

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.038

# 冻融循环作用下 CFRP - 高强混凝土的界面行为

洪 雷, 张雨剑, 王苏岩

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:** 为了研究冻融作用对 CFRP - 高强混凝土界面性能的影响, 对冻融循环作用后的 CFRP - 高强混凝土试件进行了双面剪切试验, 并建立了基于混凝土塑性损伤模型的有限元模型, 对实验结果进行补充和对比讨论。结果表明: 冻融循环使 CFRP - 高强混凝土粘结性能呈劣化趋势, 且劣化速度在循环 150 次后加快; 随着冻融循环次数的增加, 极限端部滑移加速减少; 同样荷载条件下 CFRP 应变发展更快, 混凝土损伤深度增加。基于混凝土冻融本构与塑性损伤的有限元模型与试验结果有较好的吻合性, 可以作为 CFRP - 高强混凝土冻融作用下的预测模型。

**关键词:** CFRP; 高强混凝土; 冻融循环; 有限元模型; 耐久性

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0200-06

## The Interface Behavior of CFRP - High Strength Concrete Under Freeze-thaw Cycles

HONG Lei, ZHANG Yujian, WANG Suyan

(The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** In order to study the effect of freeze - thaw cycles on CFRP - high strength concrete, double-sided shear test was conducted under freeze-thaw cycles and finite element analysis was made based on concrete plasticity damage model to compare and discuss with the test results. The results show that bonding properties of CFRP - high strength concrete have deteriorated under the freeze-thaw cycle conditions, and deteriorated significantly after freeze-thaw cycles reached 150. When the cycles increase, limit end slip decreases as well as strain develop faster and the depth of concrete damage increase. The finite element model based on concrete plasticity damage model under freeze-thaw cycles was consistent with the experimental data and has better applicability, so it can be used as a prediction model of CFRP - high strength concrete under freeze-thaw cycles.

**Keywords:** CFRP; high strength concrete; freeze-thaw; finite element analysis; durability

在沿海地区, 混凝土结构建筑物受到冻融作用显著<sup>[1]</sup>, 而随着混凝土加固补强技术的应用, FRP - 混凝土结构在环境因素作用下的界面性能研究也得到广泛关注<sup>[2-4]</sup>。但相对于 FRP - 普通混凝土界面性能研究, FRP - 高强混凝土尤其是其在冻融作用下的相关研究相对较少, 加之现有试验条件的局限性以及混凝土材料自身的不均匀性和离散性, 单纯从试验结果进行分析可以得出的结论比较有限, 王苏岩等<sup>[5-6]</sup>采用双面剪切试验进行了研究, 发现在冻融循环作用下 CFRP - C60 混凝土界面性能有所

下降, 并且荷载与环境共同作用下界面性能劣化加快; 任慧韬等<sup>[7]</sup>对 FRP - 普通混凝土进行了抗冻耐久性试验, 发现仅在 50 次冻融循环作用下极限荷载就降低了 30%; Yun Y 等<sup>[8]</sup>也得到了类似的试验结果。

在有限元模拟方面, 常见的有限元建模方法有两种。一种是不考虑胶层的存在, 将混凝土和 FRP 材料直接固定在一起; 另外一种单独建立一层模拟胶层的单元, 将破坏面指定在胶层位置<sup>[9]</sup>。陆新征等<sup>[10]</sup>应用前者, 建立了精细有限元模型对 FRP - 混凝土结构进行数值模拟, 取得了较高的精度, 并建

立了三种界面粘结滑移本构模型;彭晖等<sup>[11]</sup>应用损伤力学和双线性黏聚力模型,通过三维黏聚单元对胶层进行模拟发现 FRP - 混凝土界面的剥离过程可以分为初期软化阶段、快速剥离阶段、平稳剥离阶段和瞬时剥离阶段等四个阶段;Chen J F 等<sup>[12]</sup>在有限元模拟中通过对 FRP 与混凝土宽度比、FRP 厚度和胶层厚度三个设计参数的控制分析了界面剪应力和正应力的变化规律;Tao Y 等<sup>[13]</sup>针对 FRP - 混凝土界面单剪试验提出了新的混凝土塑性损伤本构模型,对于界面剪切破坏模拟具有较好的适用性。

本文在 CFRP - 高强混凝土冻融循环试验的基础上,建立基于混凝土塑性损伤的预测模型,该模型

以混凝土经历冻融循环后的塑性损伤为主要参数,对试验结果进行预测和补充讨论。通过试验和有限元模拟的结果,可以加深对 CFRP - 混凝土界面行为在冻融循环作用下劣化情况的认识。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

