DOI:10.11918/202308064

极地低温下 CFRP 筋与混凝土黏结性能数值分析

谢 剑[1,2],王雪寒[1],刘 洋[1,3]

(1.天津大学 建筑工程学院,天津 300350;2.滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学),天津 300350;3.中国铁路设计集团有限公司,天津 300308)

摘 要: 为进一步了解极地低温下碳纤维增强复合材料(CFRP)筋与混凝土的黏结性能,在现有试验的基础上,采用 ABAQUS 软件建立考虑 CFRP 筋表面特征的数值模型,分析 64 种工况,研究低温下 CFRP 筋直径、肋高、肋宽与混凝土保护层厚度等参数对黏结性能的影响。结果表明:考虑 CFRP 筋表面特征的数值模型可以较好地表征 CFRP 筋与混凝土之间的应力传递,能够反映低温下 CFRP 筋与混凝土的损伤情况与黏结破坏机制;低温可显著提高 CFRP 筋-混凝土的黏结强度;在低温下,随着 CFRP 筋直径的增加,CFRP 筋与混凝土的黏结强度降低,同时弱化了低温对黏结强度的增强效应;随着 CFRP 筋肋高的增加,CFRP 筋-混凝土的低温黏结强度呈现先提高后降低的趋势,肋高为筋材直径8%时黏结强度达到最大值;CFRP 筋肋宽的变化主要影响黏结滑移曲线的形状;相比常温试件,在低温下试件发生拔出破坏时的混凝土保护层厚度更大。

关键词: 碳纤维增强复合筋;极地低温;混凝土;黏结性能;数值模拟

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2024)10-0001-13

Numerical analysis on bonding performance between CFRP bar and concrete at polar low temperatures

XIE Jian[1,2], WANG Xuehan[1], LIU Yang[1,3]

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300350, China; 3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to further study the bonding performance of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bar and concrete at polar low temperatures, a numerical model considering the CFRP bar surface characteristics was proposed utilizing ABAQUS. A total of 64 conditions were simulated in this study, to analyze the effect of CFRP bar diameter, rib height, rib width and concrete cover thickness on bonding on the bonding performance under low temperature conditions. The results showed that the numerical model considering the surface characteristics of CFRP bar can effectively reflect the stress transfer between CFRP bar and concrete, reflecting the damage and bonding failure mechanisms between CFRP bar and concrete at low temperatures. Low temperature significantly enhances the bonding strength between CFRP bar and concrete. At low temperatures, as the diameter of CFRP bar increases, the bonding strength between CFRP bar and concrete decreases, weakening the enhanced effect of low temperature on bonding strength. With an increase in rib height of CFRP bar, the low temperature bonding strength initially increases and then decreases, reaching the maximum value when the rib height is 8% of the reinforcement diameter. The variation in rib width of CFRP reinforcement mainly affects the shape of the bonding slip curve. Compared to specimens at room temperature, specimens at low temperature exhibit a thicker concrete cover when pull-out failure occurs.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bars; polar low temperatures; concrete; bond properties; numerical simulation

已有资料表明,极地地区常年冰雪覆盖,气温极低,年平均气温从沿海地区 -10 ℃到内陆最高点 -60 ℃不等,历史最低温度达 -89.2 ℃[1-2]。目前,极地地区的基础设施多为传统的钢筋混凝土结构,因当地恶劣的环境条件导致钢筋锈蚀的现象不可避免,钢筋混凝土结构极易出现耐久性能降低的问

收稿日期: 2023-08-21;**录用日期:** 2023-10-13;**网络首发日期:** 2024-03-22
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240320.0851.002
基金项目: 国家自然科学基金(51978459,52278201)
作者简介: 谢 剑(1974—),男,教授,博士生导师
通信作者: 王雪寒,wangxuehan1999tju@163.com

题[3]。在此背景下,纤维增强聚合物(FRP)筋由于其轻质、高强和耐腐蚀等优点成为在恶劣环境下代替钢筋的良好选择[4],在极地基础设施建设领域中具有广阔的应用前景。

FRP筋/钢筋与混凝土的黏结性能是混凝土配筋构件的工作基础,也是影响混凝土结构力学性能、变形性能和使用性能的重要因素。已有研究[5-6]表明,极地的低温环境会影响混凝土与FRP材料各自的力学性能,进而影响FRP筋与混凝土间的黏结性能。目前,关于FRP筋与混凝土黏结性能的研究主要集中在常温与部分特殊环境[7-9],而对于低温下FRP筋与混凝土黏结性能的研究相对较少。Xie等[10-11]通过中心拉拔试验对FRP筋与混凝土的低温黏结性能展开研究,结果表明,低温可以有效地提高FRP筋与混凝土的黏结性能。周培龙、徐惟雄等[12-13]在-30~-10 ℃对FRP筋-混凝土进行梁式拉拔试验,结果表明,FRP筋与混凝土的黏结强度在低温下有明显的提高。Aydin[14]在低温环境下对4类FRP筋材进行热膨胀试验,结果表明,CFRP筋的横向热膨胀系数是纵向的88倍,横向热膨胀系数是混凝土的13倍。热膨胀系数相差较大使得CFRP筋与混凝土间黏结机制更加复杂[13]。

此外,部分学者针对低温下钢筋与混凝土的黏结性能已进行了较为深入的理论分析与研究,可为相应条件下FRP筋与混凝土的黏结性能研究提供参考与借鉴。黄达海等[15]对低温下钢筋和混凝土的黏结性能展开试验研究,结果表明,试件的黏结强度随温度降低而提高。谢剑等[16]通过中心拉拔试验研究了-165~20 ℃下钢筋与混凝土的黏结性能,考虑了钢筋直径、型号、黏结长度、保护层厚度等参数,发现低温对混凝土与钢筋间黏结性能的影响作用显著。

FRP筋与混凝土界面黏结力主要由化学胶结力、接触摩擦力以及机械咬合力组成,与钢筋混凝土间黏结力相似。然而,这两种筋材与混凝土之间黏结界面的破坏模式不尽相同。对于钢筋而言,常见的破坏模式是钢筋横肋剪碎肋间混凝土而发生的黏结破坏。而对于FRP筋来说,FRP筋外侧由树脂组成且肋高有限,其表面的硬度和抗剪能力低于混凝土,FRP筋与混凝土间的黏结破坏模式不是以混凝土局部压碎和开裂为主,而是以FRP筋表面横肋的剪切破坏为主。这说明FRP筋-混凝土的黏结强度更大程度上取决于FRP筋的力学性能,使得FRP筋-混凝土界面黏结机制更加复杂。

