



冻融环境下钢筋与粉煤灰混凝土的粘结性能

牛建刚¹, 郝吉¹, 李伯潇²

(1. 内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 内蒙古包头 014010;

2. 青岛理工大学琴岛学院土木工程系, 山东青岛 266106)

摘要:通过对内贴应变片钢筋的直接拔出试验,分析冻融作用下粉煤灰掺量对钢筋与粉煤灰混凝土间粘结性能的影响,得出冻融循环作用对钢筋与粉煤灰混凝土之间粘结性能的影响规律。试验结果表明:钢筋与粉煤灰混凝土的粘结强度随粉煤灰掺量的增加而降低;当粉煤灰掺量一定时,随着冻融循环次数的增加,混凝土强度有所下降,钢筋与粉煤灰混凝土间极限粘结强度降低;当粉煤灰掺量较大,达到40%时,随冻融次数的增加,钢筋粉煤灰混凝土试件极限粘结强度的下降幅度明显减缓,极限粘结强度对应的滑移量增大。表明掺入较多粉煤灰可使试件的冻融损伤现象得到缓解,冻融环境下钢筋混凝土的粘结性能得到提高。

关键词:冻融循环;粉煤灰混凝土;直接拔出试验;粘结强度;粘结应力分布

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)06-0007-08

Bonding properties between reinforcement and fly ash concrete under freeze-thaw cycle

Niu Jiangan¹, Hao Ji¹, Li Boxiao²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Qingdao Technological University Qindao College, Qingdao 266106, P. R. China)

Abstract: The effect of freeze-thaw cycle to the bonding performance between steel bar and fly ash concrete was analysed through pull-out test to steel bars attached strain gages inside. The results of pull-out test under different number of freeze-thaw cycle show that the bonding strength between steel bar and concrete decrease as the content of fly ash increasing; when the content of fly ash stay the same, with the number of freeze-thaw cycle increasing, the concrete compressive strength decline, and the bonding strength decrease; as the fly ash replacement rate stay 40%, with the number of freeze-thaw cycle increasing, the ultimate bonding strength decreased speed reduce, and the free end displacement corresponding to the ultimate bonding strength increase, which shows that mixed with a large number of fly ash can remit the freeze-thaw damage phenomenon, the bonding performance of reinforced concrete specimens under freeze-thaw environment is improved.

收稿日期: 2015-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368042)

作者简介: 牛建刚(1976-),男,教授,博士,主要从事混凝土耐久性 & 建筑可靠度研究, (E-mail) niujiangan@imust.edu.cn.

Received: 2015-07-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51368042)

Author brief: Niu Jiangan(1976-), professor, PhD, main research interest: durability of concrete & building reliability, (E-mail) niujiangan@imust.edu.cn.

Key words: freeze-thaw cycle; fly ash concrete; pull-out test; bonding strength; bonding stress distributing

粉煤灰作为混凝土材料中最为常用的一种矿物掺合料,既可以减少水泥用量,降低混凝土的成本,又可以改善混凝土部分工作性能、力学性能和耐久性^[1-2],能够更好地满足实际工程的需求。

在寒冷环境下的混凝土结构会受到冻融侵蚀,冻融作用会使混凝土劣化^[3],劣化后的混凝土与钢筋间的粘结性能将受到影响^[4-6]。在影响混凝土结构破坏的因素中,冻融侵蚀对于混凝土结构的破坏程度较大,冻融损伤严重时会导致结构失效^[7-9]。钢筋与混凝土间的粘结性能是影响混凝土构件正常使用性能的重要因素之一^[10-14],在混凝土工程中合理利用粉煤灰是否能够发挥其在冻融环境中改善钢筋与混凝土之间的粘结性能尚不明确。Arezoumandi 等^[15]研究了粉煤灰掺量大于 50% 的混凝土试件与钢筋的粘结性能, Costel 等^[16]对高温养护的粉煤灰混凝土试件的粘结性能开展了试验分析。胡晓鹏等^[17]分析了粉煤灰掺量对直接拔出试件与梁式试件中钢筋与粉煤灰混凝土粘结性能的影响,冀晓东等^[10]研究了冻融循环作用后钢筋与混凝土的粘结性能,而关于冻融环境下钢筋与粉煤灰混凝土间粘结性能方面可供参考的试验与分析并不多,冻融作用与粉煤灰掺量对钢筋混凝土间粘结性能的影响有待深入研究。

通过对钢筋粉煤灰混凝土试件的快速冻融试验和钢筋直接拔出试验,得出冻融环境下钢筋与粉煤灰混凝土间的粘结规律,分析冻融循环作用对钢筋与粉煤灰混凝土的粘结性能的影响,以便为钢筋混凝土结构工程的可靠度分析和耐久性设计提供参考,并为以后钢筋与粉煤灰混凝土之间粘结性能分析提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