制作尺寸为 100 mm × 100 mm × 150 mm 的 C60 长方体混凝土试块,其配合比见表 1。在试块相对两侧表面粘贴一条宽度为 50 mm 的 CFRP 布,加载边界上方预留 30 mm 的非粘结区,并沿纤维方向布置应变片,如图 1 所示。CFRP 的主要性能指标见表 2。

表 1 C60 混凝土配合比

材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )						减水剂 /%	引气剂 /%	砂率	水胶比
水	水泥	粉煤灰	硅灰	砂	石				
142	390	65	35	567	1151	0.65	0.15	0.35	0.29

表 2 CFRP 布性能指标

抗拉强度 /MPa	受拉弹性 模量/MPa	伸长率 /%	厚度 /mm	密度 /(g·m <sup>-2</sup> )
3848.5	2.4 × 10 <sup>5</sup>	1.7	0.167	300

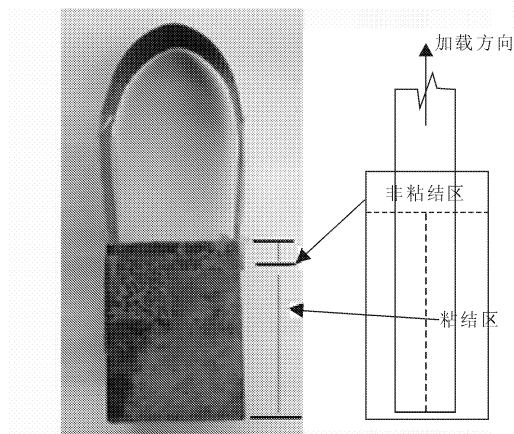


图 1 双剪试件

### 1.2 试验设计与结果

采用快冻法进行冻融循环试验,参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》<sup>[14]</sup>进行温度和周期控制,冻融循环的周期为 3 h,控制试件中心温度变化范围为(-17 ± 2)℃至(8 ± 2)℃,循环次数为 0 ~ 250 次,间隔 50 次,代号 F0 - F250。每个试验组 6 个试件,试验结果取平均值。

采用如图 2 所示的加载装置,对冻融后的试件进行双面剪切试验。试验采用 1 000 kN 电液伺服试

验机进行加载,加载速率约为 0.005 mm/s;采用德国制造 IMC 动态数据采集器采集数据;采用 5 kN 荷载传感器测量荷载;采用弓形应变计测量端部滑移;采用应变片测量 CFRP 的应变分布。根据实测的荷载滑移曲线,选择加载端部滑移为 0.5 mm 时的荷载值的一半作为测试面的极限荷载(对于端部滑移未达到 0.5 mm 就发生破坏的试件,取其端部滑移最大值所对应的荷载值)。

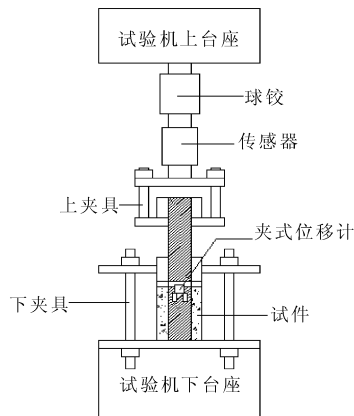


图 2 加载装置

试验得到的部分荷载滑移曲线见下节。通过对实验结果的统计(见下节)看出,随着冻融次数增加,CFRP - 高强混凝土的极限承载力等界面性能均有所降低。100 次以前,界面行为劣化不明显,在 150 以后,劣化速度显著加快。

## 2 基于混凝土塑性损伤的有限元模型

由于混凝土材料和胶层界面的不均匀性,导致试验结果尤其是应变分布曲线(见图 3)具有一定的波动性,可以得到的结论十分有限,因此本文建立了基于混凝土塑性损伤的有限元模型,对 CFRP-高强混凝土冻融下的界面行为进行数值分析。