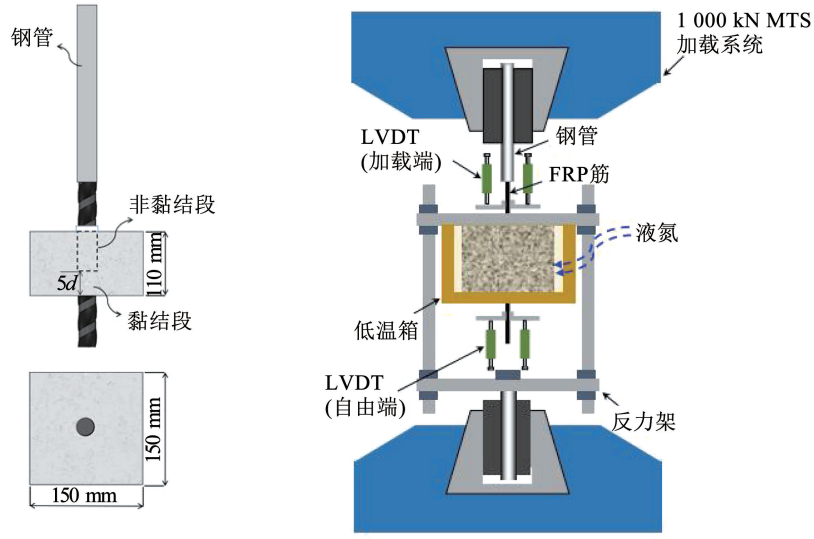
上述研究工作对探明低温下FRP筋-混凝土黏结性能奠定了基础。然而,由于低温试验成本高,考虑的试验变量单一,试件数量偏少,且低温试验操作难度大,试验数据离散性偏大。同时,试验过程中,FRP筋周围被混凝土包裹,FRP筋不同位置的应力状态不易测量,导致试验研究仅能从宏观角度了解FRP筋-混凝土的破坏模式与平均应力/应变情况,无法对低温下FRP筋混凝土间的黏结机制做深入研究。这些问题制约了FRP筋混凝土结构在极地与寒区的工程应用,有必要对其进行数值模拟分析并寻找适用性较高的有限元模型。

目前,关于FRP筋-混凝土黏结性能研究的有限元模型主要有杆尺度模型[17-18]和肋尺度模型[19]。杆尺度模型将FRP筋简化为光圆杆件模型,采用非线性弹簧单元或内聚力单元表征FRP筋与混凝土间的黏结作用,该模型依赖于试验中测量的结果。肋尺度模型通过对FRP筋表面横肋的几何形状进行精细化建模实现FRP筋-混凝土间的应力传递,该方法可以再现FRP筋与混凝土之间的机械咬合作用。Li等[19]采用三维肋尺度模型研究了约束作用下BFRP筋-混凝土黏结性能,并建立了相应的黏结强度预测模型,验证了肋尺度模型模拟FRP筋与混凝土黏结性能的可行性。

基于上述分析,本文将通过肋尺度精细化的建模方法,对低温下CFRP筋-混凝土的黏结性能展开研究。利用已有试验结果,在验证建模方法适用性的基础上,设计64种模拟工况,分析CFRP筋直径、肋高、肋宽和混凝土保护层厚度等参数对低温下CFRP筋-混凝土黏结性能的影响规律,为极地低温环境下CFRP筋-混凝土结构的研究提供参考。

1 试 验

选取文献[10-11]中低温下CFRP筋-混凝土拉拔试验作为验证对象。试验中拉拔试件尺寸为150 mm×150 mm×110 mm,考虑了低温、CFRP筋直径、混凝土强度和黏结长度对CFRP筋-混凝土构件黏结性能的影响。CFRP筋从混凝土截面中心穿过,通过在试件非黏结段中插入PVC管控制黏结长度。为防止CFRP筋被夹具夹坏,在CFRP筋加载端采用钢管进行锚固。试件加载采用位移加载,加载速度为0.5 mm/min。CFRP筋-混凝土拉拔试件几何尺寸和低温拉拔试验加载装置如图1所示。



(a) 拉拔试件几何尺寸　　(b) 低温拉拔试验装置示意

图 1　拉拔试验设计

Fig. 1　Design of pull-out test

试件参数如表 1 所示[10-11]。试验所用混凝土的配合比见表 2。混凝土原材料为 P. O. 42. 5 级硅酸盐水泥、河砂、级配良好的碎石和常温条件下的水。试验所用 CFRP 筋由 T700 级碳纤维和环氧树脂制成，其中纤维体积分数为 68%，表面形式为螺旋浅肋刻痕，其材料性能如表 3 所示[10]。

表 1　拉拔试件参数

Tab. 1　Parameters of pull-out specimens

试件编号	t/℃	d/mm	f_{cu}/MPa	L_d/mm	τ_T/MPa	τ_F/MPa	τ_F/τ_T
D5T20L25	20	5	37.3	25	4.59	5.00	1.09
D5T60L25	−60	5	37.3	25	8.30	8.65	1.04
D5T80L25	−80	5	24.0	25	8.72	8.25	0.95
D8T20L40	20	8	37.3	40	3.60	3.82	1.06
D8T60L40	−60	8	37.3	40	9.00	10.31	1.14
D10T20L50	20	10	37.3	50	4.72	4.64	0.98
D10T60L50	−60	10	37.3	50	6.66	7.09	1.06

注：t 为环境温度，d 为 CFRP 筋直径，f_{cu} 为常温混凝土强度，L_d 为黏结长度，τ_T 为黏结强度试验值，τ_F 为黏结强度模拟值。

表 2　混凝土配合比和抗压强度

Tab. 2　Mix proportion and compressive strength of concrete

水泥/(kg·m^{-3})	砂/(kg·m^{-3})	石/(kg·m^{-3})	水/(kg·m^{-3})	抗压强度/MPa
316	783	1 082	219	24.0
419	533	1 243	205	37.3

表 3　常温环境 CFRP 筋材料性能

Tab. 3　Material properties of CFRP bars at room temperature

试件编号	d/mm	d_e/mm	树脂	h_r/mm	w_r/mm	f_{fu}/MPa	E_f/GPa
D5	5	4.9	Epoxy	0.10	9	2 549	155
D8	8	7.8	Epoxy	0.12	9	2 438	157
D10	10	9.9	Epoxy	0.10	9	2 428	153

注：d 为 FRP 筋名义直径，d_e 为有效直径，h_r 为肋高，w_r 为肋宽，f_{fu} 为极限拉伸强度，E_f 为拉伸弹性模量。

试验结果表明，随温度的降低，CFRP 筋与混凝土间黏结强度逐渐提高，CFRP 筋表面构造是影响低温下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的重要因素。然而，由于低温试验成本较高、耗时较长等问题的限制，本次试验所考虑的研究参数有限，未开展数量较大的参数化研究，FRP 筋表面构造参数对 CFRP 筋–混凝土黏结性能影响的研究不够深入。本文将建立低温下多种表面构造的 CFRP 筋–混凝土有限元模

型,分析 CFRP 筋直径、肋高、肋宽以及混凝土保护层厚度等参数对低温下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响。

2　有限元模型的建立

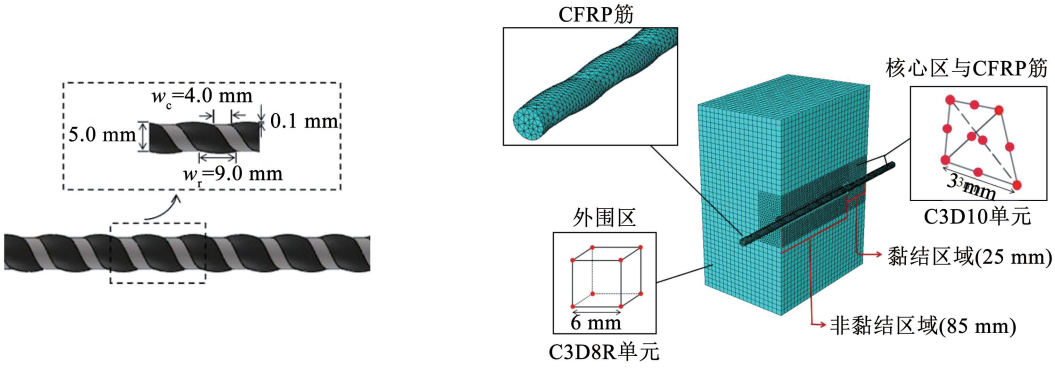
2.1　几何模型

以 D5 组为例介绍几何模型尺寸,混凝土尺寸为 150 mm×150 mm×110 mm,CFRP 筋与混凝土的黏结长度为 25.0 mm(5 倍的 CFRP 筋直径)。CFRP 筋的肋宽(w_r)为 9.0 mm,肋净距(w_c)为 4.0 mm。有限元模型中对 CFRP 筋进行了精细化建模,其表面横肋的实际尺寸如图 2 所示。在有限元计算中为节约计算时间成本,将混凝土分为核心区与外围区。混凝土核心区和 CFRP 筋均采用十结点修正二次四面体单元,混凝土外围区采用八结点线性六面体单元进行网格划分。经网格敏感性分析,在兼顾计算效率与精度的前提下,混凝土与 CFRP 筋的网格尺寸选取为 3 mm。