取混凝土结构中使用较多的 C30 到 C40 的混凝土进行试验,对实际工程有一定参考价值。直接拔出试验考虑冻融循环次数以及粉煤灰掺量对粘结性能的影响,粉煤灰掺量分别为 0%、10%、20%、30% 和 40%,其中,对粉煤灰掺量为 0%、20% 及 40% 的 3 组试件进行冻融循环作用,冻融次数为 0、25、50、75、100 次。

水泥采用包钢综合企业(集团)公司水泥厂生产的“草原牌”PO42.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰选用鄂尔多斯市达旗电厂生产的Ⅱ级粉煤灰,细度、需水量比、烧失量分别为 0.26、93.3%、0.13;细骨料选用普通河砂,其粒径小于 5 mm,含泥量小于 2%,细度模数、级配等各项性能指标均合格;普通粗骨料:碎石粒径不大于 20 mm,含泥量、细度模数、级配等各项性能指标合格;拌和用水采用城市普通自来水,外加剂采用萘系 B3 减水剂,以及 AH-1 型引气剂。试验中粉煤灰混凝土的基本参数如表 1。

表 1 粉煤灰混凝土的基本参数

Table 1 The basic parameter of fly ash concrete

水泥	材料用量/(kg·m ⁻³)						抗压强度/MPa
	粉煤灰	碎石	中砂	水	减水剂	引气剂	
354.6	0.00	1 119	686	195	5.76	0.021 3	43.383
319.1	35.46	1 119	686	195	5.76	0.021 3	41.167
283.6	70.91	1 119	686	195	5.76	0.021 3	37.240
248.2	106.40	1 119	686	195	5.76	0.021 3	36.821
212.7	141.80	1 119	686	195	5.76	0.021 3	35.634

1.2 试件设计

试件截面尺寸均为 150 mm 的立方体,配置 1 根 HRB400 级钢筋,长 400 mm,钢筋有效粘结长度为 70 mm,无粘结段钢筋通过 PVC 套筒隔离,在自由端及加载端分别预留 10、240 mm 长的钢筋以固定千分表和施加荷载,试件简图如图 1(a)所示。钢筋预先开槽处理,锚固长度范围钢筋槽内粘结 5 个应变片,应变片将锚固长度划分为 4 个区段,每个区段长为 17.5 mm,测点编号如图 1(b)。因试验主要研究钢筋与粉煤灰混凝土间粘结性能在冻融循环作用下的变化规律,故不考虑钢筋直径等对粘结性能的影响,试验统一使用直径为 14 mm 的钢筋。根据实验室的实际情况,自行设计加载装置,符合《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)的规定,千分表安装在试件的自由端用以测定钢筋滑移量,如图 2。冻融试验使用 KDR-V 冻融试验机,符合《混凝土抗冻试验设备》(JG/T 243)的规定。冻融温度控制在(-17±2)℃~(8±2)℃,每次冻融循环在 3~4 h 内完成。