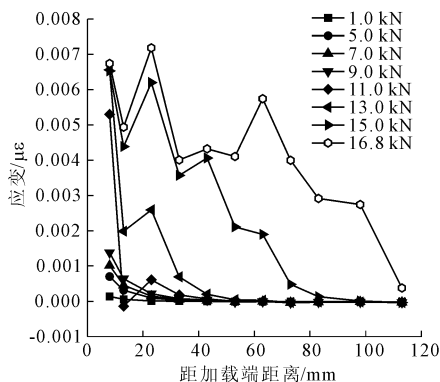


图 3 F200 试验应变分布曲线

### 2.1 模型的建立

采用 2D 平面应力模型,取试验模型的一半进行建模。混凝土单元采用 CPS4 单元模拟,因需要对损伤变量进行输出,故不使用缩减积分;FRP 材料采用 CPS4R 单元模拟。在粘结区将 CFRP 单元与混凝土单元进行绑定,在 FRP 加载端附近建立参考点并与 FRP 边界进行自由度耦合,用作加载和提取结果,模型装配与网格划分见图 4。

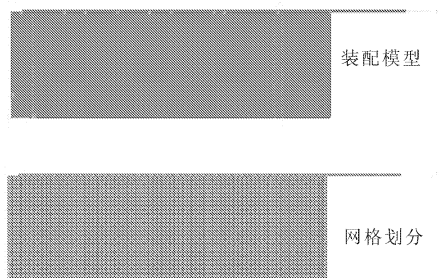


图 4 有限元模型及网格

### 2.2 混凝土塑性损伤模型的确定

混凝土塑性损伤模型是本文有限元模型进行模拟所需的重要参数。文献[15]建立了相对动弹模量损失率与冻融循环之间的关系:

$$\Delta E_n = -3.57 + 3.50e^{n/122} \quad (1)$$

式中: $\Delta E_n = \frac{E_0 - E_n}{E_0} \times 100\%$  为经  $n$  次冻融循环后试件相对动弹模量的损失率,其中  $E_n$  和  $E_0$  分别是

冻融循环  $n$  次和 0 次时的相对动弹模量。

在清华大学过-张混凝土模型<sup>[16]</sup>式(2)的基础上,建立了相对动弹模量损失率  $\Delta E_n$  与应力应变曲线参数  $a, b$  的关系,见式(3)。

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 \quad (x \leq 1)$$

$$y = \frac{x}{b(x - 1)^2 + x} \quad (x > 1) \quad (2)$$

$$a = -0.0143\Delta E_n + 1.744$$

$$b = 0.0796\Delta E_n + 1.582 \quad (3)$$

以及动弹模量损失率  $\Delta E_n$  与混凝土劈裂抗拉强度之间的关系:

$$\Delta f_t = -0.6423\Delta E_n + 98.007 \quad (4)$$

本文的混凝土配合比与文献[15]十分相近,故采用以上公式作为确定混凝土塑性损伤模型参数的依据,并采用《混凝土结构设计规范》<sup>[17]</sup>(GB 50010-2010)所推荐的损伤参数计算方法,分别计算 F0-F250 的混凝土塑性损伤参数,采用有限元软件 ABAQUS 进行计算。

### 2.3 有限元模拟结果

图 5、图 6 展示了部分有限元模拟结果与实测荷载位移曲线的对比。由于数值模拟不会像试验一样发生突然破坏,故在确定有限元模拟的极限端部滑移时,以粘结区末端混凝土单元开始产生损伤为标准。可以发现,有限元模拟曲线与试验曲线有着十分良好的吻合性。试验承载力略高于模拟承载力,这是由于在试验过程中存在机械咬合力和加载速率,这些因素都会导致试验结果高于理想状态的数值模拟。另外,有限元模拟曲线的刚度要高于试验曲线,这是由于在有限元模型中忽略了胶层的存在,将 CFRP 与混凝土直接绑定,使界面的初始刚度大于试验值。模拟曲线的形状也符合 Mali-Ahmad 等<sup>[18]</sup>测得的标准荷载-端部滑移曲线,即荷载值在线性上升段后有小幅下降,之后以缓慢的幅度震荡上升。

