

# 冻融损伤混凝土保护层锈胀开裂条件研究

王易安<sup>1</sup>, 雷永洁<sup>2</sup>, 刘西光<sup>2</sup>, 孙一豪<sup>1</sup>, 范力<sup>2</sup>

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 对经历不同冻融循环次数钢筋混凝土棱柱体进行了通电加速锈蚀试验, 研究了混凝土强度等级、冻融循环次数和保护层厚度对钢筋临界锈蚀率的影响, 并通过 DIC 技术监测了钢筋锈蚀全过程。试验结果表明: 混凝土抗压强度随冻融循环次数增加而降低。钢筋临界锈蚀率随保护层厚度与钢筋直径之比( $c/d$ )的增大整体呈上升趋势, 但随冻融循环次数增加而减小。

**关键词:** 冻融损伤; 锈胀开裂; 临界锈蚀率; DIC

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0585-06

## Research on rust expansion and cracking conditions of freeze-thaw damaged concrete protective layer

WANG Yian<sup>1</sup>, LEI Yongjie<sup>2</sup>, LIU Xiguang<sup>2</sup>, SUN Yihao<sup>1</sup>, FAN Li<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co. Ltd., Xi'an 710055, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Accelerated corrosion tests were carried out on reinforced concrete prismatic specimens with different freeze-thaw cycles, and the influences of concrete strength grade, freeze-thaw cycles and protective layer thickness on critical corrosion rate of reinforcement were studied. The whole process of reinforcement corrosion was monitored by DIC technology. The test results showed that the compressive strength of concrete decreased with the increase of freeze-thaw cycles. The critical corrosion rate of reinforcement increased with the increase of the ratio of protection thickness to reinforcement diameter ( $c/d$ ), but decreased with the increase of the number of freeze-thaw cycles.

**Key words:** freeze thaw damage; rust swelling cracking; critical corrosion rate of reinforcement; DIC

寒冷地区混凝土结构会遭受冻融循环作用, 导致混凝土内部出现微裂缝, 会加剧二氧化碳与氯离子向混凝土内部侵蚀, 使钢筋加速锈蚀<sup>[1-2]</sup>。钢筋锈蚀引起混凝土保护层开裂, 导致混凝土抗冻能力降低, 钢筋和混凝土间粘结强度降低, 严重危害结构安全<sup>[3-5]</sup>。

关于混凝土保护层锈胀开裂过程已经开展了众多试验研究。锈蚀产物会对周围混凝土产生膨胀压力, 引起保护层开裂<sup>[6-7]</sup>。氯盐环境混凝土锈胀开裂试验表明, 氯离子腐蚀作用下, 锈胀开裂持续发展, 导致混凝土开裂<sup>[8-9]</sup>。

国内外学者对冻融环境混凝土钢筋锈蚀问题开展了少量研究, 结果表明冻融循环会加速氯离子向混凝土中扩散, 从而加速钢筋锈蚀<sup>[10-12]</sup>。目

前, 关于一般大气环境和氯盐侵蚀作用下保护层锈胀开裂试验研究较多, 在冻融环境下混凝土保护层锈胀开裂问题的研究较少。

钢筋混凝土棱柱体试件在冻融循环作用下, 对其进行加速锈蚀试验, 研究了混凝土强度等级、冻融循环次数和混凝土保护层厚度对钢筋临界锈蚀率的影响, 并通过 DIC 技术监测了钢筋锈蚀全过程。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计和材料

试件设计尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm, 混凝土强度等级为 C30 和 C40, 试件混凝土保护层厚度  $c$  分别为 20、25 和 30 mm; 冻融循环次数  $N$

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178163 & 51808437); 陕西省重点研发项目(2022SF-403)

第一作者: 王易安(1970—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究工业与民用建筑。E-mail: 406283154@qq.com

通信作者: 刘西光(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事混凝土耐久性的研究。E-mail: xgliu@xauat.edu.cn

分别为 0、50、100、150 和 200 次。试件尺寸见图 1, 试件分组见表 1。

表 1 钢筋混凝土试件分组表

Tab. 1 Group table of reinforced concrete specimens

混凝土 强度等级	保护层 厚度/mm	冻融循环次数				
C30	20	0	50	100	150	200
	25	0	50	100	150	200
	30	0	50	100	150	200
C40	20	0	50	100	150	200
	25	0	50	100	150	200
	30	0	50	100	150	200

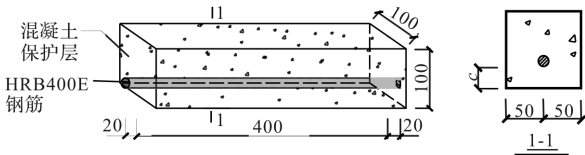


图 1 钢筋混凝土试件尺寸

Fig. 1 Size of reinforced concrete specimen

钢筋选用公称直径为 14 mm 的 HRB400E 钢筋, 屈服强度为 477.5 MPa, 弹性模量为 205.6 GPa, 伸长率为 13.6%。

每种工况下设计了 3 个试件, 试件总个数为 90 个。混凝土设计强度等级为 C30 和 C40, 混凝土立方体试件 28 d 抗压强度实测值分别为 31.23 MPa 和 45.67 MPa。

