

持载和冻融循环对钢筋混凝土粘结性能的影响

朱方之¹, 马志鸣², 蒋连接¹, 左 工¹

(1. 宿迁学院建筑工程学院, 江苏 宿迁 223800; 2. 同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 通过中心拉拔试验, 研究了钢筋持载与冻融循环耦合作用下钢筋混凝土的粘结性能退化规律。结果表明, 冻融循环低于25次时, 钢筋持载和冻融耦合对非引气混凝土粘结强度和峰值滑移影响较弱; 冻融循环50次时, 持载30%和50%试件的极限粘结强度分别降低22.8%和48.5%。即混凝土冻融损伤存在一个阈值。当冻融损伤低于该值, 钢筋持载的耦合效应不明显; 反之, 冻融损伤高于该值, 钢筋持载和冰胀压力相互促进冻融裂缝的开展, 加速钢筋混凝土粘结性能退化过程, 甚至在服役过程中提前发生劈裂破坏。另外, 钢筋持载和冻融循环耦合作用对引气混凝土试件的粘结性能影响不明显。

关键词: 粘结性能; 持载; 冻融循环; 混凝土

中图分类号: TU 502.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0643-05

Study of influence of sustained load and freeze-thaw cycling on the bond behavior of steel reinforced concrete

ZHU Fangzhi¹, MA Zhiming², JIANG Lianjie¹, ZUO Gong¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Suqian College, Suqian 223800, China;

2. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For studying the degradation law of cohesive property in reinforced concrete under the coupling effect of sustained load of steel and freeze-thaw damage, the fresh concrete and air entrained concrete are respectively prepared. After different freeze-thaw cycles, the cohesive property between concrete and steel was tested through a pull-out test of steel. The results show that the influence of combined action on the bonding strength and peak value of slip is not obvious when the freeze-thaw cycles are below 25 times. Then the freeze-thaw cycles reach 50 times, the bonding strength of concrete with 30% and 50% percentage of ultimate load respectively decrease by 22.8% and 44.5%, which shows that a threshold existed. When the freeze-thaw damage is below the threshold, the coupling effect caused by sustained load of steel is not significant. However, the coupling effect becomes more obvious when the freeze-thaw damage is above the threshold. The coupling effect between the sustained load of steel and expansion pressure accelerates the crack development, which leads to the degeneration of cohesive property and splitting failure in reinforced concrete. Moreover, the influence of coupling effect on the cohesive property is not obvious for air-entrained concrete.

Key words: bond behavior; sustained load; freeze-thaw cycling; concrete

众所周知, 粘结是钢筋与混凝土共同工作的基础^[1]。混凝土冻融劣化将对钢筋与混凝土二者的粘结性能产生重要影响^[2-4]。赵娟^[5]、冀晓东^[6]等采用中心拉拔试验、何世钦^[7]和日本学者Yasuhiko Sato采用梁式粘结试验分别研究了冻融循环对钢筋粘结性能的影响, 结果均表明冻融后试件的粘结刚度和强度降低, 粘结滑移的延性有所增加, 粘结性能随冻融循环次数增加逐渐退化。但是限于冻融试验箱尺寸、试验装置及试验时间等因素的影响, 现有的研究主要是在无载状态下开展的。

正常服役的钢筋混凝土结构, 构件中的钢筋一般处于持载状态。当构件中钢筋持载与冻融循环耦合作用时, 钢筋与混凝土粘结性能的劣化规律与机理研究较少。为此, 本文制作了引气混凝土和非引气混凝土两种直拉粘结试件, 通过弹簧持载装置,

分别在遭受若干次冻融循环作用后进行中心拉拔试验, 测定钢筋与混凝土的粘结性能, 以此分析钢筋持载与冻融循环耦合下粘结性能的退化规律与机理。研究结果对提高严寒地区的钢筋混凝土结构设计提供试验依据。

