

# 碱冻耦合作用 FRP 加固混凝土 性能损伤机理

徐文远, 李 微, 王大洋, 纪泳丞

(东北林业大学 土木与交通学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 探究了碳/玄武岩/玻璃/芳纶纤维增强混凝土在强碱溶液和冻融耦合作用下的劣化规律, 对圆柱轴压构件采用纤维增强复合材料 (FRP) 全加固, 棱柱受弯构件为局部加固, 测试碱冻耦合作用下试件的质量损失率、动弹性模量、pH 值变化、抗压和抗折强度。结果表明, 碳纤维和芳纶纤维强化试件在质量损失率、动弹性模量、抗压强度损失和塑性、抗折承载力损失均优于玻璃纤维和玄武岩纤维强化试件。基于试验数据修正了碱冻耦合作用 FRP 加固混凝土的 Lam-Teng 本构模型。

**关键词:** 结构工程; 纤维复合材料; 混凝土; 耐久性

**中图分类号:** TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-2050-13

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231016

## Damage mechanism of FRP reinforced concrete under alkali freezing coupling effect

XU Wen-yuan, LI Wei, WANG Da-yang, JI Yong-cheng

(School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The degradation law of carbon/basalt/glass/aramid fiber-reinforced concrete under strong alkali solution and freeze-thaw coupling was explored. Fiber reinforced polymer (FRP) was used for full reinforcement of cylindrical axial compression members, and local reinforcement was used for prismatic bending members. The mass loss rate, dynamic elastic modulus, pH value change, compressive and flexural strength of the specimens under alkali frost coupling were tested. The results show that carbon fiber and aramid fiber reinforced specimens have better quality loss rate, dynamic elastic modulus, compressive strength loss, plasticity, and flexural bearing capacity loss than glass fiber and basalt fiber reinforced specimens. Based on experimental data, the Lam Teng constitutive model of FRP reinforced concrete with alkali frost coupling effect was modified.

**Key words:** structural engineering; fiber composite materials; concrete; durability

收稿日期: 2023-09-21.

基金项目: 黑龙江省交通运输厅科技项目 (2021-HLJ-0021).

作者简介: 徐文远 (1969-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 混凝土结构与材料, 道路环境与安全.

E-mail: xuwenyuan@nefu.edu.cn

通信作者: 纪泳丞 (1986-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 桥梁结构与材料. E-mail: yongchengji@126.com

## 0 引言

混凝土作为世界上使用最频繁的建筑材料之一,所处环境的复杂性加速了本身的力学性能退化速率<sup>[1,2]</sup>。对既有混凝土的结构加固以及由于用途改变对新建混凝土结构的承载力提高,一直是学者们的研究热点。传统的拆除重建或者增大截面等方法,不仅造成环境污染,还减少结构物的有效利用空间。纤维增强复合材料(FRP)本身具有强度高、耐腐蚀及质量小等特点,用其加固混凝土可提高力学强度,延长使用寿命,是一种绿色环保、非常有前途的结构修复加固方法。

由于混凝土在不同建筑领域的广泛应用,FRP加固混凝土结构可能经常暴露在高温、冻融(FT)条件以及许多其他恶劣环境中。暴露于pH值为13.2的溶液中的玄武岩纤维复合材料(BFRP)棒材的层间和横向剪切强度分别比pH值为10.1的棒材低47.08%和6.17%<sup>[3]</sup>。Kim等<sup>[4]</sup>在80℃时将GFRP浸泡在碱性溶液中,试样拉伸强度分别比将GFRP浸泡在自来水和质量分数为3%的NaCl溶液中的试样低15.7%和20.3%。D'Antino等<sup>[5]</sup>发现,GFRP棒材在碱性更强的溶液中的残余强度保持率较低。

近些年来,大量专家学者对纤维布加固混凝土开展大量的试验研究。一部分学者主要研究其力学性能及破坏机理。宋萌萌等<sup>[6]</sup>探讨纤维布层数和混凝土强度等参数对应力-应变曲线以及韧性的影响规律。Golham等<sup>[7]</sup>发现纤维布效应可有效提高结构的抗弯承载力、刚度和使用荷载下的挠度。Elwakkad等<sup>[8]</sup>研究玻璃纤维加固自密实混凝土扭转作用下的力学性能,通过有限元模拟分析加固构件的破坏模式、应力分布和极限荷载等。此外,一部分学者主要研究纤维加固混凝土的耐久性能。王海良等<sup>[9]</sup>研究3种化学侵蚀(酸、碱和盐)环境下玄武岩纤维布加固混凝土的抗弯性能,分析纤维布层数和侵蚀溶液浓度影响下的结构性能退化趋势。李江林等<sup>[10]</sup>对比不同CFRP加固混凝土修复方式,揭示氯盐侵蚀下不同修复方式下构件界面的破坏机理。

本文选取4种代表性的纤维布(碳纤维布、玄武岩纤维布、玻璃纤维布和芳纶纤维布),考虑寒区混凝土结构真实工作环境,探讨碱-冻融耦合侵蚀作用下纤维布结构的加固效果,研究纤维布加固混凝土在寒区化学侵蚀环境中的性能劣化规律,可为实际工程应用提供理论依据。

## 1 试验及方法

### 1.1 原材料

混凝土采用C30配合比,由水泥、碎石、砂子加入水拌和而成。其中,水泥采用普通硅酸盐P·O 32.5R,碎石取自本地砂石厂,粒径范围为5~20 mm,砂子的细度模量为2.4,为中砂,取自本地河沙。

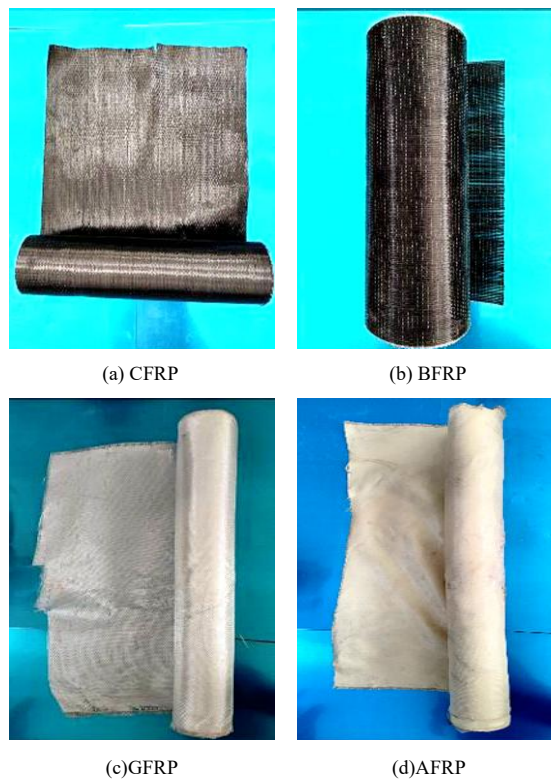


图1 纤维增强复合材料

Fig. 1 Fiber reinforced polymer

本文选取4种代表性纤维增强复合材料(FRP)进行混凝土加固,即碳纤维复合材料(CFRP)、玄武岩纤维复合材料(BFRP)、玻璃纤维复合材料(GFRP)、芳纶纤维复合材料(AFRP),如图1所示。纤维复合材料与混凝土的界面通过环氧树脂胶进行粘结。表1显示了4种纤维复合材料以及环氧树脂胶的基本力学指标。