粗骨料粒径为 5~20 mm 玄武岩碎石; 细骨料为天然河砂; 采用 25%~30% 减水率的高效减水剂; 拌制水为试验室用水。

## 1.2 试件制作

用盐酸浓度为 12% 的溶液对钢筋酸洗, 除去钢筋表面杂质, 然后用清水冲洗, 放入石灰水中, 中和 10 min 后再用清水冲洗干净, 将钢筋表面擦干, 放入干燥器中 5 个小时, 温度为 60°。为避免不均匀锈蚀出现在钢筋两端, 将钢筋两侧各 70 mm 处涂抹环氧树脂, 使锈蚀情况只发生在中部, 并使用精度为 0.01 g 的电子秤对锈蚀后的钢筋称重处理, 用来计算钢筋的锈蚀率。钢筋的处理示意图如图 2 所示。



(a) 钢筋酸洗



(b) 石灰水中和



(c) 处理后钢筋



(d) 钢筋干燥保存

图 2 钢筋预处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reinforcement pretreatment

## 1.3 冻融循环试验

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T50082—2009)<sup>[13]</sup> 中“快冻法”进行冻融循环试验。

每次冻融循环在 2~4 h 内完成, 其中用于融化的时间不得小于整个冻融循环时间的四分之一; 在冷冻和融化的过程中, 试件中心温度的最低温度和最高温度应分别控制在  $-18 \pm 2$  °C 和  $5 \pm 2$  °C, 在任意时刻, 试件中心温度不得高于 7 °C, 且不得低于  $-20$  °C<sup>[13]</sup>。本次试验采用的冻融循环的温度变化规则如图 3 所示。

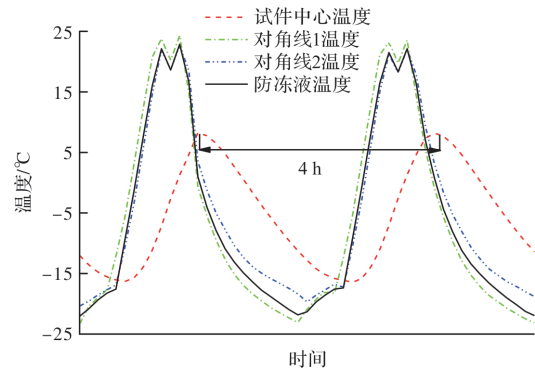


图 3 冻融试验温度变化

Fig. 3 Temperature change of freeze-thaw test

## 1.4 外加电流加速锈蚀试验

试验采用半浸泡外加电流加速锈蚀的方法对冻融后的钢筋混凝土棱柱体试件进行锈蚀, 试验的过程中保证浸泡的盐水高度不超过钢筋。在钢筋外露一侧焊接 1 根塑料护套铜线。将端部接头和导线处涂抹环氧树脂, 防止其锈蚀。对试件进行通电锈蚀。将已经制作好散斑的钢筋混凝土部分置于浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中, 浸泡深度为 40 mm。

试验中在底部采用不锈钢螺栓作为支撑, 其直径为 50 mm, 厚度为 20 mm, 不锈钢作为辅助电极(阴极), 棱柱体内待锈钢筋作为阳极, 电流密度大小设置为  $2 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ 。

为了更为准确地判断试件保护层锈胀开裂时

刻,采用了数字图像技术 DIC(Digital Image Correlation)监测混凝土表面的位移分布。

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 冻融后混凝土力学性能分析

冻融损伤混凝土受压破坏形态见图4。经过50次冻融循环后,试件表面没有特别明显的变化,

出现了微小的麻点和坑蚀。经历100次冻融循环后,两种强度的混凝土表面胶凝材料开始部分流失,细骨料逐渐露出并脱落。经历150次冻融循环后,表面胶凝材料基本完全脱落,细骨料开始外露,部分试件棱角缺失,且C30混凝土的整体脱落程度比C40严重。经历200次冻融循环后,粗骨料开始外露,混凝土表面凹凸不平。