1 试验概况

1.1 混凝土配合比

试验采用非引气混凝土(编号为B)和引气混凝土(编号为BA)两种, 水灰比均为0.5。混凝土的配合比为水泥: 砂: 石子: 水=320: 653: 1267: 160, 减水剂分别为3.2 kg和1.92 kg。原材料: 42.5 级普通硅酸盐水泥; 粒径为5~25 mm 连续级配花岗岩质碎石; 细度模数为2.85的天然河砂; 拌合水为普通自来水; 引气剂为SJ-3型三萜系粉末状引气剂,

设计掺量为水泥用量的万分之二,实测的新拌混凝土含气量为5.1%;外加剂为一种聚羧酸型高效减水剂。通过调整减水剂的掺量,使得新拌混凝土坍落度为100~120 mm。

在浇筑粘结试件时,分别按每种混凝土预留尺寸为100 mm的立方体试块6组,采用同条件养护,同条件冻融。拉拔试验前应先进行抗压强度、劈裂抗拉强度测定。试验结果列于表1中。

表1 混凝土力学性能
Tab.1 Mechanic properties of concrete (kN/m³)

混凝土	B			BA		
	0	25	50	0	100	300
强度						
f_{cu}^0	49.3	41.8	31.6	39.6	35.9	30.7
f_t^0	2.98	2.53	2.24	2.68	2.45	2.13

注: f_{cu}^0 为混凝土立方体抗压强度实测值; f_t^0 为混凝土立方体劈裂强度实测值。

1.2 试件设计

试件尺寸与数量: 基于标准冻融试件尺寸,采用图1所示的粘结试件。钢筋为HRB335级直径12 mm的螺纹钢筋,其中,加载端和自由端各有一无粘结段,长度为50 mm和30 mm。试件浇筑前,用直径稍大于钢筋直径的PVC塑料管套住无粘结部位,并用石蜡将塑料管两端密封,防止浇注混凝土时水泥浆体进入管内。粘结段长度 L_d 采用7倍钢筋直径。

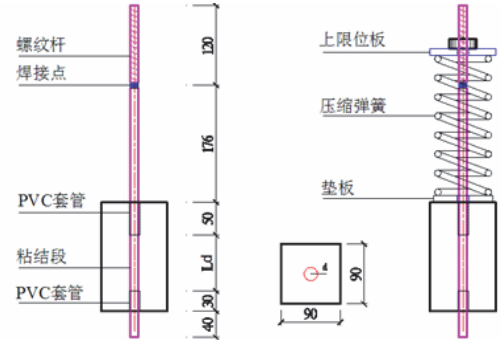


图1 粘结试件示意图
Fig.1 Schematic drawing of bond specimen

粘结试件的冻融循环次数和加载水平情况列于表2中。

钢筋持载装置: 弹簧加载法常用于长期加载试验。原理是依靠压缩后弹簧的恢复力对结构施加荷载。持载后的粘结试件如图2所示。限于弹簧承载力的限制,本文仅设计极限拉拔力的30%和50%两个持载水平。加载前随机取3个试件,做中心拉拔试验,以确定该批试件的极限拉拔力。考虑限位板、螺帽挤压和钢筋变形可能引起弹簧卸载,实际的钢筋持载值均提高5%施加,钢筋持载值列于表3中。

表2 粘结试件
Tab.2 Bond specimens

试件编号	混凝土	冻融循环次数	持载水平
B0	非引气混凝土	0	0
B25	非引气混凝土	25	0
B50	非引气混凝土	50	0
B25-30%	非引气混凝土	25	30%
B25-50%	非引气混凝土	25	50%
B50-30%	非引气混凝土	50	30%
B50-50%	非引气混凝土	50	50%
BA300	引气混凝土	300	0
B300-30%	引气混凝土	300	30%
B300-50%	引气混凝土	300	50%



图2 持载的粘结试件
Fig.2 Bond specimen with sustained load
表3 钢筋持载值(kN)
Tab.3 The sustained load value of steel (kN)

试件编号	极限拉拔力				钢筋持载值	
	1	2	3	均值	30%	50%
B	42.8	44.6	49.0	45.5	13.7	22.8
BA	32.6	34.5	35.8	34.3	10.3	17.2

