

文章编号:1007-9629(2021)03-0533-06

极地低温下 CFRP 筋与混凝土的黏结性能

谢 剑^{1,2}, 乔 羽¹, 王启辰^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350;

2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 开展了碳纤维增强聚合物(CFRP)筋-混凝土试件的拉拔试验,考虑混凝土强度、CFRP 筋直径、黏结长度、保护层厚度等参数,分析了极地低温对 CFRP 筋与混凝土黏结性能的影响规律。结果表明:与常温相比,极地低温降低了 CFRP 筋与混凝土的黏结性能,但在 18~−80 ℃ 范围内,随着温度的降低,其黏结强度并非呈现单一趋势的变化规律;随着 CFRP 筋直径和黏结长度的增加,CFRP 筋与混凝土的黏结强度呈降低趋势,提高混凝土强度或增大保护层厚度将提高其黏结强度;极地低温条件下 CFRP 筋与混凝土的黏结界面趋于脆性,易发生突然且随机的界面破坏,而不易发生混凝土的劈裂破坏。

关键词: 极地低温; 碳纤维增强聚合物筋; 黏结性能; 拉拔试验

中图分类号: TU599

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.012

Bonding Behavior between CFRP Bar and Concrete at Polar Temperature

XIE Jian^{1,2}, QIAO Yu¹, WANG Qichen^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Pull-out tests were carried out to investigate the effects of polar temperature on the bonding behavior between carbon fiber reinforce polymer(CFRP) bars and concrete by considering several parameters, including concrete strength, bar diameter, bond length, and cover thickness. The experimental results show that the bonding behavior between CFRP bar and concrete is weakened at polar temperature compared with that at normal temperature, but it reveals a nonmonotonic trend at temperatures ranging from 18 ℃ to −80 ℃. The bond strength tends to decrease with the increase of bar diameter and bond length, while increases with the enhancement of concrete strength and cover thickness. The bond interface between CFRP bar and concrete tends to be brittle and prone to sudden and random failure, whereas concrete splitting hardly occurs at polar temperature.

Key words: polar temperature; carbon fiber reinforced polymer bar; bonding behavior; pull-out test

大量工程实例表明,钢筋锈蚀是引起钢筋混凝土结构失效的主要原因之一。在极地低温下,为了使混凝土顺利固化,工程中常引入各类外加剂,其含有的多种成分将加剧钢筋锈蚀;另外,混凝土长期受冻引起其内部裂隙发展,各类腐蚀性物质更易侵入,也加快了钢筋锈蚀产生。2006 年,长城站建筑损伤评

估发现,历经 20 a 极地低温的科考站损伤严重,钢筋外露锈蚀,部分结构构件锈穿甚至锈断^[1]。纤维增强聚合物(FRP)筋在低温等恶劣环境下可以保持较好的耐腐蚀性,为极地低温工程结构提供了新方向。

现有关于 FRP 筋与混凝土黏结性能的研究主要集中在常温^[2]与部分特殊环境,如:高温^[3-4]、冻

收稿日期:2019-11-25; 修订日期:2020-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978459)

第一作者:谢 剑(1974—),男,河北石家庄人,天津大学教授,博士生导师,博士。E-mail: xiejian@tju.edu.cn

融^[5-6]等. 低温相关的研究较为匮乏, 且所涉及的温度不能满足实际工程需要. 李扬等^[7]通过 $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下玻璃纤维增强聚合物(GFRP)筋混凝土梁式试验发现, 随温度降低, 在相同荷载作用下筋材滑移量减小了 $17\%\sim 50\%$. Borosnyói^[8]通过研究喷砂型碳纤维增强聚合物(CFRP)筋与混凝土的黏结性能, 发现 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下其黏结强度较常温提高了 50% 以上. 张志春^[9]研究发现 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 GFRP 筋与混凝土的黏结强度小于常温环境. 谢剑等^[10-11]针对低温下钢筋、钢绞线与混凝土的黏结性能进行了深入研究, 为 FRP 筋与混凝土的低温黏结性能研究提供了参考.