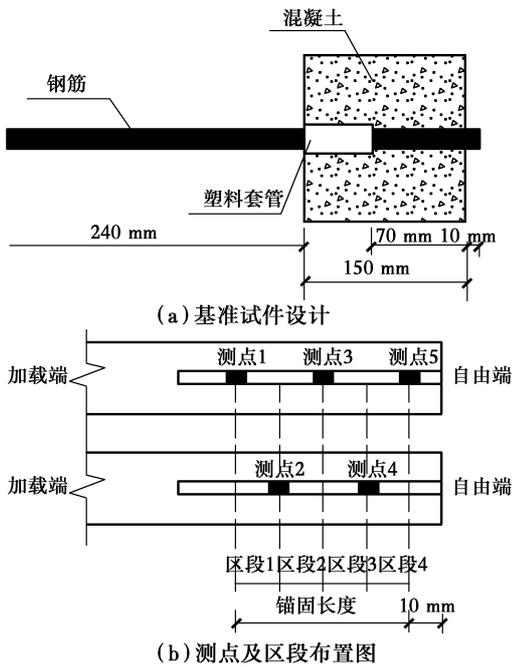


图1 试件设计简图
Fig.1 Specimen design diagram

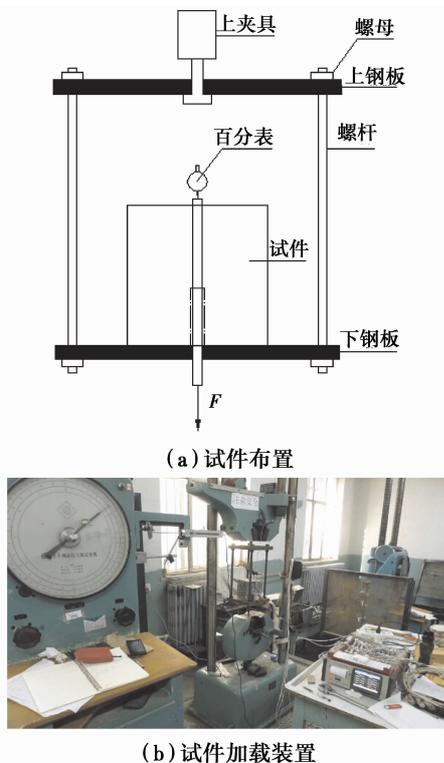


图2 直接拔出试验加载装置
Fig.2 Loading device of pull-out test

2 试验现象及破坏形态

未经冻融循环作用的普通混凝土试块进行直接拔出试验后,在自由端处的混凝土表面出现2条裂

缝,且2条裂缝处于一条直线上,裂缝宽度较大,但并没有使混凝土完全破坏。粉煤灰掺量为20%时,出现2条夹角大于90°的细小裂缝;当粉煤灰的掺量为40%,试件破坏时,试件的混凝土表面完好,没有出现裂缝,钢筋被直接拔出,如图3。

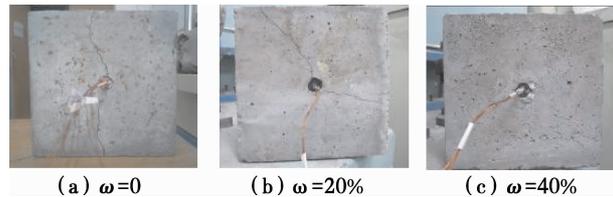


图3 不同粉煤灰掺量试件直接拔出试验破坏现象
Fig.3 Pull-out test damage phenomenon of reinforced concrete with different content of fly ash

对试件进行冻融循环作用后,试件混凝土的表面发生一定的剥落,受冻融损伤程度随着冻融循环次数的增多而愈加明显。从冻融50次开始,试件表面剥落情况变得更加明显,而且不同掺量的粉煤灰亦对冻融后试件的破坏有不同程度的影响。当粉煤灰的掺量达到40%时,试件在冻融后表面的损伤现象明显减小,而少量加入粉煤灰并没有使试件表面的损坏缓解。

经冻融循环作用后,未掺粉煤灰的普通混凝土试件经过拔出试验,试件破坏形态以拔出破坏为主,试件混凝土表面的裂缝宽度随着冻融次数的增加而逐渐变小。粉煤灰混凝土试件的破坏形态与普通混凝土基本一致,随着冻融循环次数的增加,混凝土表面裂缝宽度逐渐减少,直至不再出现裂缝,混凝土表面保持完整。

3 试验结果与分析

3.1 钢筋与粉煤灰混凝土间粘结性能

未进行冻融循环的试件,钢筋与粉煤灰混凝土间的粘结性能主要受粉煤灰掺量的影响,因此,在进行冻融试验之前需要分析钢筋与混凝土间粘结性能受粉煤灰掺量的影响。

3.1.1 粉煤灰掺量对钢筋与粉煤灰混凝土间的粘结强度-滑移的影响 在研究钢筋与粉煤灰混凝土的粘结性能时,采用平均粘结强度来描述钢筋与粉煤灰混凝土间的粘结强度,粘结强度按式(1)计算

$$\bar{\tau} = \frac{1000P}{\pi dl_a} \quad (1)$$

式中: $\bar{\tau}$ 为粘结强度,MPa; P 为拔出荷载,kN; d 为钢筋直径,mm; l_a 为锚固长度,mm,取 $5d$ 。

根据式(1)计算结果绘制不同粉煤灰掺量下试件的粘结强度-滑移曲线,如图 4 所示,各组粉煤灰混凝土试件的粘结强度-滑移曲线变化趋势基本相同,均由微滑阶段、滑移阶段、劈裂阶段、下降阶段和残余阶段组成。与未掺粉煤灰试件相比,当粉煤灰的掺量增加时,钢筋与粉煤灰混凝土间的极限粘结强度降幅增大。粉煤灰掺量为 10% 和 20% 的试件其极限粘结强度分别降低 2.62% 和 3.82%;而粉煤灰掺量为 30% 时,试件极限粘结强度下降 14.12%;掺量为 40% 时,极限粘结强度下降 20.51%。

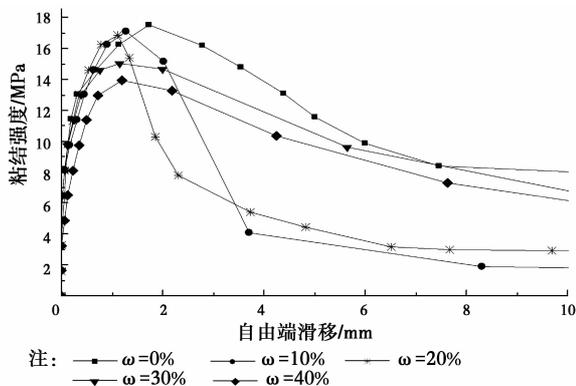


图 4 不同粉煤灰掺量试件粘结强度-滑移曲线

Fig. 4 Curve of bonding strength-slip with different content of fly ash

加载初期,钢筋与混凝土间的粘结力主要是由化学胶着力提供,自由端位移较小,几乎为 0,处于微滑阶段。化学胶着力破坏后,随着荷载向自由端发展,钢筋与混凝土发生相对位移,由于混凝土强度会随掺入粉煤灰的掺入有一定程度的降低,使混凝土对钢筋的握裹力减小,试件破坏时其极限粘结强度降低。