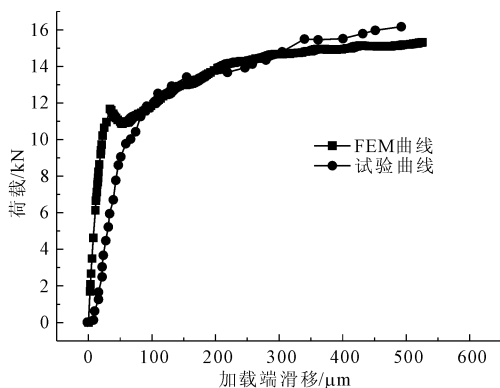


图 5 F0 荷载位移曲线对比

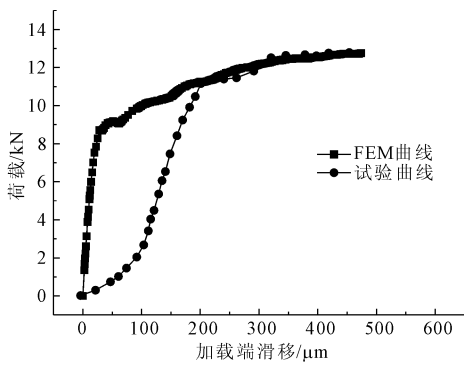


图 6 F250 荷载位移曲线对比

图 7 显示了有限元模拟的 F0、F150、F200、F250 的荷载位移曲线,由图 7 可以看出,冻融循环使软化荷载(荷载值线性增长的最大值)及极限荷载均有所下降,且随着循环次数增加,下降速度有所加快。这与高强混凝土在冻融循环下所表现出的性质基本一致。值得注意的是,在冻融循环之后,下降段逐渐平滑,这与试验结果所体现的也较为一致。因此可以判断,本文所使用的建模方法以及混凝土塑性本构选择是可以作为 CFRP - 高强混凝土冻融循环作用下界面性能研究使用的。

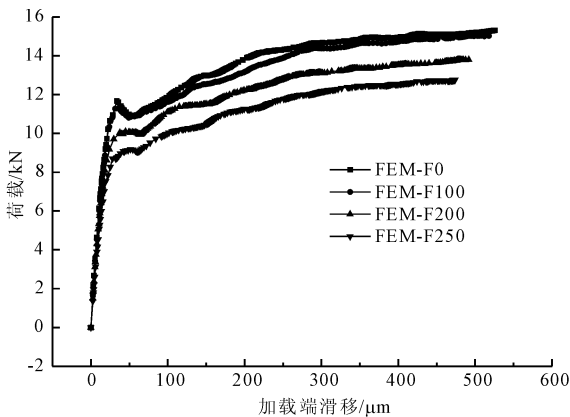


图 7 模拟结果对比

图 8 显示了 F200 的应变分布发展曲线,可以看出,在达到软化阶段之前,应变分布基本成线性,在达到软化阶段后,应变在靠近自由端的区域会出现小幅度的波动,这是由于混凝土开裂损伤的不连续性造成的。图 9 显示了 F50 试验应变曲线与模拟值的比较,在相同荷载值下,应变分布基本一致。已经进入剥离状态的粘结区应变分布图 10 展示了当加载到 13 kN 时应变有限元模型的应变分布情况,可以看出,在相同荷载的作用下,高冻融次数的试件应变发展更为迅速。在发展完全的应变分布曲线中,

取接近线性分布的中间一段作为有效粘结长度,本文取应变分布曲线上自加载端开始,应变值开始加速下降的位置至应变值小于  $1 \times 10^{-4}$  的位置之间的长度作为有效粘结长度,如图 11、图 12 所示。经统计发现,随冻融次数增加,有效粘结长度略有增加,从 56 mm 增加至 60 mm,这说明粘结界面因冻融产生了劣化,导致荷载需要更大的传递长度。对模拟与试验结果的详细统计见表 3。