1.3 冻融试验

粘结试件完成持载后,与未持载试件一起放入水中浸泡4天。冻融试验参照GB/T 50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》中快冻法进行。冻融过程中,水面高于试件上垫板5 mm。中心试块采用100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件。根据同配比混凝土的冻融试验结果,非引气混凝土试件冻融循环次数分别为25次和50次,引气混凝土试件的冻融循环次数为300次。

1.4 中心拉拔试验

中心拉拔试验在电子拉伸试验机(极限拉力250 kN)上完成,如图3所示。试验前,先卸去持载装置,然后将持载端钢筋穿过加载架上部钢板与试验机夹头相连,加载架下部通过一个凹凸连接件与试验机底座相连,保证底部为铰接约束。拔出试验采用“行程控制”,以0.5 mm/min的速度控制试验机上夹头的位移,直至试件破坏。



图3 拔出试验加载装置
Fig.3 Loading set-up of pull-out test

1.5 数据采集及辅助设备

试验过程中主要采集拉拔荷载和自由端滑移量。拉拔荷载由电子拉伸试验机采集并录入计算机内, 自由端钢筋相对于混凝土的滑移量由固定在钢筋自由端的引伸计采集并录入计算机内。拉拔荷载和自由端滑移量均为同步采集。

2 结果与分析

2.1 非引气混凝土试件冻融后的粘结性能

2.1.1 冻融特征

无论试件是否持载, 试件表面的冻融破坏现象基本类似。即25次冻融循环时, 试件表面未见明显的剥落; 50次冻融循环时, 试件表面水泥浆剥落较多, 部分石子外露, 角部混凝土有掉落现象。但是持载50%的粘结试件, 有两个试件在循环次数达到40次前已经发生混凝土劈裂破坏, 机箱盖上留有劈裂破坏时钢筋冲击留下的凹痕; 第三个试件在冻融循环50次时, 试件表面有细小的裂缝, 持载的弹簧发生了明显的卸载现象, 如图4所示。



图4 持载50%粘结试件冻融过程破坏
Fig.4 Frost damage of specimens at 50% load level

2.1.2 拉拔破坏特征

无论试件是否持载, 拉拔破坏形态均为顺筋劈

裂破坏, 表现出脆性破坏特征。破型观察可以发现, 冻融25次的粘结试件, 劈裂面上有部分石子拉断现象, 冻融50次的试件劈裂面上, 基本是沿水泥砂浆和石子的界面破坏。钢筋肋间嵌有较多的锥状混凝土粉末, 混凝土上的凹槽处有磨平的现象。

2.1.3 粘结滑移曲线

图5为未持载粘结试件荷载-滑移曲线。可以看出, 未遭受冻融循环的试件B0达到峰值荷载后曲线迅速下降, 劈裂段陡而且短。遭受冻融循环的试件微滑移段荷载值、滑移段的斜率以及拉拔极限荷载均有明显的降低。

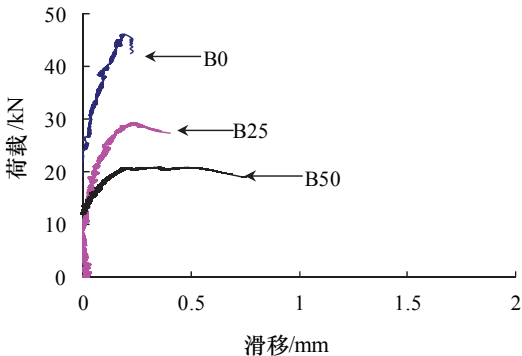


图5 未持载试件荷载-滑移曲线
Fig.5 Load-slip curves of specimens without sustained load
已有的试验研究表明, 粘结应力沿钢筋的长度是变化的, 但在分析粘结性能的影响因素时, 通常采用平均粘结强度作为研究钢筋粘结性能的基本指标, 可由式(1)得到

$$\tau = F / (\pi \cdot d \cdot l_a) \tag{1}$$

式中: F 为钢筋的拔出荷载; d 为钢筋的直径; l_a 为钢筋的粘结长度。

根据图5的荷载—滑移曲线可以得到经受冻融作用后的峰值荷载 F_u 和峰值滑移 S , 并通过式(1)得到极限粘结强度 τ_u 。表4列出了各组试件粘结性能的特征值。可见, 遭受冻融循环25次和50次后, 试件的极限粘结强度分别降低37.2%和54.7%; 峰值滑移分别增加26.3%和83.5%。