钢筋粉煤灰混凝土的极限粘结强度对应的自由端滑移量基本相同,均比未掺粉煤灰试件的自由端滑移量小。粉煤灰掺量为 0%、10%、20% 和 30% 的试件在曲线滑移阶段较为接近,而粉煤灰掺量为 40% 的试件的粘结刚度稍有减小,与文献[17]未冻融条件粉煤灰混凝土与钢筋的粘结规律相近。粉煤灰掺入量为 10% 和 20% 时,粘结强度在下降段的下降速度较快,在试件承载力达到极限后就会发生破坏,进入残余阶段,原因在于少量掺入粉煤灰起到改善混凝土内部结构的作用有限,且会降低混凝土基体强度,试件的粘结力在荷载向自由端发展时会产

生应力集中,钢筋应变增加,钢筋与混凝土间的相对位移增加,应力集中区段的粘结作用减弱,钢筋与混凝土在锚固段内粘结能力下降速度加快,提前残余阶段;当粉煤灰掺量为 30% 和 40% 时,粘结强度在下降段和残余段的下降趋势与未掺粉煤灰试件相似,在试件承载力达到极限后仍能有较高的承载力,破坏后粘结锚固能力较好,不至于出现脆性破坏。

3.1.2 粉煤灰掺量对钢筋与粉煤灰混凝土的粘结-锚固位置的影响 由试件中钢筋各点应变差绘制钢筋粉煤灰混凝土的粘结-锚固位置关系曲线,如图 5 所示。在各级荷载作用下,试件的加载端和自由端的粘结应力均为 0。

在未掺粉煤灰的试件中,如图 5(a),其局部粘结应力主要分布在锚固段中部,其粘结应力集中位置并没有随着粘结应力的增大而改变位置,说明对于此试件来说,5d 的锚固长度满足锚固要求;在粉煤灰掺入量为 10% 的试件中,如图 5(b),由于掺入少量粉煤灰起到能够使混凝土内部结构变得致密均匀的作用有限,且使基体强度下降,粘结刚度降低,粘结应力峰值位置向自由端移动到区段 4 内,并且拉拔荷载越大,粘结应力分布越不均匀;粘结应力集中区域随着粉煤灰掺量的增加逐渐由自由端向加载端移动,当粉煤灰掺量为 20%~30% 时,如图 5(c)、(d),粘结应力在锚固长度内均匀分布,主要分布于区段 2、3 内,即粉煤灰的适量掺入有利于拉拔荷载在锚固段内均匀传递以及混凝土与钢筋间粘结应力的均匀分布,对试件的内部均匀受力起到一定的增强作用;当粉煤灰掺入量为 40% 时,如图 5(e),应力分布曲线波峰前移到区段 1,粘结应力在区段 2、3、4 内缓慢下降,且保持较高的粘结强度,为钢筋与混凝土间的粘结强度达到极限后提供一定粘结强度储备,在极限粘结强度破坏后能够继续承担一定的荷载。

适量掺入粉煤灰对钢筋混凝土间粘结-锚固的影响作用较为明显,由于掺入粉煤灰的混凝土试件内部变得均匀密实,且随着粉煤灰掺量的增大,试件强度逐渐降低,钢筋混凝土间粘结刚度减小,即荷载相同时,自由端滑移量增大,使得荷载在锚固段内能够比较均匀地传递到自由端,且能够使钢筋的粘结应力均匀分布,有利于钢筋混凝土间的粘结性能。