2.2　材料属性

通常采用塑性损伤和弥散裂缝两种模型模拟混凝土材料,弥散裂缝模型会出现剪切锁死问题,塑性损伤模型适用于多种情况下的混凝土破坏情况。Masad 等[20]的研究工作表明,塑性损伤模型也可以用来描述混凝土在低温环境下的力学性能,故选用塑性损伤模型建立混凝土的有限元模型。该模型假定混凝土材料的主要破坏原因为拉伸开裂和压缩破裂,通过引入拉伸损伤因子和压缩损伤因子描述应力–应变曲线软化段的刚度下降。数值分析中通过子程序 VUMAT 自定义 CFRP 筋材料本构模型、Hashin 破坏准则和刚度退化方法模拟 CFRP 筋中的纤维拉伸、压缩破坏和树脂基体的拉伸、压缩破坏。

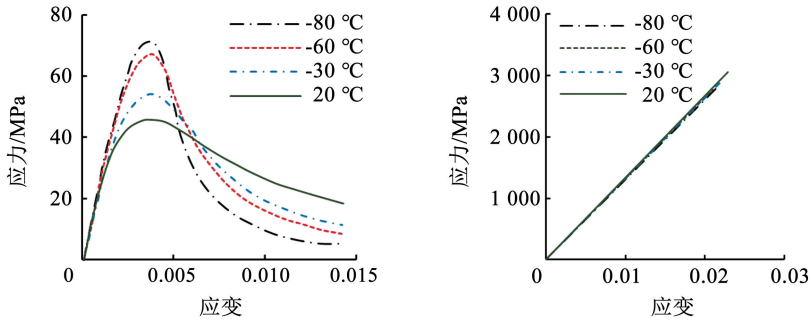
Xie 等[5]进行了低温环境下混凝土力学性能研究分析,提供了低温环境下混凝土的应力–应变曲线,本文通过改变低温下混凝土的本构关系表征低温下对混凝土力学性能的影响。CFRP 筋在常温环境下的应力–应变曲线呈线性关系,在低温下其应力–应变曲线仍保持线性关系[10]。因此,有限元模拟中仍将 CFRP 筋视为线弹性材料,不同温度环境下 CFRP 筋的差异体现在弹性模量和抗拉强度的不同,具体参数见表 4。数值分析中通过子程序 VUMAT 自定义材料本构模型、破坏准则和刚度退化方法模拟 CFRP 筋中的纤维拉伸、压缩破坏和树脂基体的拉伸、压缩破坏。图 3 为低温环境下混凝土与 CFRP 筋的应力–应变曲线。



(a) CFRP筋表面特征细节尺寸　　(b) 数值模型

图 2　试件有限元模型

Fig. 2　Finite element model of specimen



(a) 混凝土[4]　　(b) CFRP筋[9]

图 3　应力–应变曲线

Fig. 3　Stress–strain curves

表 4　不同温度下 CFRP 筋材料性能参数[9]

Tab. 4　Material properties of CFRP bars at different temperatures[9]

温度/℃	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	极限强度/MPa	极限应变/10^{-6}
20	1 500	131.64	0.3	3 054.59	23 262
-30	1 500	131.78	0.3	2 854.43	21 684
-60	1 500	133.17	0.3	2 785.07	20 896
-80	1 500	133.44	0.3	2 854.59	21 470

2.3　接触条件

已有研究表明，带肋 CFRP 筋与混凝土的黏结力由 3 部分组成[21]，即胶结力、摩擦力和机械咬合力。其中，胶结力在黏结力所占比例较小，且仅在 CFRP 筋与混凝土发生相对滑移前存在，对试件结果影响较小[22]。因此，CFRP 筋与混凝土的黏结作用仅考虑摩擦力与机械咬合力，采用“面面接触”模拟 CFRP 筋与混凝土的黏结作用。在法线方向上，将混凝土与 CFRP 筋接触面定义为硬接触，保证两个表面在互不嵌入的前提下有效地传递压应力；在切线方向上，采用经典库伦摩擦模型进行建模，CFRP 筋与混凝土界面接触的摩擦因数 μ 为0.3[23]。目前，对于低温 CFRP 筋与混凝土黏结性能的研究较少，因此，对低温下 CFRP 筋与混凝土界面接触摩擦因数的取值进行简化，假定低温环境下的摩擦因数与常温环境下的摩擦因数相同。

2.4　有限元验证

中心拉拔试验的黏结应力-滑移曲线与数值模拟结果的对比如图 4 所示。结果表明，对比试验黏结强度值与有限元模拟黏结强度值，相对误差均在 15% 以内，具体数值见表 1。有限元结果与试验数值吻合良好，验证了该模型可较好模拟低温下 CFRP 筋与混凝土黏结作用。

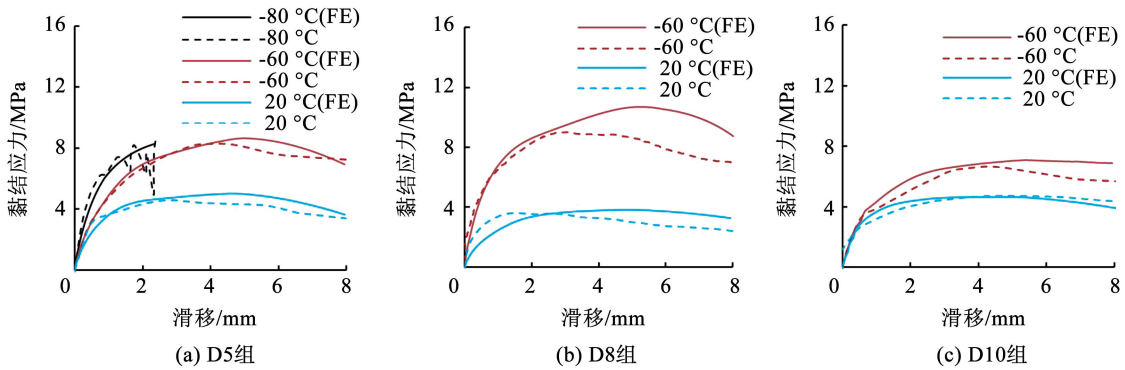


图 4　有限元模拟与试验的黏结滑移曲线对比

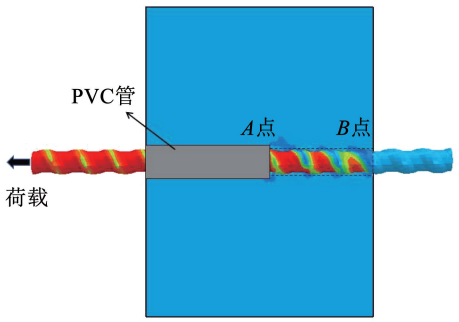
Fig. 4　Comparison of bonding slip curves between finite element simulation and test