本文通过极地低温下 CFRP 筋-混凝土拉拔试验, 探索极地低温对 CFRP 筋与混凝土黏结性能的影响, 同时考虑 CFRP 筋直径、黏结长度、混凝土强度、保护层厚度等参数的影响, 为极地低温环境下 CFRP 筋的研究和应用提供参考.

1 试验

1.1 原材料

采用南京海拓复合材料有限公司生产的刻痕型 CFRP 筋, 纤维丝类型为 T700 级碳纤维, 基体材料为环氧树脂, 纤维体积含量为 68% ; 采用唐山冀东水泥公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥; 砂为Ⅱ区级配的普通河砂(中砂); 采用 $5\sim 20\text{ mm}$ 连续级配的碎石; 拌和水为 $10\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的自来水. 混凝土配合比见表 1, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度(后文简称强度).

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportions of concretes

No.	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				f_{cu}/MPa
	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	
1	316	783	1 082	219	24.02
2	419	533	1 243	205	37.32
3	667	451	1 082	200	46.51

1.2 试件设计

试件参数见表 2, 每种工况下制作 5 个平行试件, 试验结果取平均值. A、B、C、D、E 组试件分别用于研究温度(t)、混凝土强度(f_{cu})、CFRP 筋直径(d)、黏结长度(l)及保护层厚度(C)对 CFRP 筋-混凝土黏结性能的影响.

CFRP 筋-混凝土拉拔试验试件为混凝土中心或偏心埋置 CFRP 筋的形式, CFRP 筋夹持端由于自身抗剪强度较小, 为了避免试验过程中局部剪切破坏, 采用无缝钢管内添环氧树脂对其端部进行处理.

表 2 试件参数
Table 2 Parameters of specimens

Group	Specimen	$t/^{\circ}\text{C}$	d/mm	f_{cu}/MPa	l/mm	l/d	C/mm
A	A-1	18	10	24.02	50	5.0	70
	A-2	-30	10	24.02	50	5.0	70
	A-3	-60	10	24.02	50	5.0	70
	A-4	-80	10	24.02	50	5.0	70
B	B-1	18	10	24.02	50	5.0	70
	B-2	18	10	37.32	50	5.0	70
	B-3	18	10	46.51	50	5.0	70
C	C-1	-80	5	24.02	50	5.0	70
	C-2	-80	8	24.02	50	5.0	70
	C-3	-80	10	24.02	50	5.0	70
D	D-1	-80	10	24.02	25	2.5	70
	D-2	-80	10	24.02	50	5.0	70
	D-3	-80	10	24.02	75	7.5	70
	D-4	-80	10	24.02	100	10.0	70
	D-5	-80	10	24.02	130	13.0	70
E	E-1	-80	10	24.02	50	5.0	15
	E-2	-80	10	24.02	50	5.0	45
	E-3	-80	10	24.02	50	5.0	70

1.3 拉拔试验

本试验在天津大学土木工程中心结构实验室进行, 试验装置由加载设备、降温保冷设备及测量设备构成. 试件被固定于装有钢反力架的液压伺服试验机上, 通过向保温箱内注入液氮来营造低温环境. 试件温度由埋置其中的 PT100 实时监测, 在试验反力架上下钢板处分别固定 2 支千分表, 采集试验中试件两端滑移值(δ)的变化. 需要注意的是, 试验过程中千分表所测得的位移数据并非试件两端的真实滑移值, 需要分别排除 CFRP 筋自由拉伸段、传力钢柱受拉变形的影响. 试验过程为: 先将试件置于复叠式低温冷库内预冷 5.0 h 以上; 待试件温度稳定于目标温度后, 将试件取出并快速安装于试验机上; 通过调整液氮阀门, 使试件温度保持在试验温度点并持温 0.5 h ; 随后启动程序开始加载, 加载控制方式为荷载控制, 参照 ACI 400.3R-12《Guide test methods for fiber-reinforced polymer(FRP) composites for reinforcing or strengthening concrete and masonry structures》, 加载速率为 0.02 kN/s , 当试件加载端发生 2.5 mm 滑移时, 即认为 CFRP 筋与混凝土的黏结作用失效, 试验结束. 本试验所取 CFRP 筋黏结长度 l 较小, 可以近似认为在该长度范围内黏结应力均匀分布, 故后文取平均应力作为 CFRP 筋与混凝土

的黏结应力(σ),并取加载端滑移值为2.5 mm时的黏结应力作为 CFRP 筋与混凝土的黏结强度(τ_u).

