距加载端较远处 CFRP 拉应变较小,荷载为 4 kN 时传递长度均约为 30 mm。这是因为此时荷载较小,只需距加载端较近局部区域内粘结界面的剪应力合力与之达到平衡。应变分布呈明显的下凹型曲线,应变发展较慢。随着荷载的增加,应变逐渐向距加载端较远处的自由端传递,应变分布曲线的下凹趋势逐渐减弱,加载端应变值的增长速度明显加快。从图 5 和图 6 中均可看出,距加载端最近的两个测点之间应变的斜率随荷载的增大先增大后减小,斜率达到最大时,表明加载端的剪应力达到峰值,裂缝开始出现,裂缝处 CFRP 与混凝土的有效粘结被破坏,CFRP 将拉力传向了未破坏的粘结界面,此时,界面的粘结滑移开始加快。荷载再继续增大,应变分布曲线开始向上凸,剪应力的分布也越来越均匀,应力由加载端快速向自由端传递。最终,CFRP 与混凝土之间发生一次性剥离破坏。

同时,通过对比图 7 和图 8 还可以发现,在加载早期(见图中 4~12 kN 曲线),随着冻融循环次数的增加,CFRP 应变更早地向自由端发展,这说明冻融循环作用对 CFRP-混凝土的粘结界面产生了不利的影响,降低了粘结界面的抗剪能力;而最终界面剥离时的应变发展(见图中第一测点的应变最大值)则有逐渐降低的趋势,这主要是由冻融循环对粘结面的破坏导致界面承载能力的降低造成的。

#### 2.4 荷载-端部滑移曲线

图 9 所示为典型的荷载-端部滑移关系曲线。可以看出,在加载初期,各曲线基本重合,但随着荷载的增加,不同次数冻融循环下荷载-滑移曲线的发展规律存在明显的差异。

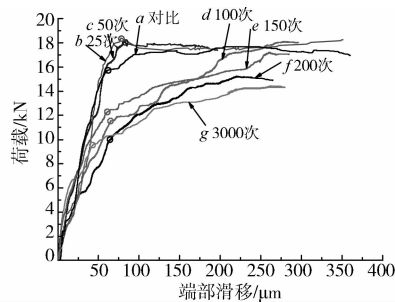


图 9 荷载-端部滑移曲线

Fig. 9 Curves for the load-end slip

经受冻融次数较少(对比试件、冻融 25 次以及冻融 50 次)的试件,界面发生很小的滑移后荷载就

达到了极限荷载的 90% 左右,这与文献[13]关于高强混凝土的试验结果类似。此阶段荷载-滑移曲线近似呈线性变化,由此可知,CFRP-混凝土界面的剪切应变与剪切应力呈线性变化,界面一直处于弹性状态。当荷载增加到某一临界值时,曲线上出现一个明显的拐点(图 9 中圆圈所示),表明界面上出现初始裂缝,粘结面发生剥离,所对应的荷载为初始开裂荷载。之后滑移量迅速增大,荷载则增加很少,甚至略有下降,直到界面完全破坏。另外,冻融 25 次和冻融 50 次试件的开裂荷载比对比试件有所提高,分别提高了 16% 和 14%,对刚度的影响则不明显。

经受 100 次以上冻融循环的试件,当荷载增加到 30%~50% 时,试件的端部滑移开始逐渐大于对比试件,刚度明显弱化,并逐渐表现出明显的非线性特征。与之前的试件相比,荷载-滑移曲线的形状发生了明显的变化。在较低的荷载水平下(约为极限荷载的 60% 左右),曲线就出现了明显的转折点,即出现初始裂缝,界面开始发生剥离。这与文献[11]和[13]所得普通混凝土的分析结果类似,实际上,由混凝土抗压强度试验结果(见表 2)可知,此时混凝土强度已降至普通混凝土的水平。随冻融次数的增加,破坏时的极限荷载和初始开裂荷载均有逐渐降低的趋势。但发生剥离后,随着滑移量的增加,荷载仍有较大幅度的增长。

另外,试验结果还表明,随着冻融次数的增加,达到破坏时,试件的端部最大滑移量总体上呈逐渐降低的趋势,如冻融 300 次后降低了 25% 左右,这说明冻融循环使 CFRP-混凝土粘结界面的脆性增高,变形能力降低。

### 3 结论

1) 由于水泥二次水化和冻融损伤的双重作用,随冻融循环次数的增加,高性能混凝土立方体抗压强度经历先增长后下降的变化过程。经历 25 次冻融循环后,混凝土抗压强度总体呈线性下降的趋势。

2) 各冻融循环次数下,CFRP-高性能混凝土界面破坏均发生在粘结界面下的混凝土表层内。且随着冻融循环次数的增加,破坏界面有向胶层发展的趋势。

3) 剪应力沿粘结长度的分布规律及端部滑移情况受冻融循环作用影响明显。剪应变分布和端部粘结-滑移共同反映出冻融循环对 CFRP-高性能混凝土界面刚度及强度的损伤规律。