表4 未持载试件粘结性能特征值
Tab.4 Bond performance characteristic values of specimens without sustained load

试件编号	峰值荷载 F_u/kN	极限粘结强度 τ_u/MPa	峰值滑移 S/mm	劈裂抗拉强度 f_t/MPa	τ_u/f_t	破坏形式
B0	45.5	14.38	0.194	2.98	4.83	劈裂
B25	28.6	9.03	0.245	2.53	3.57	劈裂
B50	20.6	6.51	0.356	2.24	2.91	劈裂

表5 持载试件粘结性能特征值
Tab.5 Bond performance characteristic values of specimens with sustained load

试件编号	峰值荷载 F_u/kN	极限粘结强度 τ_u/MPa	峰值滑移 S/mm	劈裂抗拉强度 f_t/MPa	τ_u/f_t	破坏形式
B25-0	28.6	9.03	0.245	3.08	3.57	劈裂
B25-30%	31.5	9.95	0.255	3.08	3.93	劈裂
B25-50%	28.42	8.98	0.295	3.08	3.55	劈裂
B50-0	20.6	6.51	0.356	2.44	2.91	劈裂
B50-30%	15.91	5.03	0.249	2.44	2.25	劈裂
B50-50%	10.61	3.35	0.784	2.44	1.50	劈裂

图6~7为持载粘结试件在冻融25次和50次循环后的荷载—滑移曲线。表5为持载试件遭受25次和50次循环后的粘结性能特征值。可见,25次冻融循环时,持载试件与未持载的试件荷载—滑移曲线基本相似。极限粘结强度有所提高,峰值滑移基本相近。这表明在遭受较少冻融次数时,钢筋是否持载以及持载的大小对其粘结性能影响较小。当冻融循环次数达到50次时,持载30%和50%试件的极限粘结强度分别降低22.8%和48.5%。持载水平越高,峰值荷载降低越显著。因此,钢筋持载和冻融耦合加速了粘结性能退化。

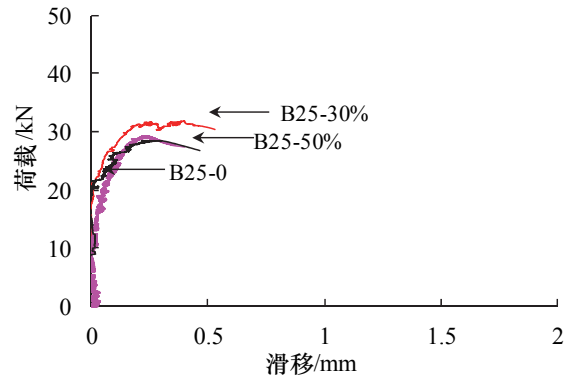


图6 持载试件荷载-滑移曲线 ($N=25$ 次)
Fig.6 Load-slip curves of specimens with sustained load

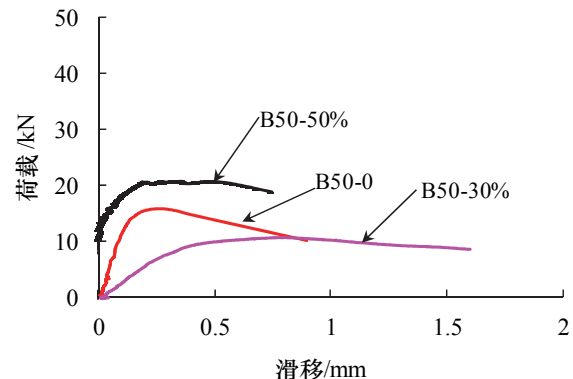


图7 持载试件荷载-滑移曲线 ($N=50$ 次)
Fig.7 Load-slip curves of specimens with sustained load