常温(18℃)试验中:前期荷载持续增加,而试件中部 CFRP 筋并未发生滑移;当荷载继续增大时,CFRP 筋与混凝土之间开始出现相对滑移,且伴随有 CFRP 筋从混凝土内部拔出的摩擦声;随后试件滑移值持续增加,CFRP 筋被拔出的声响也逐渐加剧,直至加载端滑移值达到 2.5 mm,试件发生拔出破坏.低温试验中:荷载开始施加后,试件两端千分表读数即开始增加,表明 CFRP 筋已发生滑移;随着试验进行,试件会随机且突然发出“砰”的剧烈声响,荷载曲线随之发生突降,同时伴有两端滑移值的骤增(约0.15 mm),但随后荷载仍会逐渐回升.试验进行的整个过程中,“砰”声与荷载骤降的现象会反复出现.该现象在-30、-60℃下偶有发生,而在-80℃下非常显著.

2 结果与讨论

2.1 混凝土强度对黏结强度的影响

目前关于混凝土强度对 FRP 筋与混凝土黏结性能的影响尚存在争议^[12-13],本文研究了不同混凝土强度下 CFRP 筋与混凝土黏结强度的变化规律,结果见图 1.由图 1 可见,与混凝土强度为 24.02 MPa 的试件相比,混凝土强度为 37.32、46.51 MPa 的试件黏结强度分别增大了 2.99%、25.00%,表明随着混凝土强度的增加,CFRP 筋与混凝土黏结强度逐渐增大.混凝土强度对 CFRP 筋与混凝土黏结性能的影响,与 CFRP 筋表面的加工形式密切相关.对于表面黏砂或缠绕肋型筋^[13],黏结破坏往往发生在筋的表层材料与内筋之间,因此黏结性能受混凝土强度影响较小.本文所选 CFRP 筋为表面刻痕型,由于刻痕的存在,在试件拉拔过程中,CFRP 筋表面变形处与周边混凝土发生挤压咬合作用,黏结破坏最终表现为二者界面的破坏.因此,当混凝土强度提高时,CFRP 筋与混凝土

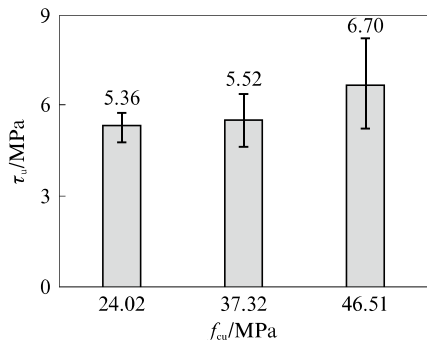


图 1 不同混凝土强度下 CFRP 筋与混凝土的黏结强度

Fig. 1 Bond strength of CFRP bar and concrete with different concrete strength

土间的机械咬合作用显著增强,试件的黏结强度得到提高.

2.2 温度对黏结强度的影响

图 2、3 为不同温度下的 CFRP 筋与混凝土的黏结强度以及黏结滑移(σ - δ)曲线.由图 2 可见:相比于常温环境,极地低温下黏结强度均有不同程度的降低,说明极地低温作用对 CFRP 筋黏结性能有不利影响;在试验温度区间内,随着温度的降低,黏结强度呈现先降低后升高的变化趋势,-30、-60、-80℃下黏结强度分别比 18℃时减小了 74.81%、26.12%、35.82%.