表1 纤维复合材料和环氧树脂胶性能

Table 1 Properties of fiber composites and epoxy resin adhesives

材料	强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
CFRP	3 520	267	1.78
BFRP	3 000	120	1.60
GFRP	2 500	80	2.3
AFRP	2 106	117.8	1.75
环氧树脂胶	54.3	2.7	2.25

### 1.2 试件制备过程及编号

根据表 2 的 C30 配合比制作混凝土试件,试件分别制作直径为 100 mm、高 200 mm 的圆柱试件,以及长 100 mm、宽 100 mm、高 400 mm 的棱柱试件,试件放入养护室养护 24 h 后脱模并在标准条件下养护 28 d。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix ratio						kg/m <sup>3</sup>
材料	水	水泥	中砂	碎石		含量
				5~10 mm	10~20 mm	
	209.0	387.0	635.0	350.7	818.3	

选取 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱试件,使用切割机在跨中受拉侧切割 40 mm 高槽口。采用湿粘法在槽口分别粘贴宽 100 mm、长 300 mm 的 FRPs,用于进行弯曲试验。选取圆柱试件,采用湿粘法在圆柱外部粘贴 FRPs,用于进行抗压试验。按照 FRP 类别、冻融次数进行分组和编号,详细编号如表 3 所示。

表 3 试件编号

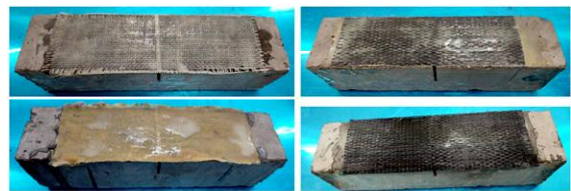
Table 3 Specimen numbers			
纤维布类型	碱冻 0 次	碱冻 50 次	碱冻 100 次
CFRP	P-C-F0	P-C-F50	P-C-F100
BFRP	P-B-F0	P-B-F50	P-B-F100
GFRP	P-G-F0	P-G-F50	P-G-F100
AFRP	P-A-F0	P-A-F50	P-G-F100
对照组	C-0	C-50	C-100

湿粘法粘贴纤维布:将纤维布粘贴在混凝土材料的外表面,首先将试件外表面打磨平整,然后将环氧树脂胶均匀涂抹至试件外层表面,最后迅速将碳纤维布粘贴至试件表面,涂刷时顺着纤维布一个粘贴方向涂抹压实,反复挤压并排出纤维布与试件间的气泡。粘贴好 FRPs 的试件分别如图 2(a)(b)所示。

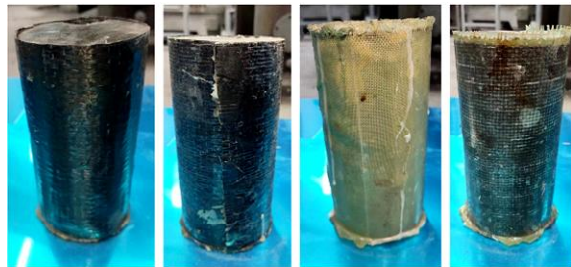
### 1.3 环境条件

Bonacci 等<sup>[11]</sup>报道 FRP 与混凝土基体的剥离是 FRP 加固结构最常见的破坏模式。盐碱地在中国分布广泛,土壤中的碱极易随水分渗入道路、桥梁和建筑物,影响结构物的使用寿命。因此,FRP 加固混凝土在碱性环境中的耐久性需要考虑。

为了探究 FRP 加固混凝土结构在冻融循环和碱腐蚀的双重作用下的劣化,本研究进行了碱



(a)棱柱试件



(b)圆柱试件

图 2 试件

Fig. 2 Sample

环境中 FRP 加固混凝土的冻融循环试验。冻融试验按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能实验方法标准》进行,采用速冻法进行冻融循环试验,试验设备如图 3(a)所示。冻融时设置冻融温度为高温 18℃,低温 -18℃,完成一次冻融循环试验时间为 3 h。FRP 加固圆柱试件和棱柱试件分别被冻融 0、50、100 次后取出并分析。这些分析包括质量测试和相对动弹性模



(a)冻融循环试验机



(b)弹性模量测试



(c)质量测试



(d)pH值测试

图 3 试验设备

Fig. 3 Test equipment

量测试。弹性模量测试和质量测试装置分别如图3(b)(c)所示。

当溶液pH值达到13时,FRP复合材料吸湿性增强,导致严重劣化,为碱骨料反应创造了条件,而冻融循环加速了这一反应,导致混凝土吸水膨胀<sup>[12]</sup>。Kuroda等<sup>[13]</sup>用2 mol/L的NaOH溶液的加速试验条件来判断从结构获得的混凝土芯的残余膨胀性。冻融时,为了加速材料的劣化,将FRP加固圆柱试件和棱柱试件置于2 mol/L的NaOH溶液中,模拟使FRP加固混凝土劣化的碱环境,分别被冻融0、50、100次后测试NaOH溶液的pH值,pH测试装置如图3(d)所示。

#### 1.4 质量损失和pH值测试

采用动弹模量测定仪对棱柱体试件进行动弹模量的测试,测试按照规范(GB/T 50082—2009)规定进行,并按规范标准提供的试件每隔50次冻融循环后的横向基频。根据式(1)计算相对动弹模量。

$$p_i = \frac{f_{ni}^2}{f_{oi}^2} \quad (1)$$

式中: $p_i$ 为 $n$ 次冻融循环后第 $i$ 个试件的相对动弹模量,%; $f_{ni}^2$ 为 $n$ 次冻融循环后第 $i$ 个试件的横向基频,Hz; $f_{oi}^2$ 为冻融循环试验前第 $i$ 个试件的横向基频初始值,Hz。

按照GB/T 50082—2009的规定,各试件每隔50次冻融循环后的质量损失率应按下式计算:

$$\Delta W_{ni} = \frac{\Delta W_{oi} - \Delta W_{mi}}{\Delta W_{oi}} \times 100 \quad (2)$$

式中: $\Delta W_{ni}$ 为 $n$ 次冻融循环后第 $i$ 个试件的质量损失率,%; $W_{oi}$ 为冻融循环试验前第 $i$ 个试件的质量,kg; $W_{mi}$ 为 $n$ 次冻融循环后第 $i$ 个试件的质量,kg。

#### 1.5 力学试验

对圆柱试件进行抗压试验,对棱柱试件进行抗折试验,万能试验机如图4(a)所示。试验方法依据规范《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行。在圆柱的轴压试验过程中,采用0.5 MPa/s的速度施加荷载,抗压试验布置图如图4(b)所示。预制裂缝混凝土棱柱采用四点弯曲试验,并采用0.02 MPa/s的速度施加荷载,抗折试验布置如图4(c)所示,记录试件在加载过程中的荷载位移数据。