3　黏结破坏机制分析

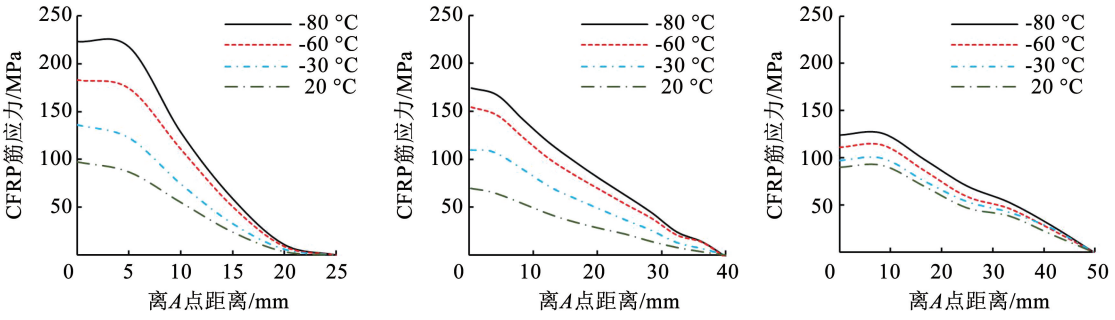
在计算黏结应力时，通常假定 CFRP 筋内应力均匀分布，但实际上 CFRP 筋应力沿黏结长度并不是均匀分布。在试验中 CFRP 筋被混凝土包裹，难以精确得到 CFRP 筋内部的应力数据，低温环境下的试件更加困难。借助有限元模型，可得到 CFRP 筋应力的典型分布如图 5(a)所示，A 点为黏结段靠近加载端位置，B 点为自由端位置。由图 5(a)可知，越靠近 A 点的 CFRP 筋的应力越大，黏结区域中沿加载方向的 CFRP 筋表面横肋承受的压力较大。

图 5(b) ~ (d)为不同直径的 CFRP 筋在达到极限黏结应力时，黏结区域内(均为 $5d$) CFRP 筋的应力分布曲线。可以看出，CFRP 筋直径越小，黏结段筋材应力分布越不均匀。当黏结长度相同时，CFRP 筋应力随温度的降低而逐渐升高。

图 6 和图 7 为低温下不同保护层厚度的混凝土径向应力与环向应力，径向应力为压应力(负值)，环向应力包括压应力与拉应力(正值)。可以看出，因 CFRP 筋表面为螺旋肋，其周边混凝土的应力呈不均匀分布。随着温度的降低，径向应力与环向应力逐渐加大。不同保护层厚度的混凝土径向应力均小于混凝土抗压强度，环向应力则大于混凝土的抗拉强度，说明混凝土的破坏模式主要是由混凝土受拉损伤引起的。



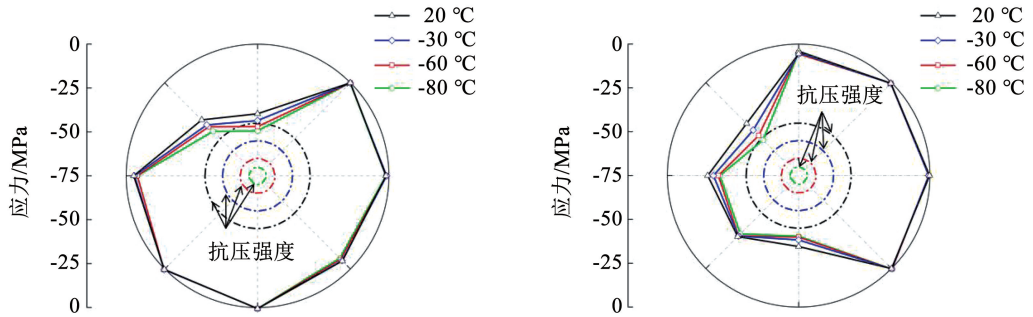
(a) CFRP筋黏结段应力分布



(b) 直径5 mm　(c) 直径8 mm　(d) 直径10 mm

图 5　不同直径 CFRP 筋应力分布曲线

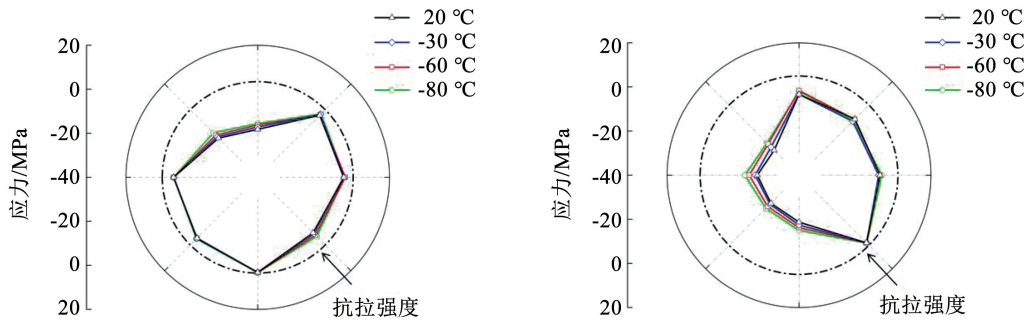
Fig. 5　Stress distribution curves of CFRP bars with different diameters



(a) 22.5 mm　(b) 30.0 mm

图 6　不同保护层厚度混凝土的径向应力

Fig. 6　Radial stress of concrete with different thickness of protective layer



(a) 22.5 mm　(b) 30.0 mm

图 7　不同保护层厚度混凝土的环向应力

Fig. 7　Circumferential stress of concrete with different thickness of protective layer

图 8 为不同温度下混凝土的受拉损伤云图，可以看出，不同工况的破坏模式有所不同，分别为拔出破坏、劈裂破坏和拔出-劈裂组合破坏。拔出破坏表现为 CFRP 筋拔出后试件表面无明显裂缝。CFRP 筋横肋主要由树脂组成，CFRP 筋-混凝土试件在 CFRP 筋横肋被混凝土咬合齿磨损剪断和混凝土被 CFRP 筋横肋拉坏这两种原因的共同作用下，试件发生拔出破坏。拉出-劈裂组合破坏表现为 CFRP 筋被拔出，混凝土试件开裂但未形成贯穿裂缝。劈裂破坏表现为试件开裂并形成贯穿裂缝。试件形成劈裂破坏主要是因为 CFRP 筋与混凝土的相互作用导致混凝土内部拉应力超过其抗拉强度，造成混凝土径向开裂且裂缝发展至试件表面，而此时 CFRP 筋横肋受损较小。因此，对于带肋 CFRP 筋，筋材横肋与混凝土咬合齿强度的相对大小是影响试件破坏模式的重要因素。

由图 8 可以看出，在混凝土保护层厚度相同的试件中，低温下试件的损伤面积增大，表面裂缝数量更多，且主要集中于加载端附近。这是因为在低温作用的影响下，CFRP 筋与混凝土之间产生了附加的冰冻黏附力[24]，对二者之间黏结性能的增强作用大于对混凝土强度的提高作用，导致破坏界面在混凝土内部发展，甚至裂缝延伸至试件外表面。