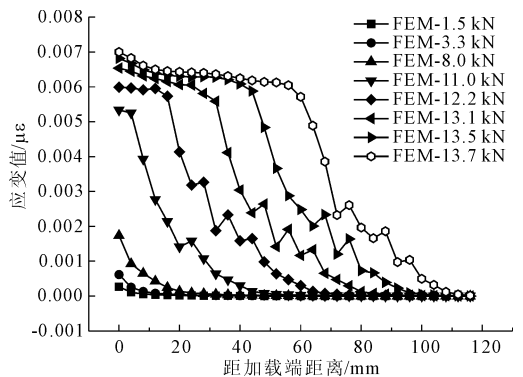


图 8 F200 模拟应变分布曲线

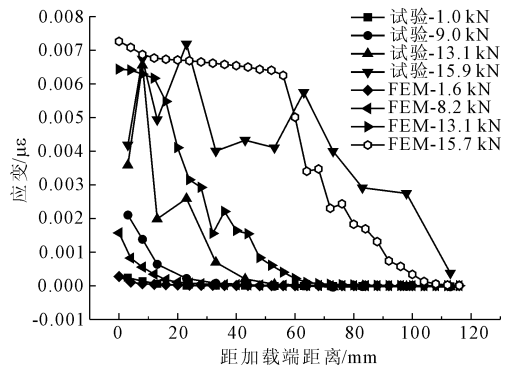


图 9 F50 试验结果与模拟应变分布对比

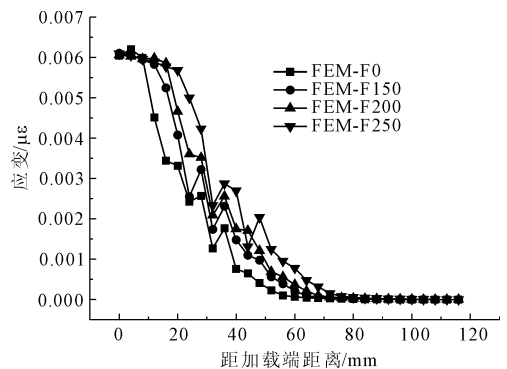


图 10 模拟应变分布对比(13.7 kN)

图 13 是 F200 模拟在加载过程中的塑性应变值(PE)分布图与试验破坏形式对比。最大塑性应变分布即可以代表混凝土发生剥离破坏的位置,数值模拟的破坏模式基本符合试验所测得的混凝土浅层

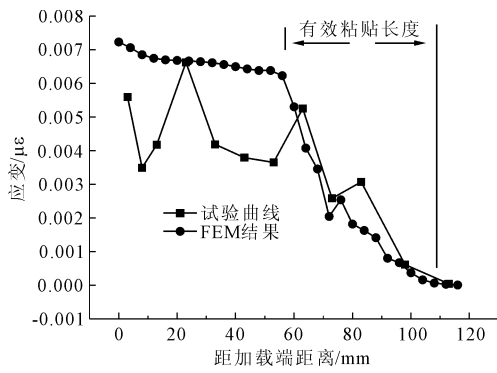


图 11 F100 15.0 kN 应变分布

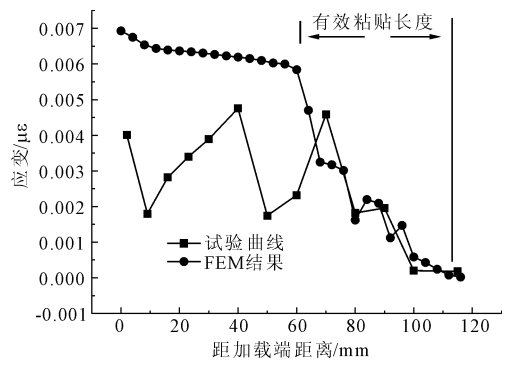


图 12 F250 12.9 kN 应变分布

表 3 试验与模拟结果统计

冻融循环编号	极限荷载/kN		极限滑移/kN		有效粘结长度/mm		屈服比	
	试验	FEM	试验	FEM	试验	FEM	试验	FEM
F0	16.82	15.31	572.62	527.56	78	56	0.59	0.76
F50	16.71	15.15	492.37	519.47	51	56	0.74	0.76
F100	16.76	15.02	467.54	517.95	58	56	0.67	0.75
F150	16.02	14.28	436.42	515.21	54	56	0.71	0.75
F200	14.67	13.08	461.02	497.75	61	60	0.77	0.77
F25012.50	12.76	473.20	474.63	56	60	0.96	0.72	
最大误差/%	10.8		18.1		28.2		25.0	

剥离破坏。图 14 显示了有限元分析 F0 与 F250 加载过程的损伤发展,图 15 是有限元模拟粘结区末端混凝土损伤发展图,对比发现,加载相同端部滑移,经历冻融的试件损伤发展更快,且损伤深度要高于未经冻融循环的试件。可见,虽然 FRP - 高强混凝土破坏模式为浅层混凝土剥离,但是混凝土损伤的发展却可以深入到混凝土表层下 1 cm ~ 2 cm,而且冻融循环一定程度上会增大损伤深度,这要求给混凝土加固设计工作前要考虑混凝土保护层的厚度以及环境状况。