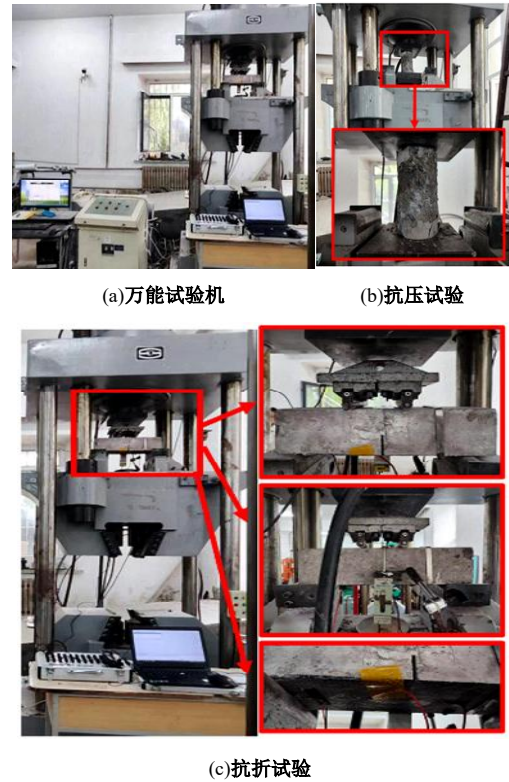


图4 力学试验

Fig. 4 Mechanical test

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 试件的表面侵蚀状况

#### 2.1.1 棱柱试件表面侵蚀状况

图5显示了不同FRP加固混凝土棱柱试件在强碱性溶液中不同冻融次数下的表面形态。可以看到,在强碱性溶液的冻融作用下,任何FRP加固试件FRP树脂颜色变亮,表面纹理变得粗糙。此外,BFRP和GFRP的树脂在强碱性溶液中色泽变亮最为明显。这与文献[14]的结论可以相互验证,高碱含量可以降解FRP的树脂。就表面情况而言,碳纤维加固试件(P-C)和芳纶纤维加固试件(P-A)好于玄武岩纤维加固试件(P-B)和玻璃纤维加固试件(P-G)。从侧面来看BFRP、GFRP加固试件边缘区图像,纤维/基体界面出现脱粘和部分断裂。这种连续脱粘和部分断裂的发展可能提供了更多的空间和通道,并促进了暴露于两种溶液的FRP额外的水分吸收。

证据表明,在碱性环境中,玻璃/玄武岩纤维都具有腐蚀壳和点蚀的降解特征<sup>[15]</sup>。本研究冻融强碱性作用中也发现了玻璃/玄武岩纤维都具有明显腐蚀壳。

碱性环境下玻璃/玄武岩纤维腐蚀壳的形成

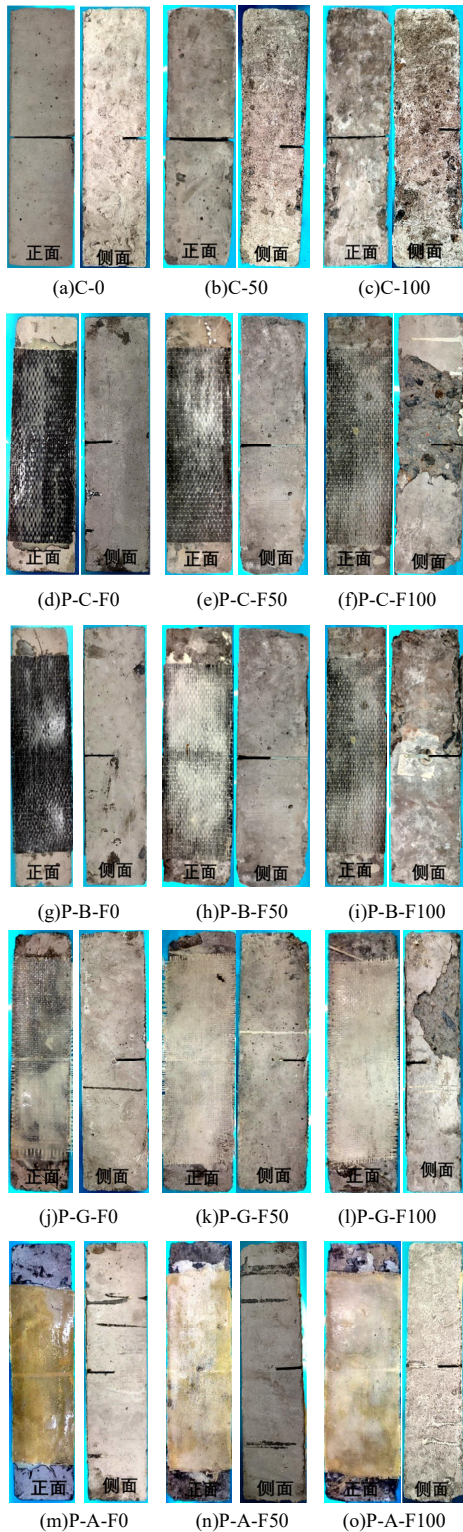
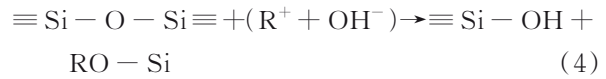
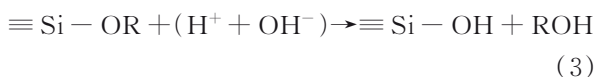


图 5 FRPs 加固混凝土横柱试件的表面情况  
Fig. 5 Surface condition of FRP reinforced concrete prism specimens

是碱离子与纤维中的硅酸盐发生反应(式(3)),随后硅酸盐网络被破坏并逐渐溶解(式(4))<sup>[16]</sup>。



### 2.1.2 圆柱试件的表面侵蚀状况

图 6 显示了不同 FRP 加固混凝土棱柱试件在强碱性溶液中不同冻融次数下的表面形态。与棱柱试件有相同的现象,在强碱性溶液的冻融作用下,随着冻融次数增加,FRP 加固试件 FRP 树脂颜色变亮,表面纹理变得粗糙。与棱柱试件不同,由于圆柱试件的侧面被 FRPs 全包裹,底面、顶面也被树脂胶所保护,因此圆柱试件的表面情况好于棱柱试件。

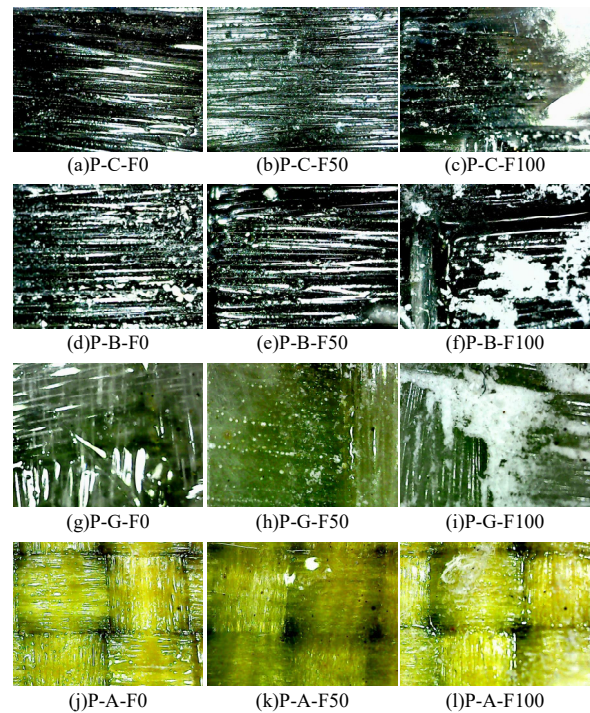


图 6 FRPs 加固混凝土圆柱试件的表面情况

Fig. 6 Surface condition of FRP reinforced concrete cylindrical specimens

## 2.2 质量损失率及溶液 pH 值

### 2.2.1 圆柱试件质量损失率

表 4 列出了未加固和 FRPs 加固混凝土在不同冻融下圆柱试件的质量。图 7 显示强碱溶液中不同冻融次数下混凝土结构的质量损失率。随着冻融循环次数增加,FRP 加固混凝土试件的质量增加,而未加固混凝土的质量先增大后减小,达到了 3.5%。这是因为 FRP 限制了混凝土的剥落,而强碱性溶液中 FRP 发生严重劣化(树脂水解、纤维蚀刻、纤维-基体脱粘等),导致更多的微缺陷,从而促进水的渗透。对于对照组试件,强碱性环境为碱骨料反应提供了条件,促进混凝土吸收