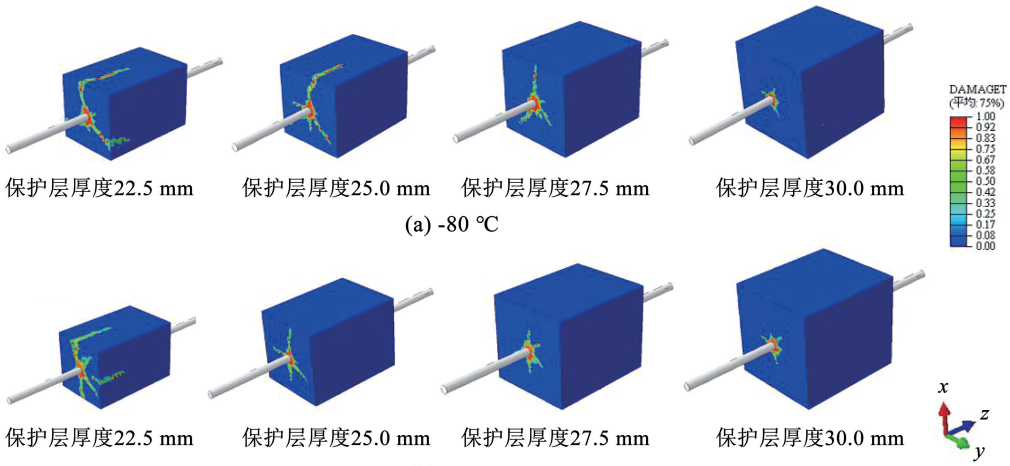


图 8　混凝土损伤云图

Fig. 8　Concrete damage cloud map

4　参数分析

为更好地探究不同因素对 CFRP 筋与混凝土间黏结性能的影响，共设计 64 种工况，对低温下 CFRP 筋-混凝土中心拉拔试件进行参数分析，详细参数如表 5 所示。黏结刚度取 0.9 倍峰值应力对应的割线刚度[22,25-26]。

4.1　温度的影响

图 9 为不同温度工况下 CFRP 筋-混凝土黏结性能的模拟结果（以 D5 组模拟试件为例）。

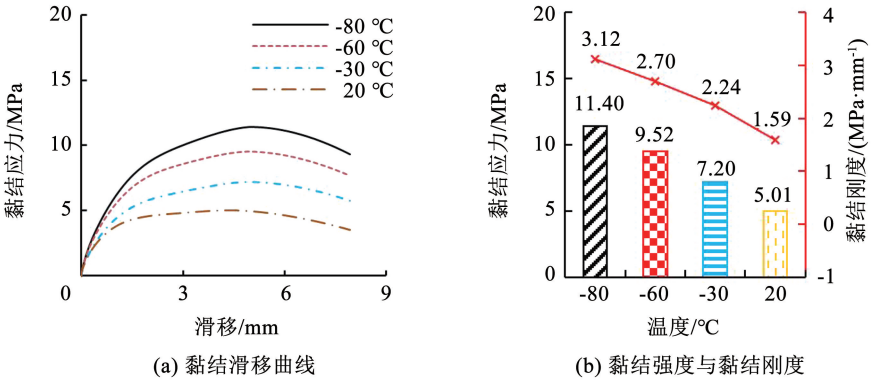


图 9　温度对 CFRP 筋-混凝土黏结性能的影响

Fig. 9　Effect of temperature on bonding behaviors between CFRP bar and concrete

表5　有限元模型设计参数及主要结果

Tab.5　Design parameters and main results of finite element analysis

试件编号	直径/mm	肋高/mm	肋宽/mm	温度/℃	保护层厚度/mm	黏结强度/MPa	峰值滑移/mm	黏结刚度/(MPa·mm^{-1})	破坏模式
D5T20	5.0	0.1	10.0	20	70.0	5.01	4.41	1.59	拔出
D5T30				-30		7.20	4.50	2.24	拔出
D5T60				-60		9.52	4.94	2.70	拔出
D5T80				-80		11.40	5.12	3.12	拔出
D8T20	8.0	0.1	10.0	20	70.0	3.86	4.44	1.22	拔出
D8T30				-30		5.37	4.72	1.59	拔出
D8T60				-60		7.21	5.00	2.02	拔出
D8T80				-80		8.56	5.19	2.31	拔出
D10T20	10.0	0.1	10.0	20	70.0	3.52	4.44	1.11	拔出
D10T30				-30		4.76	4.81	1.39	拔出
D10T60				-60		6.39	5.21	1.72	拔出
D10T80				-80		7.63	5.31	2.01	拔出
D12T20	12.0	0.1	10.0	20	70.0	3.33	5.12	0.93	拔出
D12T30				-30		4.26	5.02	1.19	拔出
D12T60				-60		5.38	4.72	1.60	拔出
D12T80				-80		5.06	4.34	1.50	拔出
H0.2T20	5.0	0.2	10.0	20	70.0	6.55	5.42	1.35	拔出
H0.2T30				-30		8.01	5.68	1.58	拔出
H0.2T60				-60		10.40	6.50	1.79	拔出
H0.2T80				-80		11.61	5.96	2.18	拔出
H0.3T20	5.0	0.3	10.0	20	70.0	8.14	5.29	1.66	拔出
H0.3T30				-30		10.07	7.07	1.99	拔出
H0.3T60				-60		11.54	6.50	2.48	拔出
H0.3T80				-80		12.58	5.83	3.01	拔出
H0.4T20	5.0	0.4	10.0	20	70.0	8.41	5.29	2.45	拔出
H0.4T30				-30		10.45	4.63	4.57	拔出
H0.4T60				-60		13.46	4.10	5.88	拔出
H0.4T80				-80		15.50	4.89	6.77	拔出
H0.5T20	5.0	0.5	10.0	20	70.0	8.78	5.15	2.80	拔出
H0.5T30				-30		10.94	5.55	4.78	拔出
H0.5T60				-60		12.75	3.90	5.57	拔出
H0.5T80				-80		14.04	3.76	6.13	拔出
B10T20	5.0	0.4	10.0	20	70.0	8.41	3.76	3.72	拔出
B10T30				-30		10.45	4.10	4.24	拔出
B10T60				-60		13.46	4.63	4.84	拔出
B10T80				-80		15.50	4.89	5.26	拔出
B9T20	5.0	0.4	9.0	20	70.0	7.65	4.63	2.75	拔出
B9T30				-30		9.67	4.96	3.25	拔出
B9T60				-60		12.91	6.38	3.86	拔出
B9T80				-80		13.29	5.56	3.98	拔出

表 5(续)

试件编号	直径/mm	肋高/mm	肋宽/mm	温度/℃	保护层厚度/mm	黏结强度/MPa	峰值滑移/mm	黏结刚度/(MPa·mm^{-1})	破坏模式
B7.5T20	5.0	0.4	7.5	20	70.0	7.37	6.29	1.95	拔出
B7.5T30				−30		9.61	6.80	2.35	拔出
B7.5T60				−60		11.30	7.64	2.46	拔出
B7.5T80				−80		12.72	7.78	2.72	拔出
B6T20	5.0	0.4	6.0	20	70.0	6.74	8.76	1.28	拔出
B6T30				−30		8.61	8.90	1.61	拔出
B6T60				−60		10.75	8.90	2.01	拔出
B6T80				−80		10.65	9.03	1.96	拔出
C4.5T20	5.0	0.1	10.0	20	22.5	3.03	0.74	5.34	劈裂
C4.5T30				−30		4.76	0.84	7.40	劈裂
C4.5T60				−60		6.61	0.84	10.27	劈裂
C4.5T80				−80		7.21	0.84	11.19	劈裂
C5T20	5.0	0.1	10.0	20	25.0	3.26	0.98	5.39	拔出–劈裂
C5T30				−30		5.24	1.04	8.16	拔出–劈裂
C5T60				−60		7.38	0.98	12.20	劈裂
C5T80				−80		7.92	1.04	12.29	劈裂
C5.5T20	5.0	0.1	10.0	20	27.5	3.45	2.20	4.26	拔出
C5.5T30				−30		5.49	2.28	5.50	拔出
C5.5T60				−60		7.72	2.20	8.45	拔出–劈裂
C5.5T80				−80		8.37	2.20	9.19	拔出–劈裂
C6T20	5.0	0.1	10.0	20	30.0	4.17	2.51	2.77	拔出
C6T30				−30		6.41	3.09	3.73	拔出
C6T60				−60		9.11	2.83	6.03	拔出
C6T80				−80		9.78	2.27	6.47	拔出