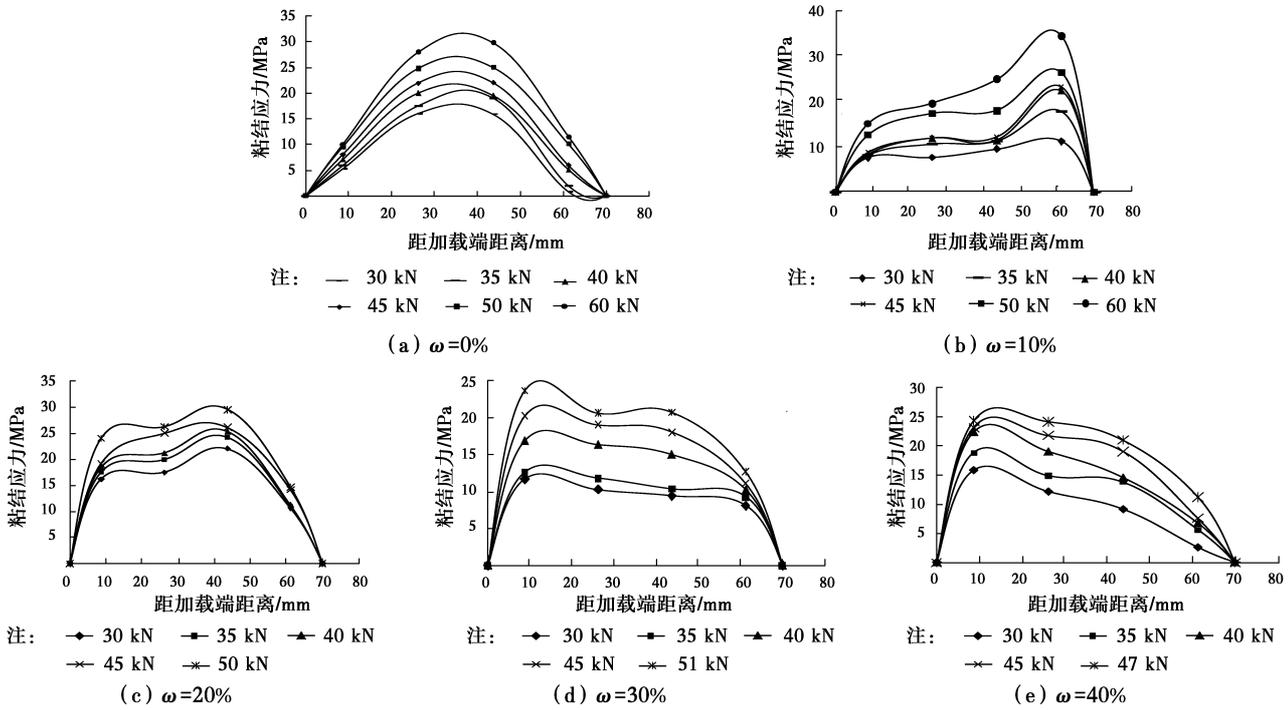


图5 不同粉煤灰掺量下试件的粘结-锚固关系曲线

Fig. 5 The curve of bonding-anchoring with different content of fly ash

3.2 冻融环境下钢筋与粉煤灰混凝土间的粘结性能

3.2.1 冻融循环对粘结强度-滑移的影响 不同粉煤灰掺量试件在冻融循环作用下的粘结强度-滑移的曲线如图6所示。

由图6(a)可知,经历冻融循环作用后,普通混凝土试件的粘结强度-滑移曲线变化趋势基本相同。随着冻融循环次数的增加,峰值点对应的极限粘结

强度值逐渐降低,且曲线下降段的下降速度加快,冻融循环次数越多试件越容易进入残余阶段。残余阶段的粘结强度值亦随着冻融循环次数的增加而逐渐减小,冻融循环为100次时,残余段的粘结强度几乎接近于0,不能够继续承担荷载。将经历冻融试验的试件与未冻融的试件相比较可以得出结论,普通混凝土试件的抗冻性较差。