由于持载设备的限制,设定的持载水平偏少;另外每一持载水平下的冻融循环仅设置两个循环次数,所以很难回归得到持载水平和冻融循环次数耦合对粘结性能影响的表达式。但可以确定,存在

一个混凝土冻融损伤阈值,当冻融损伤低于该值时,钢筋持载对钢筋-混凝土粘结性能影响较小;当冻融损伤高于该值时,持载会加速冻融后的钢筋-混凝土粘结性能退化,即产生 $1+1>2$ 的叠加效应。

2.2 引气混凝土试件冻融后的粘结性能

2.2.1 试件冻融与拉拔破坏特征

300次冻融循环后,试件表面混凝土均出现鳞片状剥落,但深度较浅,表现出引气混凝土良好的抗冻能力。拔出破坏时,均发生顺筋劈裂破坏,表现出脆性破坏特征。但是,试件在达到拉拔荷载峰值前,自由端钢筋滑移一段后才出现劈裂裂缝,试件破坏。

2.2.2 冻融后钢筋与混凝土粘结滑移曲线

图8为300次冻融循环后的荷载-滑移曲线。可以看出,持载30%的试件相对于未持载试件的拔出荷载提高1.7%,峰值滑移降低14.7%;持载50%的试件降低7.3%左右,峰值滑移增加0.7%。即钢筋持载对引气混凝土粘结试件的峰值荷载、峰值滑移及破坏特征没有明显影响。

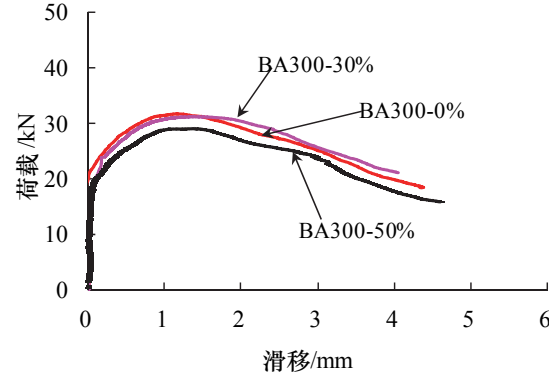


图8 引气混凝土试件荷载-滑移曲线
Fig.8 Load-slip curves of air-entrained bond specimens

2.3 粘结性能退化机理分析

遭受冻融循环的非引气混凝土粘结试件,反复的冻融循环作用破坏钢筋与混凝土界面的胶着力,降低钢筋与混凝土粘结的初始刚度;同时,钢筋周围混凝土在静水压和渗透压作用下也有一定程度损伤和微小的裂缝,如图9所示。当冻融循环的次数比较少时,这些损伤和微裂缝很小,即使在外部

的钢筋持载作用下,混凝土损伤和微裂缝也不会进一步的发展.相反,外部持载使得钢筋周围混凝土处于受压状态,对冻融微裂缝的开展起约束的作用,从而减缓了钢筋与混凝土粘结性能的退化.

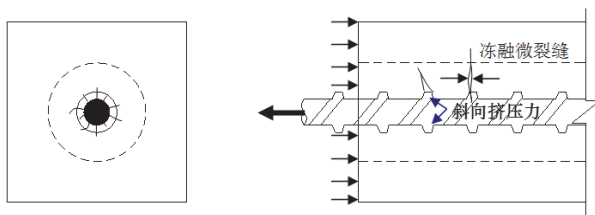


图9 混凝土冻融损伤较小时内部裂缝开展

Fig.9 Crack development in little frost-damaged concrete

图10为混凝土冻融损伤较大时,混凝土内部微裂缝开展示意图.在冻融循环过程中,钢筋周围混凝土已有较大程度损伤和大量微小的裂缝,这些损伤是各向同性的,微裂缝的发展也是随机的.钢筋持载为这些微裂缝的定向发展提供路径,裂缝的宽度和深度均有所增加.同时外部自由水及时充填,再一次冻结时,裂缝尖端将产生更大的冰胀压力,即冻融与肋前混凝土钢筋的斜向挤压和径向拉力产生复合叠加效应,促进裂缝的进一步开展.如此周而复始,直至钢筋周围混凝土内部的微裂缝迅速发展至试件表面,形成一条纵向劈裂裂缝,试件产生破坏.