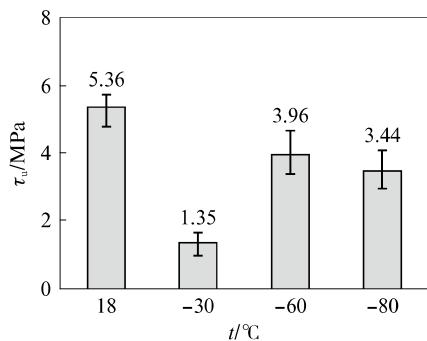


图 2 不同温度下 CFRP 筋与混凝土的黏结强度

Fig. 2 Bond strength between CFRP bar and concrete at different temperatures

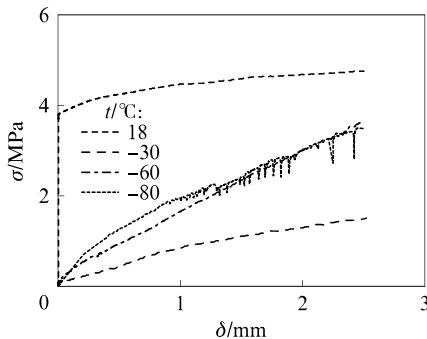


图 3 不同温度下 CFRP 筋与混凝土的黏结滑移曲线

Fig. 3 Bond stress-slip curves of CFRP bar and concrete at different temperatures

现有研究^[14]表明低温下混凝土强度有所增加,且由 2.1 分析可知,提高混凝土强度将有利于改善 CFRP 筋与混凝土的黏结性能.由图 3 可见,相比于常温环境,极地低温下黏结强度反而降低,表明极地低温下黏结性能还受其他因素影响.CFRP 筋的径向热膨胀系数约为 $22 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,而混凝土热膨胀系数约为 $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.极地低温下 CFRP 筋沿径向的收缩变形大于混凝土,进而减弱了二者间的黏结作用,试件加载初期便出现滑移现象也进一步证明了材料间热变形差异的影响.此

外, Miura^[15]、刘麟玮^[16]等研究发现, 随着温度的降低, 混凝土并非呈现持续收缩的趋势. 当处于 $-30\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围时, 混凝土的体积收缩将减缓甚至发生逆膨胀的现象, 而 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后又恢复收缩变形. 混凝土逆膨胀现象的存在, 间接改善了 CFRP 筋与混凝土的黏结性能. 综上, 极地低温下 CFRP 筋与混凝土的黏结性能, 受到多种因素的耦合作用, 使得其黏结强度并未随温度降低而呈现持续降低的单一变化趋势.

由图 3 可见, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下试件黏结滑移曲线呈现明显的“锯齿状”, 与试验过程中剧烈声响出现的时刻相对应. 在 CFRP 筋从混凝土内拔出的过程中, 随着相对滑移, 二者间不断建立新的黏结界面的, 使得拉拔过程中黏结应力持续增长, 而极地低温使 CFRP 筋内环氧树脂硬化, 进而影响树脂基体的应力传递作用, 黏结长度范围内的黏结应力趋于不均匀分布, 最大应力值将增加, 由此导致黏结界面更易发生破坏, CFRP 筋被拔出. 随着 CFRP 筋的拔出, 混凝土与 CFRP 筋的界面会发生随机的脆性破坏, 进而出现黏结应力骤减与滑移量骤增; 当混凝土与 CFRP 筋再次建立新的黏结界面时, 二者的黏结锚固作用得以恢复, 故黏结应力再次增加. 在 -30 、 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下试件的黏结应力分布较 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀, 使得在该 2 组工况下界面反复破坏现象较少发生.

2.3 CFRP 筋直径和黏结长度对黏结强度的影响

图 4、5 分别为不同 CFRP 筋直径及黏结长度下的 CFRP 筋与混凝土的黏结强度. 由图 4、5 可见: 随着 CFRP 筋直径和黏结长度的增加, CFRP 筋与混凝土的黏结强度更易呈现降低趋势; CFRP 筋直径为 10 mm 的试件的黏结强度明显小于直径为 5、8 mm 的试件; 与黏结长度为 $2.5d$ 时比较, 黏结长度为 $5.0d$ 、 $7.5d$ 、 $13.0d$ 时试件的黏结强度分别减小了 11.11%、11.89%、18.35%.