在低温下，混凝土强度与 CFRP 筋强度均有所提升。低温下混凝土孔隙和微裂缝中的水结成冰，提高了混凝土强度，从而筋材与混凝土间的机械咬合作用得到增强，试件的黏结强度与黏结刚度提高。另一方面，当 CFRP 筋与混凝土发生破坏时，破坏区域主要发生在横肋处。随着低温对 CFRP 筋强度的提升，黏结破坏的薄弱区域逐渐从横肋转移到 CFRP 筋与混凝土的黏结界面，进而可以充分发挥二者间的黏结性能。

由图 9 可知，相比常温环境下，低温下黏结强度与黏结刚度均有不同程度的提高。−80、−60、−30 ℃下黏结强度分别比 20 ℃提升了 125.30%、76.95%和 69.01%，黏结刚度则分别提升了 96.13%、69.73%和 40.92%。

4.2　CFRP 筋直径的影响

图 10 为 CFRP 筋不同直径工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出，无论在室温还是低温环境下，CFRP 筋直径越大，黏结强度越小，且温度越低，这一现象越明显。这是由泊松效应造成的，在相同应力下，直径越大，CFRP 筋的收缩越大，从而降低了 CFRP 筋与混凝土的黏结强度。另一方面，CFRP 筋的剪切刚度较小，在埋置长度一定时，CFRP 筋黏结应力受直径的影响较大。剪切滞后使得 CFRP 筋在受拉时，CFRP 筋横截面中心与表面的变形不同，横截面正应力的非均匀分布降低了 CFRP 筋与混凝土之间的黏结性能。−80 ℃条件下，当 CFRP 筋直径由 5 mm 增加至 8、10、12 mm 时，黏结强度分别降低了 24.91%、49.41%和 55.61%，峰值滑移分别提高了 1.36%、3.71%和 −15.23%。

由表 5 中数据对比可以看出，随着 CFRP 筋直径的加大，低温对 CFRP 筋–混凝土间黏结强度的提升幅度逐渐减小。温度由 20 ℃降至 −80 ℃时，低温对 CFRP 筋直径为 5、8、10、12 mm 试件的提升幅度分别为 128.00%、123.68%、117.14%和 51.52%。这是由于机械咬合力主要通过 CFRP 筋横肋与混凝土咬合齿来传递，温度的降低会增强

CFRP 筋与混凝土的力学性能,肋参数等表面特性对二者黏结性能的影响也会相应增强;不同直径的 CFRP 筋具有相同的肋高,随着 CFRP 筋直径的加大,其对应肋高与直径的比值逐渐减小,CFRP 筋表面粗糙度随之减小,从而减小了低温对黏结强度的提升幅度。

4.3　CFRP 筋肋高的影响

图 11 为 CFRP 筋不同肋高工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出,CFRP 筋肋高对整个试件的黏结性能有较大的影响。通过对比可以看出,在常温条件下,CFRP 筋肋高较大试件的黏结强度更高;然而,在 –80 ℃条件下,随着肋高的不断增加,试件黏结强度呈现先升高后降低的趋势。此外,在相同温度条件下,与浅肋 CFRP 筋相比,深肋 CFRP 筋黏结滑移曲线峰值位移更小。这是因为当把 CFRP 筋从混凝土中向外拔出时,CFRP 筋与混凝土间的黏结强度主要取决于机械咬合力的大小。机械咬合力主要是 CFRP 筋横肋突出与混凝土形成的咬合齿相互挤压产生,当周围混凝土咬合齿受拉破坏或 CFRP 筋肋部磨损时,CFRP 筋所受的约束作用降低,从而二者界面发生黏结破坏。因此,CFRP 筋肋与混凝土抗剪强度的相对大小将影响黏结破坏面发生的位置,相应的黏结强度也会受到影响。

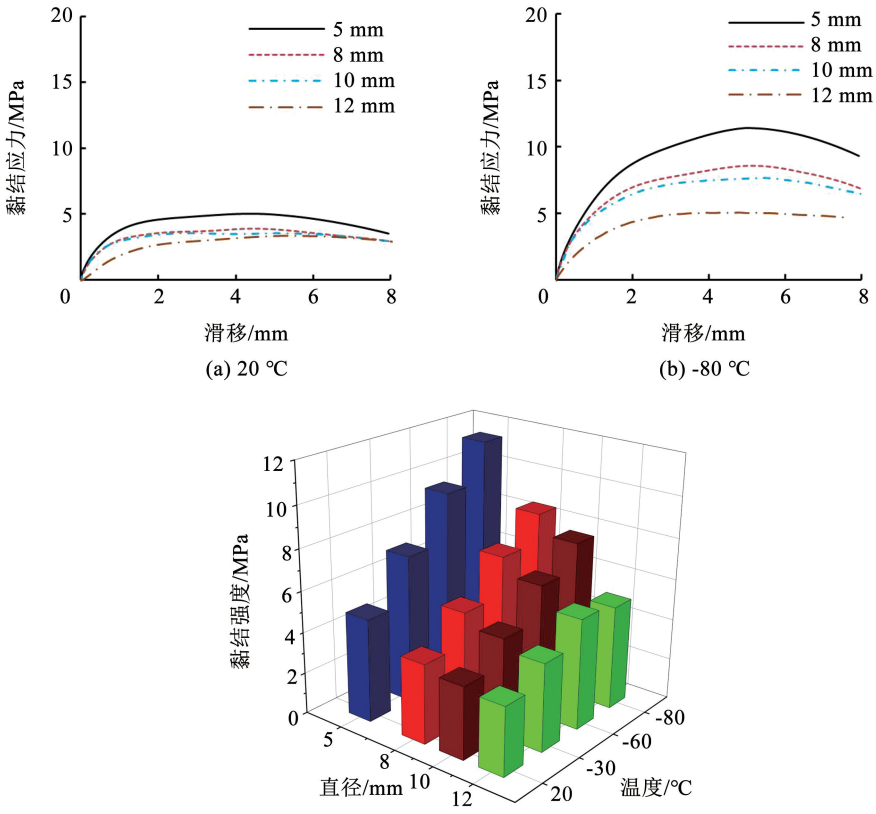


图 10　CFRP 筋直径对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 10　Effect of CFRP bar diameter on bonding performance of CFRP bar-concrete