4) CFRP-混凝土界面粘结极限承载力随冻融循环次数的变化与混凝土抗压强度的变化规律类似,

说明混凝土强度变化是粘结强度变化的重要因素,而其变化滞后及其变化幅度较小则是受胶层的作用影响。

#### 参考文献:

- [1] 张鹏,蒙文流,唐小林,等. 碳纤维加固修复混凝土结构的研究与应用[J]. 新型建筑材料,2005,32(2):9-14.  
Zhang P, Meng W L, Tang X L, et al. Research and application of carbon fiber reinforcement and repair of concrete structures [J]. New Building Materials, 2005, 32(2):9-14. (in Chinese)
- [2] 陈华,张鹏,康侃,等. CFRP板与混凝土间粘结性能试验[J]. 桂林理工大学学报,2010,30(1):66-70.  
Chen H, Zhang P, Kang K, et al. Experiment of delamination of CFRP plates bonded to concrete [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(1):66-70. (in Chinese)
- [3] Yao J, Teng J G, Chen J F, Experimental study on FRP to concrete bonded joints [J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(2):99-113.
- [4] 王新玲,杨佳佳,孙宏运,等. 基于梁式试验的CFRP布混凝土界面粘结滑移模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3):314-319.  
Wang X L, Yang J J, Sun H Y, et al. Experimental study on bond-slip model for CFRP-concrete interface based on beam test [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3):314-319. (in Chinese)
- [5] Bonacci J F, Maalej M. Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP [J]. Journal of Composites for Construction, 2001, 5(2):102-113.
- [6] Bisby L A, Green M F. Resistance to freezing and thawing of fiber-reinforced polymer-concrete bond [J]. ACI Structure Journal, 2002, 99(2):215-223.
- [7] Ahmad M A. De-bonding of FRP from concrete in strengthening applications experimental investigation and theoretical validation [D]. New York: The City University of New York, 2005.
- [8] Mukhopadhyaya U P, Swamy R N, Lynsdale C J. Influence of aggressive exposure conditions on the behaviour of adhesive bonded concrete-GFRP joints [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(8):427-446.
- [9] Subramaniam K V, Ali-Ahmad M, Ghosn M. Freeze-thaw degradation of FRP-concrete interface: Impact on cohesive fracture response [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75:3924-3940.
- [10] 管巧艳,高丹盈,李杉. 冻融循环作用后CFRP与混凝土粘结性能研究[J]. 工业建筑,2010,40(6):9-11.  
Guan Q Y, Gao D Y, Li S. Study on CFRP-concrete bond behavior subject to freeze-thaw cycles [J]. Industrial Construction, 2010, 40(6):9-11. (in Chinese)
- [11] 张悦悦,黄登科. 冻融环境对CFRP-混凝土界面粘结性能影响试验研究[J]. 公路交通科技,2014(5):185-187.  
Zhang Y Y, Huang D K. Experimental study on CFRP-concrete bond behavior under freeze-thaw environment [J]. Highway Traffic Science and Technology, 2014(5):185-187. (in Chinese)
- [12] 张勇,卜娜蕊,马国庆. CFRP加固混凝土梁的冻融试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2012,30(1):15-17.  
Zhang Y, Bu N R, Ma G Q. Experiment with the freeze-thaw of the concrete beams reinforced by CFRP [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2012, 30(1):15-17. (in Chinese)
- [13] 王苏岩,尹晓明,刘林. 持载作用下CFRP-高强混凝土界面的抗冻性能[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2009, 25(5):834-841.  
Wang S Y, Yin X M, Liu L. Research on freeze-thaw resistance behavior of bonded joints between CFRP and high strength concrete under sustained load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(5):834-841. (in Chinese)
- [14] Tuakta C, Buyukozturk O. Deterioration of FRP/concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanics [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(2):145-154.
- [15] 艾毅然,杨玉启,胡耀林. 高性能混凝土的抗冻性研究及其工程应用[J]. 建筑技术,2005,36(1):54-56.  
Ai Y R, Yang Y Q, Hu Y L. Research on project application on frost resistance of high performance concrete [J]. Architecture Technology, 2005, 36(1):54-56. (in Chinese)
- [16] 尹晓明. 荷载和冻融循环双重作用下CFRP-高强混凝土界面性能研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学, 2009.
- [17] Wu Y F, Yun Y C. Durability of CFRP-concrete joints under freeze-thaw cycling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(3):401-412.
- [18] 杨勇新,叶列平,岳清瑞. 碳纤维布与混凝土的粘结强度指标[J]. 工业建筑,2003,33(2):5-8.  
Yang Y X, Ye L P, Yue Q R. The bond strength index of CFRP and concrete [J]. Industrial Construction, 2003, 33(2):5-8. (in Chinese)
- [19] 朱晓玲. CFRP-混凝土界面粘结性能试验研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.