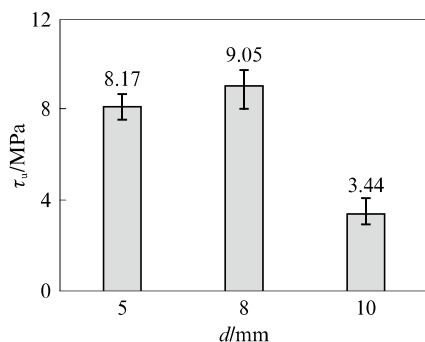


图 4 不同 CFRP 筋直径下 CFRP 筋与混凝土的黏结强度
Fig. 4 Bond strength between CFRP bar with different diameters and concrete

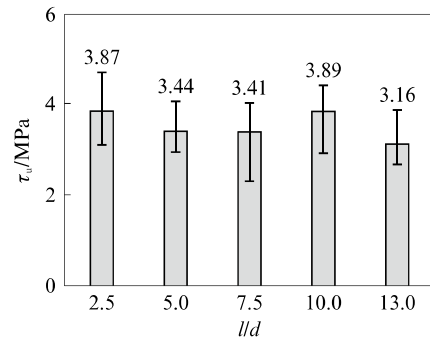


图 5 不同黏结长度下 CFRP 筋与混凝土的黏结强度
Fig. 5 Bond strength between CFRP bar and concrete with different bond lengths

在拔出过程中, CFRP 筋横截面上变形分布不均, 越靠近截面中心处变形越小, 导致了剪切滞后现象. CFRP 筋直径越大, 剪切滞后现象越明显, 则更易发生黏结破坏. CFRP 筋与混凝土的黏结应力在黏结长度范围内并非均匀分布, 而是呈两端小中间大的分布规律, 随着黏结长度的增加, 这种不均匀分布的现象愈加明显, 平均黏结应力与最大黏结应力的差值也越来越大, 进而更容易发生破坏. 由于本试验试件黏结长度较小 (最大为 130 mm), 黏结长度范围内黏结应力的不均匀分布现象并不突出, 所以不同黏结长度下试件的黏结强度相差也较小, 基本在 20% 以内. CFRP 筋直径 5 mm 的试验组由于 CFRP 筋较细且黏结长度较短 (仅为 25 mm), 使本组试验更易受到外部环境及人为因素的干扰, 进而导致该组结果存在较大误差, 所得黏结强度略低于 CFRP 筋直径 8 mm 组. 除黏结长度 130 mm 组以外, 其他试验组均通过 PVC 管控制试件的黏结长度, 但黏结长度 100 mm 组的 PVC 管较短, 与泡沫方板贴合不紧密, 导致部分试件在浇筑中混凝土渗入管内, 增强了 CFRP 筋与混凝土的黏结作用, 使得该组试验结果偏大.

上述试验均在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行, 同样可观察到伴随有剧烈声响的界面反复破坏现象. 当黏结长度增加时, CFRP 筋与混凝土间建立可靠黏结界面的概率增大, 因而界面破坏现象出现较晚且频率明显降低. 有学者^[12] 对与本文相同的 CFRP 筋进行黏结试验发现, 当黏结长度超过 100 mm 时, 试件破坏形式将由 CFRP 筋拔出向混凝土劈裂转变. 而在本次试验中, 由于极地低温环境下混凝土强度的提高及其与 CFRP 筋的热变形差异的影响, 黏结长度为 130 mm 的试件仍发生 CFRP 筋拔出破坏, 表明极地低温环境下混凝土脆性劈裂的发生概率降低.

2.4 保护层厚度对黏结强度的影响

图6为不同保护层厚度下CFRP筋与混凝土的黏结强度。由图6可见:随着保护层厚度的增加,CFRP筋与混凝土的黏结强度逐渐增大;保护层厚度为45、70 mm的试件黏结强度比保护层厚度为15 mm的试件分别增大了22.17%、62.26%,这是因为随着混凝土保护层厚度的增加,增强了周边混凝土对CFRP筋的约束作用,二者界面上的机械咬合力与摩擦力也因此增大,最终表现为黏结强度的增大;当保护层厚度仅为15 mm时,试件也未发生劈裂破坏,体现了极地低温环境有利的一面。