表 4 圆柱试件的质量  
Table 4 Mass of cylindrical specimens

组别	质量/kg		
	冻融 0 次	冻融 50 次	冻融 100 次
P-C	3.645	3.655	3.664
P-G	3.595	3.614	3.623
P-B	3.65	3.662	3.671
P-A	3.645	3.669	3.679
对照组	3.565	3.575	3.425

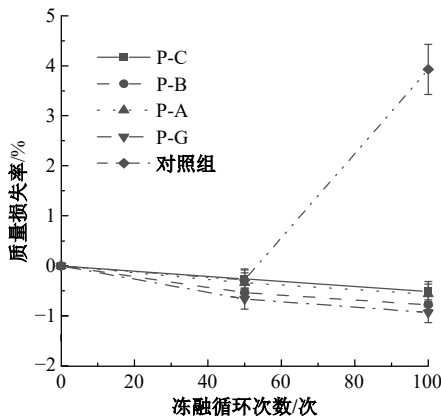
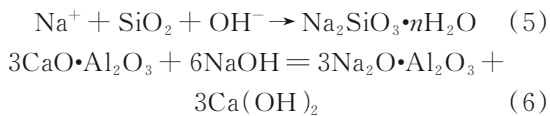


图 7 FRPs 加固及对照组圆柱试件的质量损失率

Fig. 7 Mass loss rate of cylindrical specimens reinforced with FRP and control group

的水分子,导致试件质量增大(见式(5));碱性环境促进了未水化的硅酸盐反应进一步水化,也增大了试件的质量(见式(6))。冻融达到 100 次时,碱溶液与混凝土的反应(碱骨料反应、硅酸盐水化反应)和混凝土孔隙水分子的冻胀作用使混凝土表面砂浆、骨料剥落,剥落的质量大于总的吸水质量,导致对照组试件质量的减小。在暴露于强碱性溶液中的 BFRP 和 GFRP 试件会发生连续脱粘和部分断裂的可能,提供了更多的空间,并促进 FRP 加固试件的水分吸收。



2.2.2 棱柱试件质量损失率

表 5 列出了未加固和 FRPs 加固混凝土在不同冻融次数下棱柱试件的质量变化。根据式(2)的处理得到强碱溶液中不同冻融次数下混凝土结构的质量损失率,如图 8 所示。随着冻融次数的增加,FRP 加固试件的质量损失率先减小后增大。这与圆柱试件表面全保护不同,棱柱试件单面粘贴 FRP 强化混凝土限制强碱腐蚀和冻融耦合作用有限,侧面没有粘贴 FRP 混凝土完全暴露

表 5 对照组和 FRPs 加固混凝土棱柱试件的质量  
Table 5 Quality of control group and FRP reinforced concrete prism specimens

组别	质量/kg		
	冻融 0 次	冻融 50 次	冻融 100 次
P-C	9.565	9.575	9.500
P-B	9.615	9.644	9.498
P-A	9.650	9.674	9.566
P-G	9.345	9.383	9.213
对照组	9.450	9.498	9.298

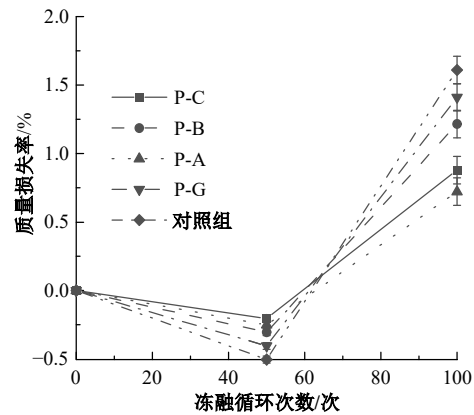


图 8 FRPs 加固及对照组棱柱试件的质量损失率

Fig. 8 Mass loss rate of prism specimens reinforced with FRP and control group

在强碱性溶液中,在冻融过程中混凝土表面砂浆和骨料剥落。冻融初期,各组试件的质量增加,主要是两方面原因。一方面,当溶液的 pH 值在 13.2 时 FRP 复合材料的吸湿性强,发生严重劣化(树脂水解、纤维蚀刻、纤维-基体脱粘等),导致更多的微缺陷,从而促进水的渗透<sup>[16]</sup>。另一方面,试验中 pH 值高于 12 的环境为碱骨料反应创造了条件,冻融循环加速了碱骨料反应,混凝土吸水膨胀<sup>[17]</sup>。同时,NaOH 溶液与混凝土中未水化的硅酸盐反应,生成硅酸钙胶凝体,导致试件质量增加。

冻融 100 次时,质量损失率按照从小到大排序为:AFRP 加固试件、CFRP 加固试件、BFRP 加固试件、GFRP 加固试件、对照组。

2.2.3 碱溶液 pH 值

图 9 显示了冻融过程中强碱性溶液的 pH 值变化。可以看到,随着冻融次数的循环,NaOH 溶液 pH 值逐渐增加。一方面是由于水分子进入试件提高了碱溶液的浓度所导致的。另一方面,在冻融循环过程中也会导致水分损失。但整体来说,pH 值的变化并不大,最大差值仅为 0.18。这

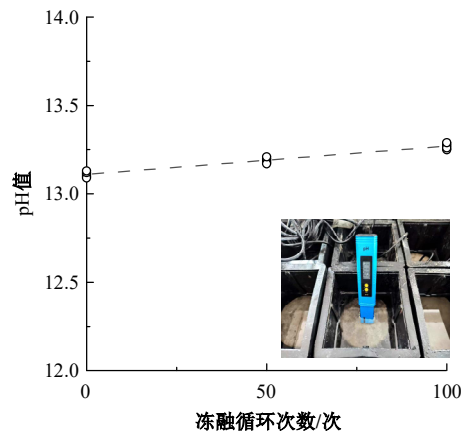


图 9 冻融过程中 NaOH 溶液的 pH 值变化

Fig. 9 Changes in pH value of NaOH solution during freeze-thaw process

是试件冻融时间较短以及碱溶液中的水分子进入混凝土中导致的。

### 2.3 动弹性模量

横向基频是指在横向方向上,混凝土试件在受到外力作用下,产生的最低共振频率。该频率为横向固有频率,也是弹性特性的重要指标。

从表 6 可以看到,各试件的冻融循环前的初始横向基频为 1 171~1 802 Hz,低于普通混凝土试件的基频<sup>[18]</sup>,这是由于本文使用的混凝土试件在试件中间预置了槽(裂缝),开槽导致混凝土试件刚度下降。

表 6 不同冻融次数下各组试件的横向基频

Table 6 Transverse fundamental frequencies of each group of specimens under different freeze-thaw cycles

组别	横向基频/Hz		
	冻融 0 次	冻融 50 次	冻融 100 次
P-C	1 717	1 616	1 461
P-G	1 797	1 672	1 500
P-B	1 758	1 647	1 492
P-A	1 802	1 676	1 493
对照组	1 727	1 589	1 416