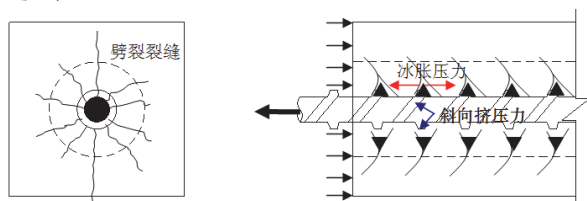


图10 混凝土冻融损伤较大时内部裂缝开展

Fig.10 Crack development in large frost-damaged concrete

一般来说,适量的引气剂可在混凝土中引入大量分布均匀、微小且不连通的气泡,能够提高混凝土的抗冻融能力.拔出试验时钢筋肋前混凝土仍能有效的发挥“楔效应”,钢筋与混凝土粘结强度降低较小.另外引气混凝土中大量的封闭球形气泡对裂缝尖端应力集中起缓冲作用,以及混凝土自身弹性模量的降低,使得试件在形成劈裂主裂缝前,钢筋发生很大的滑移.肋前和肋间混凝土不断地被挤碎,并在肋前积聚、拥塞;直至肋上部的主裂缝在向试件表面开展,并由加载端向自由端缓慢发展形成劈裂裂缝.劈裂阶段的粘结滑移曲线将从陡直趋向平缓,破坏的突然性降低.

3 结论

(1) 冻融循环25次时,钢筋是否持载以及持载的大小对粘结性能影响较小;冻融循环50次时,相对于未持载试件,持载30%和50%试件的极限粘结强度分别降低22.8%和48.5%.钢筋持载和冻融耦合加速了粘结性能退化过程.

(2) 冻融循环300次后,钢筋持载和冻融耦合作用对引气混凝土试件的粘结性能影响不明显.

(3) 非引气混凝土冻融损伤存在一个阈值.当冻融损伤低于该值,钢筋持载的耦合效应不明显;反之,冻融损伤高于该值,钢筋持载和冰胀压力相互促进冻融裂缝的开展,加速钢筋与混凝土粘结性能退化,甚至在服役过程中提前发生劈裂破坏.

参考文献 References

- [1] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
XU Youlin. Experimental study on bond anchorage behaviors between deformed reinforcing bars and concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [2] SHIH T S, LEE G C. Effect of freezing cycles on bond strength of concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 144(3): 717-726.
- [3] YASUHIKO S, HASSAN M, DAI J G, et al. Mechanical behavior of concrete and RC members damaged by freezing-thawing action[C]//Proceeding of an international workshop on durability of reinforced concrete under combined mechanical and climatic loads. Qingdao: Science Press, 2005.
- [4] HANJARI K Z, UTGENANT 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.
- [5] 赵娟, 邹超英, 王文博, 等. 冻融作用后钢筋与混凝土之间粘结性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(5): 719-722.
ZHAO Juan, ZOU Chaoying, WANG Wenbo, et al. Study on bonding property between steel rebars and concrete caused by freeze-thaw action[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2007, 23(5): 719-722.
- [6] 冀晓东. 冻融后混凝土力学性能及钢筋混凝土粘结性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
JI Xiaodong. Experimental study and theoretical analysis on the mechanical performance of concrete and bond behavior between concrete and steel bar after freezing and thawing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [7] 何世钦. 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
HE Shiqin. Experimental study on durability of reinforced concrete members in chloride environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.

(编辑 桂智刚)