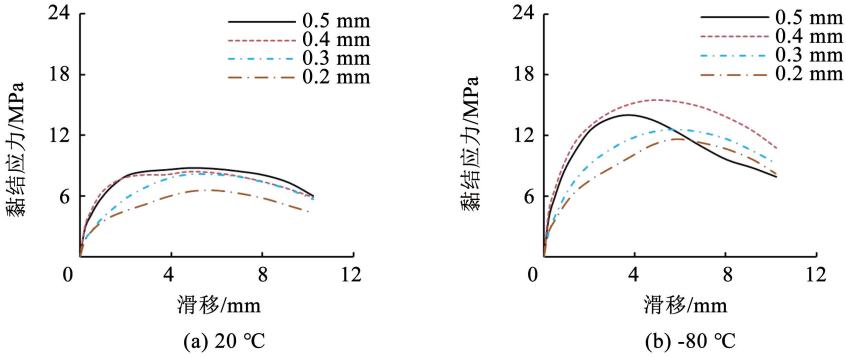


图 11　CFRP 筋肋高对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 11　Effect ofrib height of CFRP bar on bonding performance of CFRP bar-concrete

常温与低温环境下，CFRP 筋肋高对黏结性能影响规律有所不同。这是因为低温提高了混凝土咬合齿的抗剪强度，黏结界面破坏主要为 CFRP 筋横肋断裂；另一方面，当 CFRP 筋肋高过高时，肋端与混凝土咬合齿间容易因应力集中而磨损，从而降低黏结强度。由表 5 可知，－80 ℃条件下，当 CFRP 筋肋高由 0.2 mm 增加至 0.3、0.4、0.5 mm 时，黏结强度分别提高了 8.35%、33.51% 和 20.93%，峰值滑移分别减小了 2.18%、17.95% 和 36.91%。

4.4　CFRP 筋肋宽的影响

图 12 为 CFRP 筋不同肋宽工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出，在同一温度条件下，随着 CFRP 筋肋宽的减小，黏结滑移曲线的黏结强度和黏结刚度明显降低，峰值滑移逐渐增加。这是由于 CFRP 筋肋宽减小，CFRP 筋横肋与混凝土有效接触面积随之减小，CFRP 筋横肋剪切面积减小，导致了 CFRP 筋–混凝土黏结性能的降低。不同 CFRP 筋肋宽试件的黏结滑移曲线有所不同，对于 CFRP 筋肋宽较小的试件，其黏结滑移曲线出现两个峰值点，且两个峰值点对应滑移值为相邻横肋的距离。由表 5 的模拟结果可知，当温度由 20 ℃降低至 －30、－60、－80 ℃时，肋宽为 10.0 mm 试件的黏结强度分别提高了 21.88%、60.05% 和 84.30%，其黏结刚度分别提高了 41.95%、106.47% 和 99.35%。肋宽为 6.0 mm 试件的黏结强度分别提高了 27.64%、59.44% 和 57.92%，其黏结刚度分别提高了 25.59%、56.88% 和 53.15%。

4.5　混凝土保护层厚度的影响

图 13 为不同混凝土保护层厚度工况下 CFRP 筋–混凝土黏结性能的模拟结果。可以看出，随着混凝土保护层厚度的增加，黏结强度均有提升。这是因为混凝土保护层厚度的增加，提高了周边混凝土对筋材的约束作用，同时限制了黏结区域周围裂缝的发展，使其充分发挥二者界面的黏结性能，由此来提高黏结强度。当混凝土保护层厚度增加超过阈值后，混凝土保护层厚度对于黏结强度的贡献不再明显。在 －80 ℃时，当混凝土保护层厚度由 22.5 mm 增加至 30.0 mm 时，黏结强度增加了 35.64%。此外，峰值滑移也随着保护层厚度的增加而增加。这是由于试件破坏模式随着混凝土保护层厚度的增加，逐渐由劈裂破坏转变为拔出破坏。在 20 ℃下，保护层厚度为 27.5 mm（c/d = 5.5）时发生拔出破坏；在 －80 ℃下，保护层厚度为 30.0 mm（c/d = 6.0）时发生拔出破坏。在低温作用影响下，混凝土的脆性增加，试件破坏模式转为拔出破坏，所需保护层厚度也将增大。

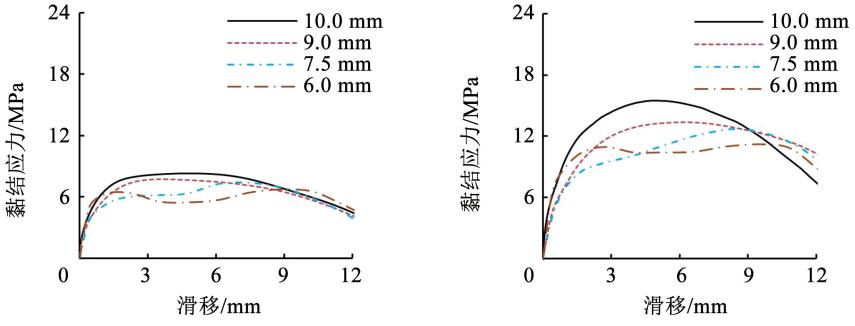


图 12　CFRP 筋肋宽对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 12　Effect of rib width of CFRP bar on bonding performance of CFRP bar-concrete

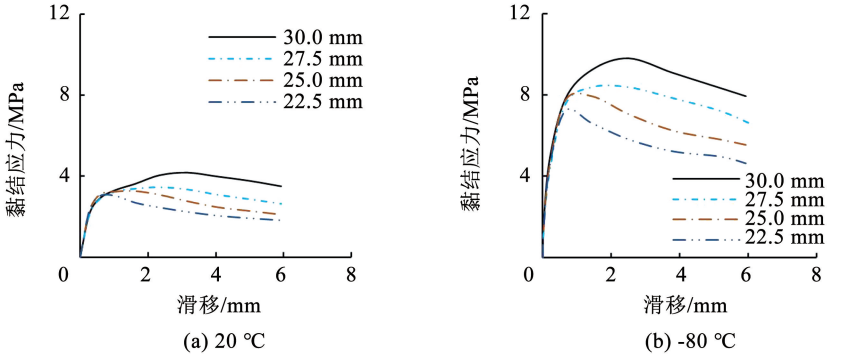


图 13　混凝土保护层厚度对 CFRP 筋–混凝土黏结性能的影响

Fig. 13　Effect of concrete cover thickness on bonding performance of CFRP bar-concrete

5 结 论

1)考虑CFRP筋表面特征的精细化建模能合理反应CFRP筋与混凝土之间的黏结性能,为有限元模型中黏结滑移行为模拟提供了参考。

2)降低温度和减小CFRP筋直径可以提高CFRP筋与混凝土间的黏结强度,但对不同直径CFRP筋–混凝土试件,黏结强度的提高幅度不同。在–80 ℃下,5 mm直径与12 mm直径试件的黏结强度分别较20 ℃时提高了127.54%和51.95%。随着CFRP筋直径的增大,低温对CFRP筋–混凝土间黏结强度的提高幅度逐渐减小。

3)CFRP筋肋高的增加会提高黏结强度,过大的肋高反而会减小二者之间的黏结强度;CFRP筋肋宽将影响低温黏结滑移曲线的形状。对于5 mm直径的CFRP筋,当肋高由0.2 mm增加至0.5 mm时,在20 ℃下黏结强度增加了34.05%,而在–80 ℃下增加了20.93%。

4)低温下CFRP筋–混凝土的黏结强度随混凝土保护层厚度的增加而提高。对于5 mm直径的CFRP筋,在–80 ℃下,混凝土保护层厚度由22.5 mm增加至30.0 mm时,黏结强度增加了35.64%。在低温下,试件破坏模式发生转变时的混凝土保护层厚度较常温下增大。