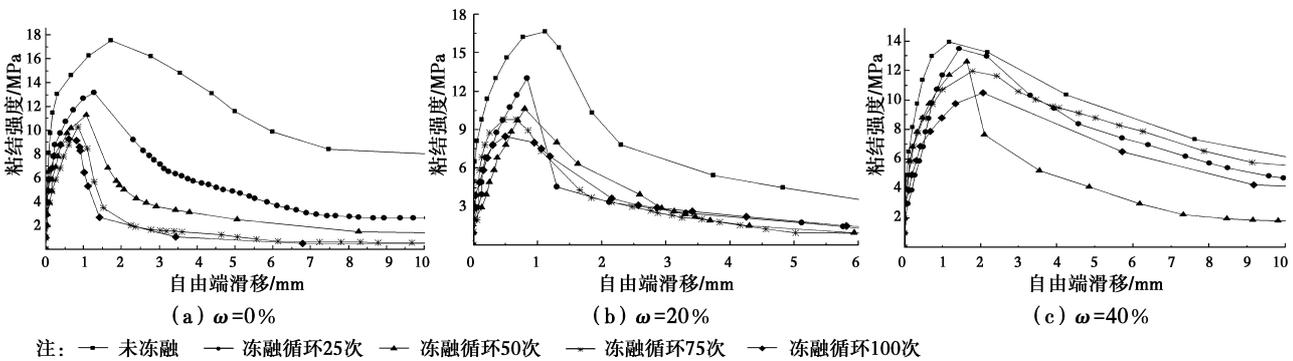


图6 冻融环境下试件的粘结强度-滑移曲线

Fig. 6 The curve of bonding strength-slip after freeze-thaw

图6(b)中掺入20%粉煤灰的混凝土试件的粘结强度-滑移曲线峰值变化趋势与未掺粉煤灰的普通混凝土试件相似,均随着冻融循环次数的增加而

减小。经历冻融损伤的粉煤灰混凝土试件的曲线在下降阶段与残余阶段较为接近,都较早地进入残余阶段,残余段粘结强度较小。

由图 6(c) 可以看到, 粉煤灰掺量为 40% 的混凝土试件, 在经历不同冻融循环之后, 粘结-滑移曲线在下降段的变化趋势更为平缓, 且粘结强度-滑移曲线变化趋势接近于未冻融试件的曲线, 在试件破坏后仍然能保持较高的承载能力, 粘结强度下降缓慢, 不会在试件达到极限粘结强度之后出现脆性破坏。残余阶段的残余粘结强度较普通混凝土试件和 20% 掺量的粉煤灰混凝土试件更高。冻融 50 次时, 粉煤灰混凝土整体的冻融损伤较小, 而局部区域(粘结界面附近)的混凝土受冻融影响较大, 试件受拔出荷载时, 混凝土保护层的变形协调能力差, 在试件达到极限粘结强度后, 粘结界面附近的混凝土与粘结界面较远处的混凝土易产生相对滑动, 试件的粘结强度在曲线下下降段迅速下降。冻融 75、100 次时, 粉煤灰混凝土基体受到的冻融损伤与粘结界面附近混凝土受到的冻融损伤都比较大, 混凝土保护层表现出较好的变形协调能力, 在试件达到极限粘结强度后, 混凝土保护层不会出现相对滑动现象, 试件保持较高的粘结强度, 在曲线下下降段平缓降低。

综合上述结果可以得出, 掺入 40% 粉煤灰对于混凝土试件在冻融环境下的粘结性能有一定的增强作用, 在试件破坏后能保持较好的粘结性能。

3.2.2 冻融循环对钢筋与粉煤灰混凝土间的粘结性能的影响 对冻融后的钢筋粉煤灰混凝土试件直接拔出试验所得试验数据进行整理, 绘制不同粉煤灰掺量混凝土试件的混凝土立方体抗压强度、试件的极限粘结强度和极限粘结强度对应滑移量在冻融环境中的变化曲线。

由图 7 可知, 混凝土抗压强度随着冻融次数增多逐渐下降。当冻融循环超过 50 次时, 下降幅度明显增大, 粉煤灰掺量为 0% 的混凝土试块从冻融 50~100 次, 其抗压强度下降了 37.66%, 而粉煤灰掺量为 40% 的混凝土试块的抗压强度则下降幅度较为平缓, 降低了 26.16%, 大量掺入粉煤灰使得混凝土抗压强度的下降幅度得到一定缓解, 且在经历冻融循环之后, 粉煤灰掺量为 40% 的混凝土立方体抗压强度要比粉煤灰掺量为 20% 的混凝土试块的强度高。冻融次数为 100 次时, 粉煤灰掺量为 40% 的粉煤灰混凝土试块的抗压强度与未掺粉煤灰的混凝土试块相差不大, 均接近于 25 MPa。

由图 8(a) 可见, 随着冻融循环次数的增多, 试件破坏时的极限粘结强度逐渐减小, 未掺粉煤灰的试件冻融循环 100 次时, 试件的极限粘结强度比未

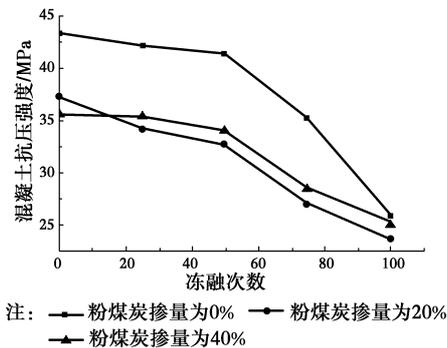
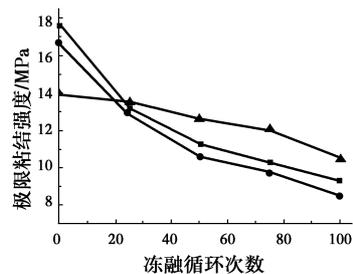
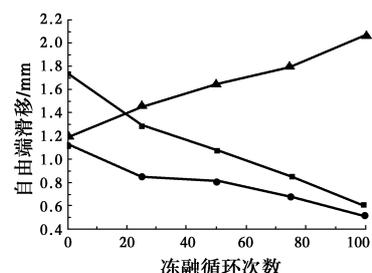


图 7 冻融环境下粉煤灰混凝土抗压强度
Fig. 7 Compressive strength of fly ash concrete after freeze-thaw

冻融试件降低 8.29 MPa, 降幅达 47.24%, 粉煤灰掺量为 20% 的试件的极限粘结强度下降趋势与普通混凝土较为接近, 下降幅度达到 49.13%; 而粉煤灰掺量 40% 的试件, 冻融循环 100 次时, 试件破坏时其极限粘结强度与未冻融的试件相比, 仅下降 3.46 MPa, 降幅为 24.80%。经历冻融试验后, 粉煤灰掺量为 40% 的试件其极限粘结强度要比普通混凝土和粉煤灰掺量为 20% 的试件的强度高, 冻融 100 次时, 粉煤灰掺量为 40% 的试件比普通混凝土试件的极限粘结强度高 1.23 MPa, 且在冻融环境下, 其极限粘结强度下降趋势最为平缓。混凝土中