基于表 6 各组试件的横向基频,通过式(1)计算各组试件的相对动弹性模量。图 10 绘制了不同冻融次数下各组试件的动弹性模量。结果表明,不同纤维布类型加固的试件的动弹性模量表现出相似的规律。随着冻融次数的增加,试件的动弹性模量逐渐降低。素混凝土的动弹性模量降低得最多,在冻融 100 次时,素混凝土冻弹性模量降低了 18.0%。此外,各组试件的动弹性模量变化规律都很接近(各组试件 100 次动弹性模量的

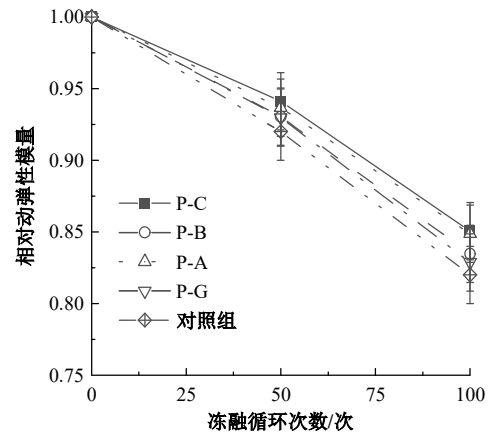


图 10 对照组和 FRP 加固混凝土的相对弹性模量

Fig. 10 Relative elastic modulus of control group and FRP reinforced concrete

最大差值为 3.5%),纤维布的加固并没有明显提升试件的弹性模量。这是因为进行动弹性模量试验的棱柱试件,只在一个侧面粘贴了纤维布,能够限制 OH<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 和水分子进入混凝土中的能力有限。在强碱性溶液中,FRP 能够被降解以及纤维/基体界面出现脱粘,都会使更多的水分子、OH<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 进入核心混凝土。混凝土内部的孔隙水分子冻胀作用会破坏混凝土的内部结构,也会导致混凝土弹性模量降低。从结果来看,P-C 和 P-A 试件的动弹性模量损失率低于 P-B 和 P-G 试件。

### 2.4 力学试验结果

#### 2.4.1 抗压强度

图 11 显示了 FRP 加固试件及对照试件典型的抗压破坏。可以看到,CFRP/BFRP 表现为中部开裂。因为随着压力的增大,两端的摩擦力随着增大,中间的鼓胀会越来越大,最终从中间部位先破坏。对于 AFRP 破坏,表现出很强的延性,破坏部位的 AFRP 逐渐开裂,与其他 FRPs 的脆性破坏不同,该破坏与其本身更小的孔有关。对于 GFRP,其在强碱性溶液中的降解现象较为明显,色泽变亮,其破坏图也证实了这一观点。对照组的破坏表现为混凝土碎裂,原因是本身并没有 FRP 的增强,又受到了碱冻腐蚀的影响。

表 7 显示了 FRP 加固试件及对照组试件抗压强度及冻融 100 次强度损失率。根据表 7 的数据绘制了 FRP 加固试件及对照组试件抗压强度柱状图(见图 12)。由图 12 可以看到,随着冻融和碱腐蚀时间的增加,各组试件的抗压强度均在一定程度上被削减。与冻融 0 次的初始强度相比,冻



图 11 FRPs 加固试件及对照组试件抗压破坏状态  
Fig. 11 Compressive failure state of FRP reinforced specimens and control group specimens

融强度损失率从小到大依次为:CFRP 加固试件、AFRP 加固试件、GFRP 加固试件、BFRP 加固试件、对照组。其中,CFRP 加固试件的冻融腐蚀 100 次强度损失最小,仅为 7.1%,GFRP 加固试件和 BFRP 加固试件冻融腐蚀 100 次强度损失非常接近。AFRP 加固试件冻融腐蚀的初始强度低于 GFRP 加固试件和 BFRP 加固,但冻融腐蚀 100 次后三者强度值非常接近。

表 7 各组试件抗压强度及冻融 100 次强度损失率  
Table 7 Compressive strength and freeze-thaw strength loss rate of each group of specimens after 100 cycles

组别	平均抗压强度/MPa			冻融 100 次试件强度损失率/%
	冻融 0 次	冻融 50 次	冻融 100 次	
P-C	46.8	40.4	43.5	7.1
P-B	40.0	37.5	27.4	31.5
P-G	40.2	27.6	32.3	31.3
P-A	35.4	27.6	31.3	11.6
对照组	9.6	13.6	7.9	41.9

图 13 显示了各组试件的单轴压缩应力应变曲线。随着冻融循环和腐蚀的进行,试件的极限承载力依次降低。对照组试件的是典型的混凝土应力应变曲线。P-C、P-B 组试样的曲线更加接近,在试样受压达到最大抗压强度后,其强度迅速下降,这两组试件表现为脆性破坏。P-G 组试件的本构曲线与对照组相似,具有一定的塑性。然而,P-A 组试件在试件受压快接近抗压强度时,变形很大,强度提升缓慢,具有良好的塑性。就塑

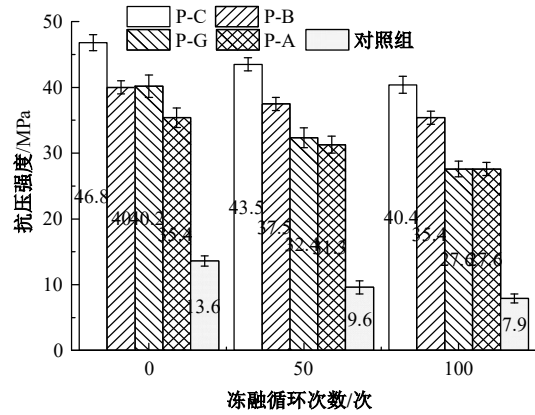


图 12 FRPs 加固试件及对照组试件抗压强度  
Fig. 12 Compressive strength of FRP reinforced specimens and control group specimens

性的优差排序依次为 P-A、P-G、对照组、P-B、P-C。

此外,P-C 的抗弯性能相对于素混凝土试件分别提高了 244.1%、320.8%、450.1%,如图 13(a)所示。P-B 在 0、50、100 次冻融循环时的抗弯特性相对于素混凝土试样分别提高了 194.1%、246.8% 和 290.6%,如图 13(b)所示。P-A 和 P-G 试样的承载力曲线表现了较好的塑性。同时,P-G 在 0、50、100 次冻融循环时的抗弯特性相对于素混凝土试样分别提高了 195.6%、236.4% 和 249.4%,如图 13(c)所示。P-A 在 0、50 和 100 次冻融循环时的抗弯特性相对于素混凝土试样分别提高了 160.3%、226.0% 和 249.3%,如图 13(d)所示。各组试件相比于对照组的承载力提升都在增加,这说明在冻融腐蚀过程中,FRP 对混凝土起到了良好的保护作用。各组试件相对于对照组极限承载力的增加主要是由于 FRP 限制了素混凝土的横向变形并起到加固作用。

#### 2.4.2 抗折强度

表 8 显示了 FRP 加固试件及对照组试件抗折承载力及冻融 100 次承载力损失率。根据表 8 的数据绘制了 FRP 加固试件及对照组试件抗折承载力柱状图(见图 14)。由图 14 可见,不同冻融碱腐蚀次数下各组抗折承载力有相同的规律,P-C > P-B > P-G > P-A > 对照组。明显看到,粘贴纤维布极大地提高混凝土的抗折承载力。冻融碱腐蚀 100 次时,与对照组相比,P-C-F100、P-B-F100、P-G-F100、P-A-F100 分别提高了 384.1%、279.5%、225%、195%。随着冻融腐蚀次数的增加,各组试件均表现抗折承载力下降。