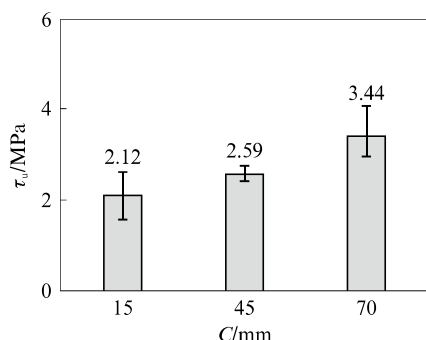


图6 不同保护层厚度下CFRP筋与混凝土的黏结强度
Fig. 6 Bond strength between CFRP bar and concrete with different cover thicknesses

3 结论

(1)相较于常温环境,极地低温对CFRP筋与混凝土的黏结性能有不利影响,但低温对黏结性能的影响受到多种因素的耦合作用,在18~-80℃范围内,随温度降低,黏结强度并非呈现单一趋势的变化规律。

(2)随着CFRP筋直径和黏结长度的增加,CFRP筋与混凝土的黏结强度易呈现降低趋势,提高混凝土强度或增大保护层厚度将提高其黏结强度。

(3)极地低温下,CFRP筋与混凝土的黏结界面趋于脆性,易发生突然且随机的界面破坏,而不易发生混凝土的脆性劈裂。

参考文献:

- [1] 任宝双,张翼.南极长城站现有建筑损伤特点及原因分析[J].建筑与结构设计,2006(11):9-13.
REN Baoshuang, ZHANG Yi. Characteristics and causes of damage to existing buildings in Antarctica[J]. Architectural and Structure Design, 2006(11):9-13. (in Chinese)
- [2] 薛伟辰,张蜀沪.碳纤维塑料筋锚杆界面粘结强度试验研究[J].建筑材料学报,2007,10(4):493-499.
XUE Weichen, ZHANG Shulu. Experimental study on interfacial bond strength of CFRP strand anchors[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(4):493-499. (in Chinese)
- [3] KATZ A, BERMAN N, BANK L C. Effect of high temperature on bond strength of FRP rebars[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(2):73-81.
- [4] GALATI N, NANNI A, DHARANI L R, et al. Thermal effects on bond between FRP rebars and concrete[J]. Composites Part A, 2006, 37(8):1223-1230.
- [5] MASHIMA M, IWAMOTO K. Bond characteristics of FRP rod and concrete after freezing and thawing deterioration[J]. ACI Structural Journal, 2004, 138(1):51-70.
- [6] DAVALOS J F, CHEN Y, RAY I. Effect of FRP bar degradation on interface bond with high strength concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(8):722-730.
- [7] 李扬,黄中华,沈子豪,等.低温下纤维增强塑料筋混凝土粘结性能试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(8):256-261.
LI Yang, HUANG Zhonghua, SHEN Zihao, et al. Experimental investigation on bond behavior of fiber reinforced concrete at low temperatures[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(8):256-261. (in Chinese)
- [8] BOROSNYÓI A. Influence of service temperature and strain rate on the bond performance of CFRP reinforcement in concrete[J]. Composite Structures, 2015, 127:18-27.
- [9] 张志春.结构新型热固性FRP复合筋及其性能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
ZHANG Zhichun. Thermosetting FRP composited rebars and their performance for civil infrastructures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 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):31-40.
XIE Jian, LI Huijie, NIE Zhimeng, et al. Experimental study on bond properties between reinforcement and concrete at low temperatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10):31-40. (in Chinese)
- [11] XIE J, EDGAR S S, LEI G C, et al. Experimental study on bonding properties between steel strand and concrete at cryogenic temperatures[J]. Transactions of Tianjin University, 2016, 22(4):308-316.
- [12] 郝庆多,王勃,欧进萍.FRP筋与混凝土的黏结性能[J].建筑技术,2007,38(1):15-17.
HAO Qingduo, WANG Bo, OU Jinping. Bonding performance of FRP steel bar with concrete[J]. Architecture Technology, 2007, 38(1):15-17. (in Chinese)
- [13] 朱浮声,张海霞.影响FRP筋与混凝土黏结性能的主要因素[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(3):397-401.
ZHU Fusheng, ZHANG Haixia. Study on main factors of bond strength between FRP bars and concrete[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2006, 22(3):397-401. (in Chinese)
- [14] 王传星,谢剑,李会杰.低温环境下混凝土性能的试验研究[J].工程力学,2011,28(增刊2):182-186.