(a) 冻融环境下钢筋混凝土极限粘结强度



(b) 冻融环境下极限粘结强度对应自由端滑移量

注: —□— ω=0% —●— ω=20% —▲— ω=40%

图 8 冻融循环作用下钢筋粉煤灰混凝土间粘结性能曲线
Fig. 8 The curve of bonding performance between steel and fly ash concrete after freeze-thaw cycle

掺入40%粉煤灰可以起到密实混凝土、改善内部孔结构,减小基体中自由水的渗透的作用,从而提高试件的抗冻性,有利于提高试件在冻融环境下的粘结性能。

图8(b)为冻融循环作用下试件的极限粘结强度对应的钢筋自由端滑移量。对于粉煤灰掺量为0%和20%的试件,滑移量随冻融次数的增大而减小,分别减小了1.13、0.62 mm;当粉煤灰掺量为40%时,试件最大拉拔荷载对应的滑移量则是随冻融损伤的加剧而增大的,且增加幅度较大。冻融次数为100次时,不掺粉煤灰的滑移量较未冻融试件下降了65.32%,粉煤灰掺量为20%时,下降了

55.36%,而粉煤灰掺量为40%的试件反而上升了73.11%。

3.2.3 冻融循环对粉煤灰混凝土的粘结-锚固位置的影响 由试验结果可知,尽管在混凝土试件中掺入粉煤灰会降低混凝土基体的抗压强度和粘结强度,但掺入大量的粉煤灰能够使基体内部变得致密均匀,钢筋与混凝土间的粘结刚度降低,使混凝土试块内部均匀受力,有利于粘结应力的传递。在冻融环境中,粉煤灰掺量为40%时,钢筋与混凝土间粘结性能较好,因此,选用粉煤灰掺量为40%的钢筋混凝土试件进行冻融循环作用后钢筋粘结应力-锚固位置分析。

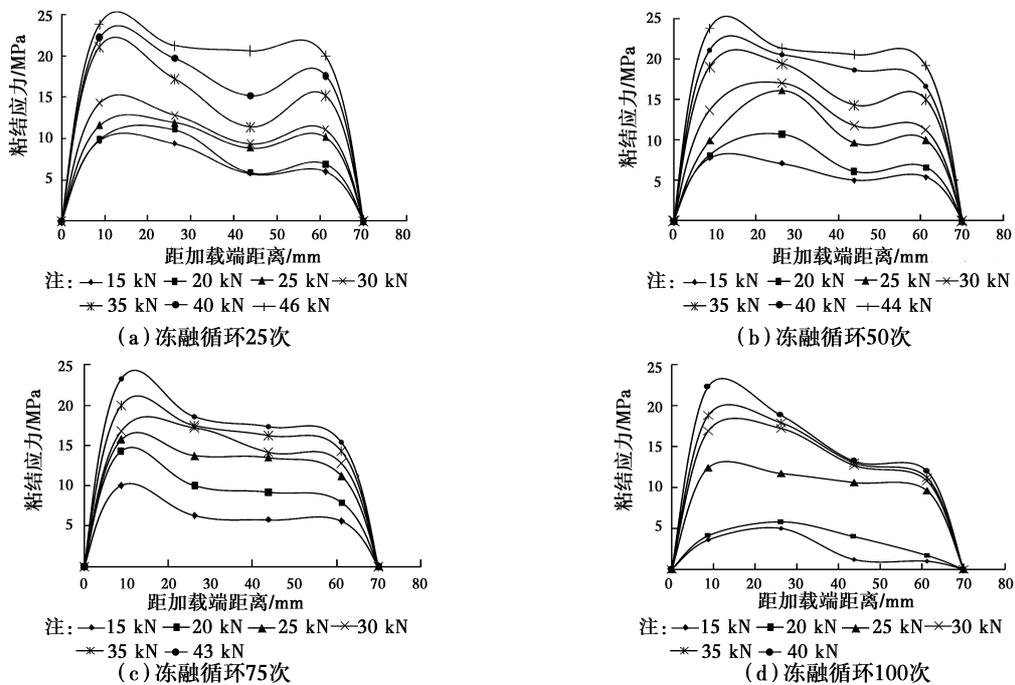


图9 冻融环境下粉煤灰混凝土试件钢筋应变-锚固关系

Fig. 9 The curve of steel bar strain-anchoring after freeze-thaw

未冻融的试件,如图5(e),其粘结应力曲线的峰值位于区段1内;当冻融次数较少时,如图9(a)、(b),钢筋锚固长度内的粘结应力分布较为均匀,说明试件受冻融循环作用后,混凝土内部受到冻融损伤,混凝土与钢筋粘结刚度稍有减小,有利于钢筋粘结应力向自由端传递,使粘结应力在锚固段内均匀分布;随着冻融次数的增加,如图9(c)、(d),粘结应力的峰值逐渐且缓慢的向加载端区段1内移动,且拉拔荷载越大,粘结应力分布不均匀现象越明显,原因在于冻融循环使混凝土孔隙结构损伤加剧,试件所能承受的粘结强度降低,当荷载增加时,加载端钢筋与粉煤灰混凝土的粘结作用易破坏,而在区段2、3、4内仍能保持较高的粘结强度,所以,在加载端钢