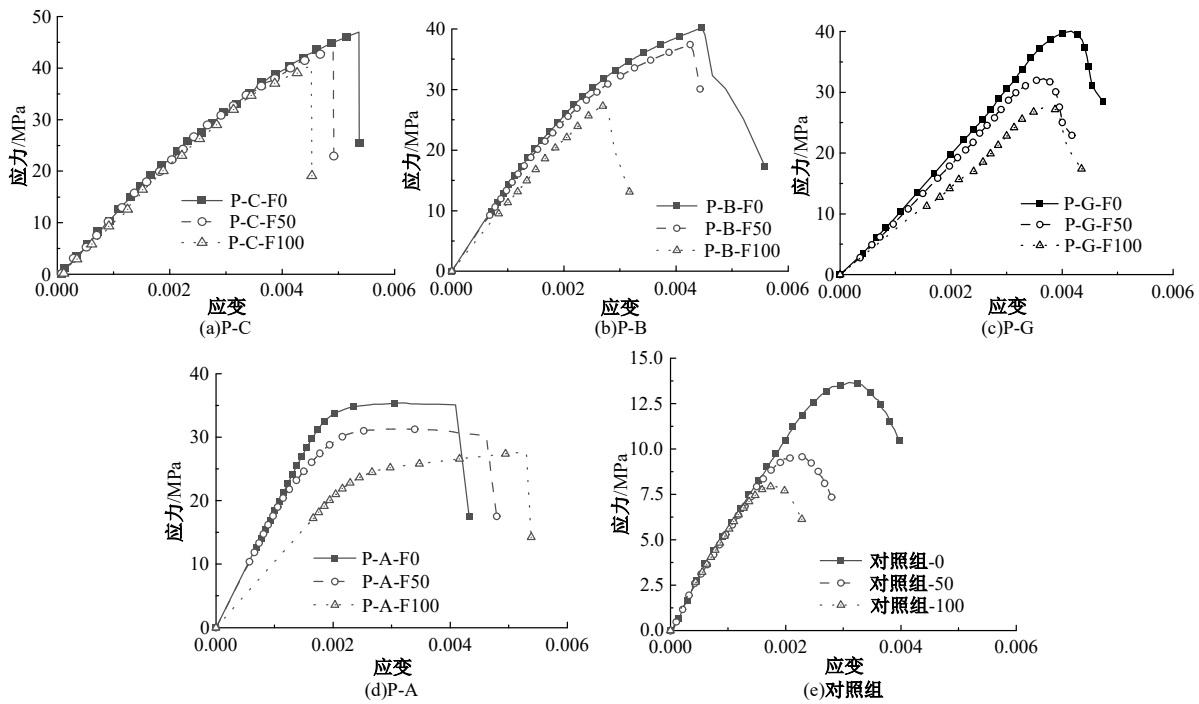


图 13 各组试件的应力应变曲线

Fig. 13 Stress-strain curves of each group of specimens

表 8 试件抗折承载力及冻融 100 次承载力损失率

Table 8 Flexural bearing capacity and freeze-thaw capacity loss rate of the specimen after 100 cycles

组别	平均抗压强度/MPa			冻融 100 次试件 强度损失率/%
	冻融 0 次	冻融 50 次	冻融 100 次	
P-C	27.50	23.10	21.3	17.1
P-B	20.52	18.64	16.7	18.6
P-G	18.50	16.70	14.3	22.7
P-A	15.90	14.90	13.0	18.2
对照组	6.30	5.60	4.4	30.2

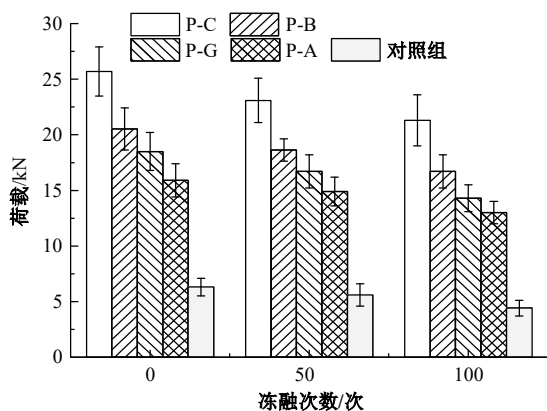


图 14 FRPs 加固试件及对照组试件抗折承载力

Fig. 14 Flexural bearing capacity of FRP reinforced specimens and control group specimens

冻融腐蚀 100 次时各组试件承载力损失率显示在表 8, 从小到大依次为 P-C、P-A、P-B、P-G、对照组。

图 15 显示了各组试件的荷载位移曲线。素混凝土试件的曲线缓慢上升, 然后突然下降, 如图 15(e) 所示。弯曲试验结果表明, 0、50、100 次冻融循环的试件极限承载力依次降低。P-C 和 P-B 试样的曲线也由上升段和快速下降段组成。P-C 的抗弯性能相对于素混凝土试件分别提高了 307.9%、312.5%、384.1%, 如图 15(a) 所示。P-B 在 0、50、100 次冻融循环时的抗弯特性相对于素混凝土试样分别提高了 225.7%、232.9% 和 179.5%, 如图 15(b) 所示。P-A 和 P-G 试样的承载力曲线表现了较好的塑性。同时, P-G 在 0、50、100 次冻融循环时的抗弯特性相对于素混凝土试样分别提高了 193.7%、198.2% 和 225.0%, 如图 15(c) 所示。P-A 在 0、50、100 次冻融循环时的抗弯特性相对于素混凝土试样分别提高了 152.4%、166.0% 和 195.4%, 如图 15(d) 所示。各组试件相比于对照组的承载力提升都在增加, 与抗压试验有着类似的结果。

### 2.5 本构关系模型

力学性能是混凝土材料宏观性能中最重要的性能, 而本构关系的研究是对混凝土力学性能深

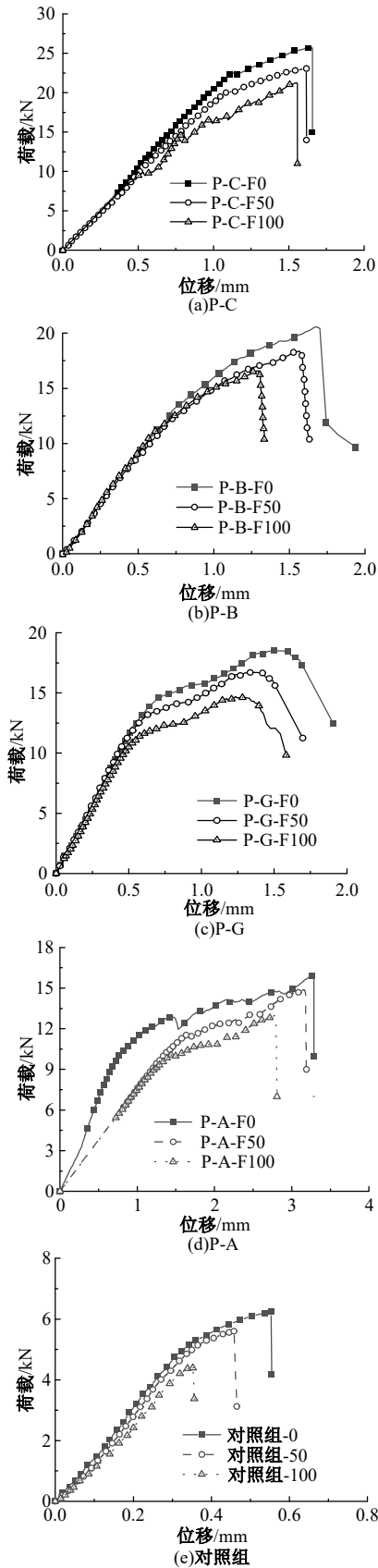


图 15 FRPs 加固试件及对照组试件荷载位移曲线  
Fig. 15 Load displacement curves of FRP reinforced specimens and control group specimens