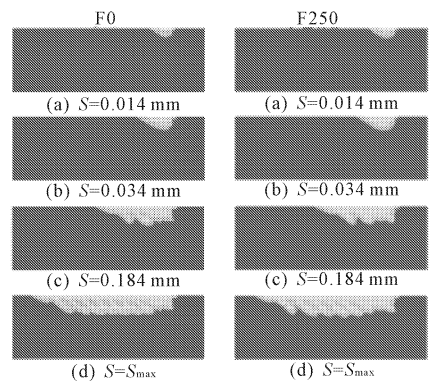


图 14 损伤发展图

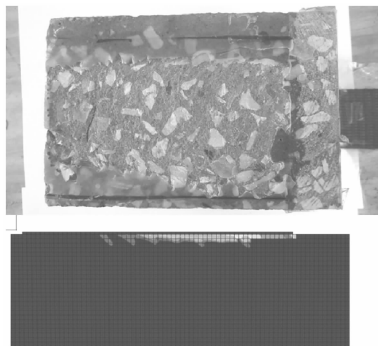


图 13 最大塑性应变图

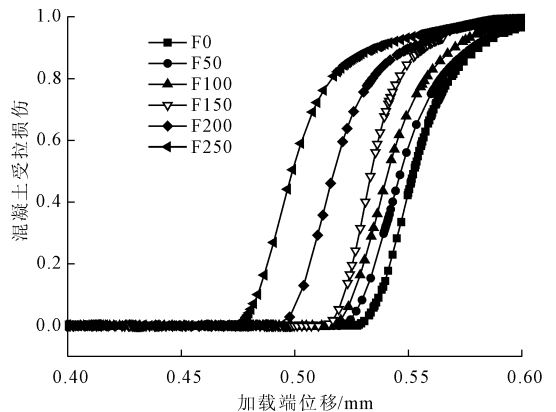


图 15 损伤发展模拟曲线

### 3 结 语

(1) 冻融循环使 CFRP-高强混凝土界面承载力有所降低,且降低速度随冻融循环次数增加而加快。

(2) 在 CFRP-混凝土有限元模型中,考虑冻融循环对混凝土本构关系产生的影响,可以实现对冻融循环作用下 CFRP-高强混凝土界面性能的模拟,模拟得到的荷载滑移曲线以及应变分布曲线与试验值十分接近,具有较好的适用性和预测性。

(3) 冻融循环使 CFRP-高强混凝土极限端部滑移降低,有效粘结长度略有增加,屈强比(软化荷载/极限荷载)降低。

(4) 在同样加载条件下经历了冻融的试件应变发展更快,混凝土损伤深度增加。

#### 参考文献:

- [1] Böer P, Holliday L, Kang H K. Interaction of environmental factors on fiber-reinforced polymer composites and their inspection and maintenance: a review[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(2): 209-218.
- [2] Subramaniam K V, Ghosn M, Ali-Ahmad M. Impact of Freeze-Thaw Degradation on FRP - Concrete Interface Fracture[M]. Advances in Construction Materials 2007. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 419-426.
- [3] 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(13): 3924-3940.
- [4] 王吉中,张 建.海洋环境下 CFRP-混凝土粘结性能的试验研究[J].水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 51-55.
- [5] 王苏岩,尹晓明,刘 林.冻融环境下 CFRP-高强混凝土抗剪性能试验研究[J].建筑结构学报, 2008(S1): 176-180.
- [6] 王苏岩,张所东,李璐茜,等.海水干湿循环作用下

CFRP\_高强混凝土黏结性能研究[J].大连理工大学学报, 2015, 55(2): 166-170.

- [7] 任慧韬,胡安妮,赵国藩.纤维增强塑料与混凝土粘结抗冻融性能研究[J].大连理工大学学报, 2003, 43(4): 495-499.
- [8] 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.
- [9] 徐 涛,唐春安,张永彬,等.FRP-混凝土界面剥离破坏过程并行数值模拟[J].固体力学学报, 2011, 32(1): 89-94.
- [10] 陆新征,叶列平,滕锦光,等.FRP片材与混凝土粘结性能的精细有限元分析[J].工程力学, 2006, 23(5): 74-82.
- [11] 彭 晖,高 勇,唐雪松,等.FRP-混凝土界面损伤演化过程数值模拟[J].建筑结构, 2015, 45(9): 103-107.
- [12] Chen J F, Teng J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete[J]. ASCE. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 784-791.
- [13] Tao Y, Chen J F, Asce M. Concrete damage plasticity model for modeling FRP - to - Concrete bond behavior[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 45(9): 1-13.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法:GB/T 50082 - 2009[S].北京:中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] 邹超英,赵 娟,梁 锋,等.冻融作用后混凝土力学性能的衰减规律[J].建筑结构学报, 2008, 29(1): 117-123.
- [16] 过镇海.混凝土的强度和变形[M].北京:清华大学出版社, 1997: 22-39.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范标准:GB 50010 - 2010[S].北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] Ali-Ahamed M, Subramaniam K, Ghosn M. Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets[J]. Journal of engineering mechanics, 2006, 132(9): 914-923.