5)针对本文所研究的工况,在低温下存在最优CFRP筋表面特征参数及保护层厚度。基于模拟结果可知,在低温下肋高为CFRP筋直径的8%时,肋宽为2倍直径时,CFRP筋与混凝土黏结性能达到最优。保护层厚度为6倍直径时,CFRP筋与混凝土破坏模式转变为拔出破坏。

参考文献

[1]杨剑. 中国发展极地事业的战略思考[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(11): 6
YANG Jian. China's strategic thinking on the development of polar undertakings[J]. Renming Luntan · Xueshu Qianyan, 2017(11): 6. DOI: 10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2017.11.00

[2]崔国辉. 南极大陆最高气温为17.5 ℃[N]. 中国气象报, 2018-08-29(3)
CUI Guohui. The maximum temperature on the Antarctic continent is 17.5 ℃[N]. China Meteorological News, 2018-08-29(3)

[3]任宝双, 张翼. 南极长城站现有建筑损伤特点及原因分析[J]. 工程建设与设计, 2006(11): 9
REN Baoshuang, ZHANG Yi. Analysis of damage characteristics and causes of existing buildings in the Great Wall Station of Antarctica [J]. Construction & Design for Project, 2006(11): 9

[4]LLKER F, KARA A. Flexural performance of FRP reinforced concretebeams[J]. Composite Structures, 2012, 94(5): 1616. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.12.012

[5]XIE Jian, LI Xiaomei, WU Honghai. Experimental study on the axial-compression performance of concrete at cryogenic temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2014(9): 72. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.033

[6]OKAYASU M, TSUCHIYA Y. Mechanical and fatigue properties of long carbon fiber reinforced plastics at low temperature[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2019, 4(4): 22. DOI: 10.1016/J.JSAMD.2019.10.002

[7]王小璐, 查晓雄, 张旭琛. 高温下FRP筋与混凝土的粘结性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 8
WANG Xiaolu, ZHA Xiaoxiong, ZHANG Xuchen. Adhesion of FRP bars to concrete at high temperature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 8. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2013.06.002

[8]MASHIMA M, IWAMOTO K. Bond characteristics of FRP rod and concrete after freezing and thawing deterioration[J]. ACI Structural Journal, 2004, 138(1): 51. DOI: 10.14359/10034

[9]DONG Zhiqiang, WU Gang, XU Bo, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete under seawater conditions and the long-term bond strength prediction[J]. Materials & Design, 2016, 92: 552. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.12.066

[10]XIE Jian, LIU Yang, QIAO Yu, et al. Bond behaviors of ribbed CFRP bars in concrete exposed to low temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2022(22): 341

[11]谢剑, 乔羽, 王启辰. 极地低温下CFRP筋与混凝土的黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 533
XIE Jian, QIAO Yu, WANG Qichen. Bonding behavior between CFRP bar and concrete at polar temperature [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 533

[12]周培龙, 李扬, 黄中华. FRP筋混凝土在低温下的粘结性能[J]. 湖北工业大学学报, 2021, 36(5): 100
ZHOU Peilong, LI Yang, HUANG Zhonghua. Bond properties of FRP reinforced concrete at low temperature[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2021, 36(5): 100

[13]徐惟雄. 低温环境FRP筋与混凝土粘结性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018
XU Weixiong. Study on bond property of FRP bars and concrete in low temperature environment [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018

[14]AYDIN F. Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163(28): 1

[15]黄达海, 辜熠. 低温下混凝土中钢筋锚固性能的试验研究[J]. 建筑科学, 2007, 23(9): 4
HUANG Dahai, GU Yi. Experimental study on anchorage performance of steel bars in concrete at low temperature [J]. Building Science, 2007, 23(9): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1002–8528.2007.09014

[16]谢剑, 李会杰, 聂治盟, 等. 低温下钢筋与混凝土黏结性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 10
XIE Jian, LI Huijie, NIE Zhimeng, et al. Experimental study on bonding properties of steel bar and concrete at low temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 10

[17]BUI L, JONGVIVATSAKUL P, STITMANNAITHUM B, et al. Numerical modelling of bond mechanism of ETS FRP bar-concrete joints with long embedment length [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2022, 117: 103179

[18]尹世平, 李雨珊, 刘运超. FRP筋与全珊瑚骨料海水混凝土粘

结性能数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报，2023，31(1)：210
YIN Shiping，LI Yushan，LIU Yunchao. Numerical simulation of bonding properties between FRP bars and whole coral aggregate seawater concrete[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences，2023，31(1)：210. DOI：10.16058/j.issn.1005－0930.2023.01.016

[19] LI Ping，JIN Liu，ZHANG Renbo，et al. Static bond performance between BFRP bars and concrete with stirrup confinement：a refined modelling[J]. Engineering Structures，2022，262：114379

[20] MASAD N，ZOLLINGER D，KIM S，et al. Meso-scale model for simulations of concrete subjected to cryogenic temperatures[J]. Materials and Structures，2016(49)：2141

[21] XIONG Zhe，WEI Wei，LIU Feng，et al. Bond behaviour of recycled aggregate concrete with basalt fibre-reinforced polymer bars[J]. Composite Structures，2021，256：113078

[22] ZHANG Renbo，JIN Liu，LIU Mengjia，et al. Refined modeling of the interfacial behavior between FRP bars and concrete under different loading rates[J]. Composite Structures，2022，291：115676

[23] JIN Liu，LIU Kaixin，ZHANG Renbo，et al. Bond behavior between steel bar and concrete considering cryogenic temperatures and confinement[J]. Case Studies in Construction Materials，2023，18：20

[24] YAN Jiabao，XIE Wenjun，ZHANG Lingxin，et al. Bond behavior of concrete-filled steel tubes at the Arctic low temperaturs[J]. Construction and Building Materials，2019，210：118

[25] 周春恒，王君义，王新堂，等. 高温作用后 GFRP 筋与海水珊瑚混凝土粘结性能试验研究[J]. 复合材料学报，2023，40(4)：2224
ZHOU Chunheng，WANG Junyi，WANG Xintang，et al. Experimental study on adhesion of GFRP bars to seawater coral concrete under high temperature[J]. Journal of Composite Materials，2023，40(4)：2224. DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.001

[26] 李鑫鑫，吴智敏. 加载速率对侧压力下光圆钢筋与混凝土粘结性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2015，39(3)：547
LI Xinxin，WU Zhimin. Effect of loading rate on bond performance of smooth round steel bar and concrete under lateral pressure[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Traffic Science and Engineering Edition)，2015，39(3)：547. DOI：10.3963/j.issn.2095－3844.2015.03.021

（**编辑**　刘　彤）

封面图片说明

封面图片来自本期论文“电化学氧化技术在 MBR 中的膜污染控制研究与应用进展”，是对电化学氧化(EO)技术抑制膜生物反应器(MBR)膜污染的机制、实现途径和抗污染效果的综述。近年来，基于 EO 的膜污染控制技术蓬勃发展，促进了 MBR 抗膜污染方法的创新，并引发了对抗膜污染机制的新思考。介绍了 EO 的工作原理并分析了电化学氧化 MBR(eMBR)中产生活性氧自由基并抑制膜污染的多种途径。根据国内外的最新研究进展，从电极装载方式、电极与滤膜的结合方式、电极的制备材料等角度系统讨论了 eMBR 的运行模式和抗膜污染效果。总结了 EO 抑制膜污染的影响因素及其实际应用的现存挑战。对 eMBR 的未来研究进行了展望，对其进一步优化与创新提出了建议，有助于推动膜滤技术在污水处理领域的应用和发展。

（图文提供：倪凌峰，王沛芳，王亚宜。河海大学环境学院）