人的认识。掌握材料的本构关系对材料进行数值模拟是必要的。Lam-Teng 模型<sup>[19]</sup>根据 FRP 约束混凝土的变形特点,认为变形曲线由抛物线段和直线段组成,两段线之间光滑连接。本文基于 Lam-Teng 模型研究碱冻耦合作用 FRP 加固混凝土的本构关系。Lam-Teng 模型即:

$$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_0} \epsilon_c^2, \quad 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_t \quad (7)$$

$$\sigma_c = f_0 + \epsilon_c E_2, \quad \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_c$  和  $\epsilon_c$  分别为 FRP 约束混凝土的压应力和压应变;  $E_c$  为无约束混凝土的弹性模量;  $E_2$  为强化直线段斜率;  $f_0$  为直线段反向延长线在应力轴上的截距;  $\epsilon_t$  为抛物线与直线连接处的应变;  $\epsilon_{cc}$  为约束后混凝土对应于  $f_{cc}$  的极限点应变,其中,  $f_{cc}$  为 FRP 约束混凝土试件的抗压强度。

由抛物线与直线连接处斜率相等的条件得:

$$\epsilon_t = \frac{2f_0}{E_c - E_2} \quad (9)$$

强化直线段斜率为:

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_0}{\epsilon_{cc}} \quad (10)$$

为了探究碱冻耦合作用对 FRP 加固混凝土的抗压强度、极限应变的关系,根据试验数据,拟合了碱冻耦合作用对 FRP 加固混凝土的抗压强度、极限应变公式,如图 16 所示。由图 16 可得到不同 FRP 加固混凝土的抗压强度、极限应变与冻融次数的关系。

CFRP 加固混凝土抗压强度、极限应变随碱冻耦合作用方程分别为:

$$f_{cC} = 46.8 - 0.068r + 0.0004r^2$$

$$\epsilon_{c1} = (5.36 - 0.00964r + 0.0000123r^2) \times 10^{-3}$$

BFRP 加固混凝土抗压强度、极限应变随碱冻耦合作用方程分别为:

$$f_{bB} = 40.0 - 0.094r - 0.00032r^2$$

$$\epsilon_{c2} = (4.46 - 0.00432r + 0.0001304r^2) \times 10^{-3}$$

GFRP 加固混凝土抗压强度、极限应变随碱冻耦合作用方程分别为:

$$f_{gG} = 40.2 - 0.1879r + 0.000618r^2$$

$$\epsilon_{c3} = (4.16 - 0.00822r + 0.0000395r^2) \times 10^{-3}$$

AFRP 加固混凝土抗压强度、极限应变随碱冻耦合作用方程分别为:

$$f_{aA} = 35.4 - 0.086r + 0.00008r^2$$

$$\epsilon_{c4} = (3.68 - 0.00043r + 0.000159r^2) \times 10^{-3}$$

根据图 13 的 FRP 加固混凝土的应力应变曲线,提取未进行碱冻耦合作用的应力应变曲线特

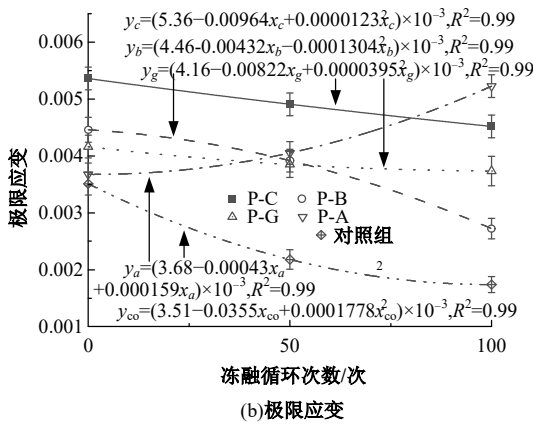
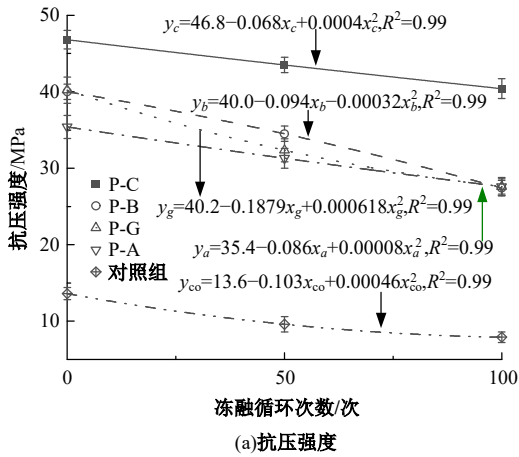


图 16 各组试件的抗压强度、极限应变的拟合公式

Fig. 16 Fitting formulas for compressive strength and ultimate strain of each group of specimens

征参数。表 9 列举了部分应力应变曲线参数。将表 9 的参数代入式(7)~(10),绘制试验与计算曲线对比,如图 17 所示。可以看到试验结果与计算结果吻合良好,Lam-Teng 模型能够较好地模拟 FRP 加固混凝土的本构关系。

表 9 应力应变曲线参数

Table 9 Parameters of stress-strain curve

组别	$E_c$	$f_0$	$\epsilon_t$	$f_{cc}/\text{MPa}$	$\epsilon_{cc}$
P-C-F0	13 000	9.9	0.003 2	46.8	0.005 36
P-G-F0	14 800	15.0	0.002 4	40.2	0.004 16
P-B-F0	11 500	5.0	0.002 8	40.0	0.004 46
P-A-F0	18 200	32.2	0.002 1	35.4	0.003 51

为了研究碱冻耦合作用的 FRP 加固混凝土的本构模型,在 Lam-Teng 模型的基础上进行了修正。基于 FRP 加固混凝土的抗压强度、极限应变与冻融次数的关系,结合式(7)~(10)得到不同 FRP 加固混凝土碱冻耦合作用下,FRP 加固混凝土材料的应力应变曲线修正 Lam-Teng 模型方程,如表 10 所示。