筋的应变差较大,在加载端出现了粘结应力峰值。由此可以推断,当钢筋粉煤灰混凝土试件由于冻融循环而产生粘结强度破坏时,锚固段自由端可以继续提供一定的粘结强度。

4 结论

通过对钢筋粉煤灰混凝土试件在冻融循环作用后的直接拔出试验,得出冻融作用和粉煤灰掺量对钢筋与粉煤灰混凝土间粘结性能的影响,主要结论如下:

1)掺入适量粉煤灰能够降低钢筋与混凝土间的粘结刚度,有利于粘结应力在钢筋锚固段均匀传递;试件中粉煤灰掺量越大,粘结强度粘结应力峰值

越小。

2) 冻融循环作用次数越多, 混凝土立方体抗压强度、粘结应力峰值越小, 但随粉煤灰掺量的增加, 试件粘结性能的冻融损伤有所缓解, 相较于普通混凝土试件表现出一定的抗冻性。

3) 冻融环境下, 大量掺入粉煤灰, 钢筋混凝土间极限粘结强度下降趋于平缓, 且降幅减小, 有利于钢筋与混凝土间的粘结性能, 且随着冻融循环次数的增加, 钢筋混凝土间极限粘结强度对应的钢筋自由端位移量逐渐增大, 在试件破坏之后表现出比普通混凝土更好的粘结性能。

参考文献:

- [1] 汪潇, 王宇斌, 杨留栓, 等. 高性能大掺量粉煤灰混凝土研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(3): 523-527.
Wang X, Wang Y B, Yang L S, et al. High-performance high-volume fly ash concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(3): 523-527. (in Chinese)
- [2] 李伯潇, 牛建刚, 冉祥富. 钢筋与粉煤灰混凝土的粘结性能研究[J]. 广西大学学报 2014, 39(4): 724-731.
Li B X, Niu J G, Ran X F. Research on bonding properties of fly ash reinforced concrete [J]. Journal of Guangxi University, 2014, 39(4): 724-731. (in Chinese)
- [3] Sarker P K, Mcbeath S. Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements [J]. Construction and Building Materials, 2015, 90: 91-98.
- [4] Dinakar P, Babu K G, Santhanam M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(10): 880-886.
- [5] 赵羽习. 钢筋混凝土粘结性能和耐久性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [6] 王玉田, 姜福香, 赵铁军, 等. 冻融循环下 CFRP-高性能混凝土的粘结性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(2): 85-91.
Wang Y T, Jiang F X, Zhao T J, et al. Bond properties of CFRP-high performance concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(2): 85-91. (in Chinese)
- [7] 徐港, 李运攀, 潘琪, 等. 盐冻环境下钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3): 86-91.
Xu G, Li Y P, Pan Q, et al. Experimental analysis on flexural performance of reinforced concrete beam in salt-frost environment [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(3): 86-91. (in Chinese)
- [8] 张燕. 冻融循环和氯盐腐蚀作用下钢筋与混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.
- [9] Hanjari K Z, Utgenannt P, Lundgren K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 244-254.
- [10] 冀晓东, 宋玉普. 冻融循环后光圆钢筋与混凝土粘结性能退化机理研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 70-74.
Jiao X D, Song Y P. Mechanism of bond degradation between concrete and plain steel bar after freezing and thawing [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 70-74.
- [11] Khalaf J, Huang Z H, Fan M Z. Analysis of bond-slip between concrete and steel bar in fire [J]. Computers & Structures, 2016, 162: 1-15.
- [12] Diab A M, Elyamany H E, Hussein M A, et al. Bond behavior and assessment of design ultimate bond stress of normal and high strength concrete [J]. Alexandria Engineering Journal, 2014, 53(2): 355-371.
- [13] Al-Mahmoud F, Mechling J M, Shaban M. Bond strength of different strengthening systems -concrete elements under freeze-thaw cycles and salt water immersion exposure [J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 399-409.
- [14] Gambarova P G, Rosati G. Bonding and splitting in reinforced concrete: test results on bar pull-out [J]. Materials and Structures, 1996, 29(189): 267-276.
- [15] Arezoumandi M, Wolfe M H, Volz J S. A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high-volume fly ash concrete and conventional concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 919-924.
- [16] Costel A, Foster S J. Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 72: 48-53.
- [17] 胡晓鹏, 牛荻涛, 张永利. 粉煤灰混凝土黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 139-146.
Hu X P, Niu D T, Zhang Y L. Experimental research on bonding performance of reinforcement and fly ash concrete [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 139-146. (in Chinese)