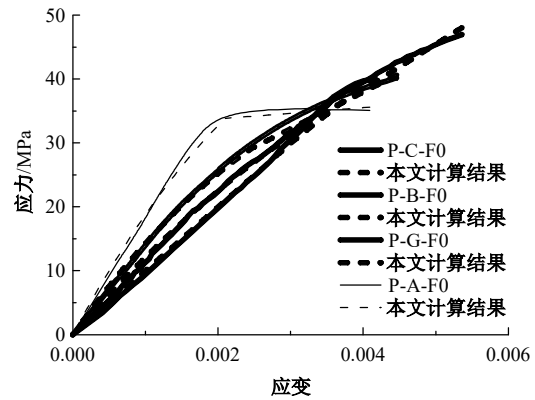


图 17 计算和试验的应力应变曲线对比

Fig. 17 Comparison of stress-strain curves between calculation and experiment

表 10 修正 Lam-Teng 模型方程

Table 10 Revised Lam-Teng model equation

编号	应力应变曲线
P-C	$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c \epsilon_{cc} - f_c + f_0)^2}{4f_0} \epsilon_c^2, 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_t;$ $\sigma_c = f_0 + \epsilon_c \frac{f_c - f_0}{\epsilon_{cc1}}, \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc1}$
P-B	$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c \epsilon_{cc} - f_B + f_0)^2}{4f_0} \epsilon_c^2, 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_t;$ $\sigma_c = f_0 + \epsilon_c \frac{f_B - f_0}{\epsilon_{cc2}}, \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc2}$
P-G	$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c \epsilon_{cc} - f_G + f_0)^2}{4f_0} \epsilon_c^2, 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_t;$ $\sigma_c = f_0 + \epsilon_c \frac{f_G - f_0}{\epsilon_{cc3}}, \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc3}$
P-A	$\sigma_c = E_c \epsilon_c - \frac{(E_c \epsilon_{cc} - f_A + f_0)^2}{4f_0} \epsilon_c^2, 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_t;$ $\sigma_c = f_0 + \epsilon_c \frac{f_A - f_0}{\epsilon_{cc4}}, \epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cc4}$

### 3 结 论

(1)对于棱柱试件,碱冻耦合作用后 P-B 和 P-G 都具有腐蚀壳和点蚀的降解特征,就表面情况而言,P-C 和 P-A 好于 P-B 和 P-G;圆柱试件的侧面被 FRPs 全包裹,碱冻耦合作用后圆柱试件的表面情况好于棱柱试件。

(2)对于圆柱试件,经过冻融和碱腐蚀耦合作用后 P-B 和 P-G 试件的质量高于 P-C 和 P-A 试件的质量。对于棱柱试件,质量损失率从小到大依次为:AFRP 加固试件、CFRP 加固试件、BFRP 加固试件、GFRP 加固试件、对照组。随着冻融次数的循环,NaOH 溶液 pH 依次增加,pH 值的整体变化并不大,最大差值仅为 0.18。

(3)各组试件的动弹性模量都很近(各组试件

100次动弹性模量的最大差值仅为3.5%);P-C和P-A试件的动弹性模量损失率低于P-B和P-G试件。

(4)100次冻融碱腐蚀后抗压强度损失率从小到大依次为:CFRP加固试件、AFRP加固试件、GFRP加固试件、BFRP加固试件、对照组。抗压应力应变曲线的塑性的优差排序依次为P-A、P-G、对照组、P-B、P-C。100次冻融碱腐蚀后抗折承载力损失率从小到大依次为:P-C、P-A、P-B、P-G、对照组。各组试件相比于对照组的抗压强度、承载力提升都在增加,这说明在冻融腐蚀过程中,FRPs对混凝土起到了良好的保护作用。

(5)提取了素试块和粘贴FRP试块的力学参数(压应力、压应变、弹性模量),计算了(Lam-Teng)应力应变曲线并与试验曲线进行验证,结合峰值应力、应变随耦合冻融次数的关系,建立耦合冻作用FRP加固混凝土的Lam-Teng本构模型。

#### 参考文献:

- [1] 魏亚,孔维康,万成,等. 比色法检测受火后混凝土损伤程度[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(1): 233-244.  
Wei Ya, Kong Wei-kang, Wan Cheng, et al. Colorimetry method in assessing fire-damaged concrete [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (1): 233-244.
- [2] 李艺,姬胜鹏. 冬期施工混杂纤维混凝土宏观性能及微观结构[J]. 吉林大学学报:工学版, 2019, 49 (3): 781-787.  
Li Yi, Ji Sheng-peng. Macro-properties and micro-structure of hybrid fiber reinforced concrete in winter construction [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49 (3): 781-787.
- [3] Yi Y, Guo S, Li S, et al. Effect of alkalinity on the shear performance degradation of basalt fiber-reinforced polymer bars in simulated seawater sea sand concrete environment[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: No. 123957.
- [4] Kim H Y, Park Y H, You Y J, et al. Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions[J]. Composite Structures, 2008, 83(1): 37-47.
- [5] D'Antino T, Pisani M A, Poggi C. Effect of the environment on the performance of GFRP reinforcing bars [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 141: 123-136.
- [6] 宋萌萌,吴文飞,周恒. 不同应变率下碳纤维布约束混凝土单轴压缩力学性能试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2023(6): 80-87.  
Song Meng-meng, Wu Wen-fei, Zhou Heng. Experimental study on the mechanical properties of concrete confined by carbon fiber cloth under uniaxial compression at different strain rates [J]. Composites Science and Engineering, 2023(6): 80-87.
- [7] Golham M A, Al-Ahmed A H A. Behavior of GFRP reinforced concrete slabs with openings strengthened by CFRP strips[J]. Results in Engineering, 2023, 18: No. 101033.
- [8] Elwakkad N Y, Heiza K M, Mansour W. Experimental study and finite element modelling of the torsional behavior of self-compacting reinforced concrete (SCRC) beams strengthened by GFRP[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02123.
- [9] 王海良,王博,杨新磊,等. 酸、碱、氯盐对玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 建筑结构, 2015, 45(9): 81-85, 55.  
Wang Hai-liang, Wang Bo, Yang Xin-lei, et al. Effect of acid, alkaline, and chlorine salt on the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by basalt fiber cloth [J]. Building Structure, 2015, 45(9): 81-85, 55.
- [10] 李江林,谢建和,陆中宇,等. 氯盐环境下碳纤维布加固受损钢筋混凝土构件界面耐久性研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 124-129.  
Li Jiang-lin, Xie Jian-he, Lu Zhong-yu, et al. Durability of interface between CFRP and damaged RC members under chloride environment [J]. Industrial Construction, 2019, 49 (9): 124-129.
- [11] Bonacci J F, Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams[J]. Structural Journal, 2000, 97(5): 703-711.
- [12] Alzebaree R, Gülsan M E, Nis A, et al. Performance of FRP confined and unconfined geopolymer concrete exposed to sulfate attacks[J]. Steel and Composite Structures, 2018, 29(2): 201-218.
- [13] Kuroda T, Inoue S, Yoshino A, et al. Effects of ac-

- celerated test conditions on ASR expansion of concrete core[J]. Bulletin of the Graduate School of Engineering/Faculty of Engineering, Tottori University, 2012, 42: 31-39.
- [14] Guo F, Al-Saadi S, Raman R K S, et al. Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment[J]. Corrosion Science, 2018, 141: 1-13.
- [15] Rybin V A, Utkin A V, Baklanova N I. Corrosion of uncoated and oxide-coated basalt fibre in different alkaline media[J]. Corrosion Science, 2016, 102: 503-509.
- [16] Scheffler C, Förster T, Mäder E, et al. Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: evaluation of the failure stress by Weibull distribution function[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2009, 355(52-54): 2588-2595.
- [17] 鲁丽华, 陈四利, 宁宝宽, 等. 酸碱和冻融双重腐蚀下混凝土力学效应的试验研究[J]. 公路, 2006(8): 154-158.
- Lu Li-hua, Chen Si-li, Ning Bao-kuan, et al. Experimental study on mechanical effects of concrete under acid-base and freeze-thaw dual corrosion [J]. Highway, 2006(8): 154-158.
- [18] Ji Y, Wang D. Durability of recycled aggregate concrete in cold regions[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01475.
- [19] Lam L, Teng J G. Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(5): 612-623.