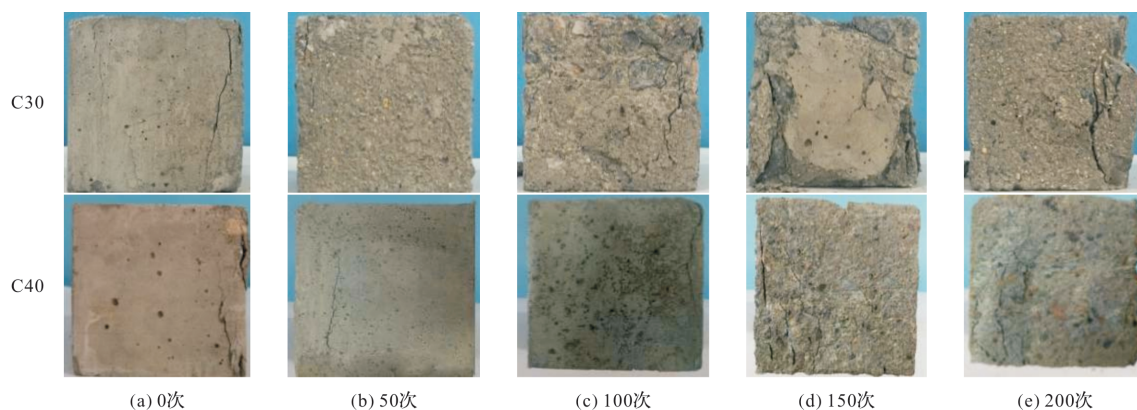


图4 冻融损伤混凝土受压破坏形态

Fig. 4 Compression failure pattern of freeze-thaw damaged concrete

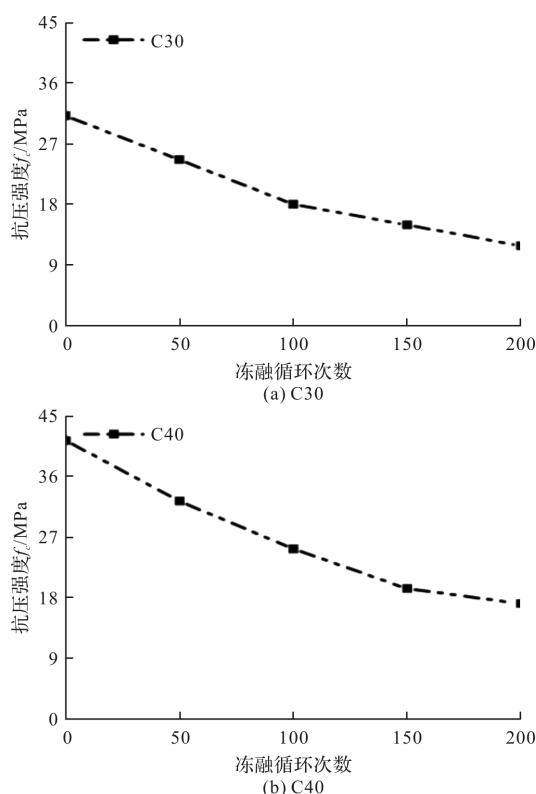


图5 不同冻融循环次数下的混凝土抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of concrete under different freeze-thaw cycles

混凝土试块的抗压强度随冻融循环次数的变化如图5。混凝土抗压强度随冻融循环次数增加而降低,且随着混凝土强度等级越低,混凝土抗压

强度的损失率越高。在经历200次冻融循环后,两种强度等级混凝土抗压强度分别下降了58.6%和28.8%。

### 2.2 保护层开裂全过程及裂缝扩展规律

本文采用VIC-2D软件对图形进行后处理,如图6。

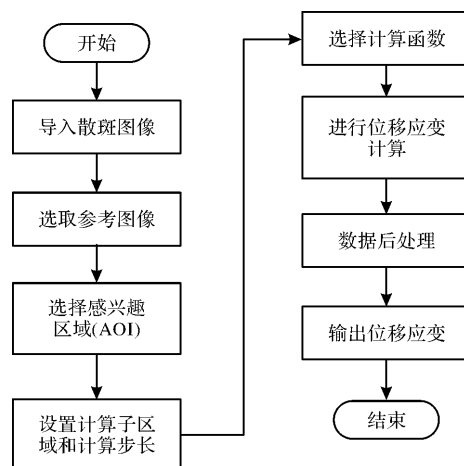


图6 图像处理过程

Fig. 6 Image processing process

每组试件大约30d左右开裂,处理后部分钢筋混凝土试件在不同保护层厚度下,从加速锈蚀到保护层锈胀开裂应变云图如图7。锈胀开裂保护层时刻处理后部分钢筋混凝土试件在不同保护层厚度下从通电锈蚀到混凝土保护层锈胀开裂应变云

图如图7所示。锈胀开裂发生时混凝土表面形貌如图8所示。从图中可以看出,当混凝土应变云图显示即将开裂时,混凝土表面出现铁锈,呈点状或沿着纵筋方向分布,当混凝土表面出现锈胀开裂情况时,可明显看到混凝土表面出现细小的黑线,且表面开裂位置呈现随机出现的现象。混凝土表面开裂的位置由于保护层厚度不同而出现不同的情况。当保护层较小时,裂缝易从角部开始产生,因角部连接电源,导致电流密度相对集中,因此,

开裂易从钢筋边缘开始。随着保护层开裂,红锈沿着裂缝逐渐扩散到钢筋表面。



图7 混凝土锈蚀过程表面应变云图

Fig. 7 Surface strain nephogram of concrete corrosion process

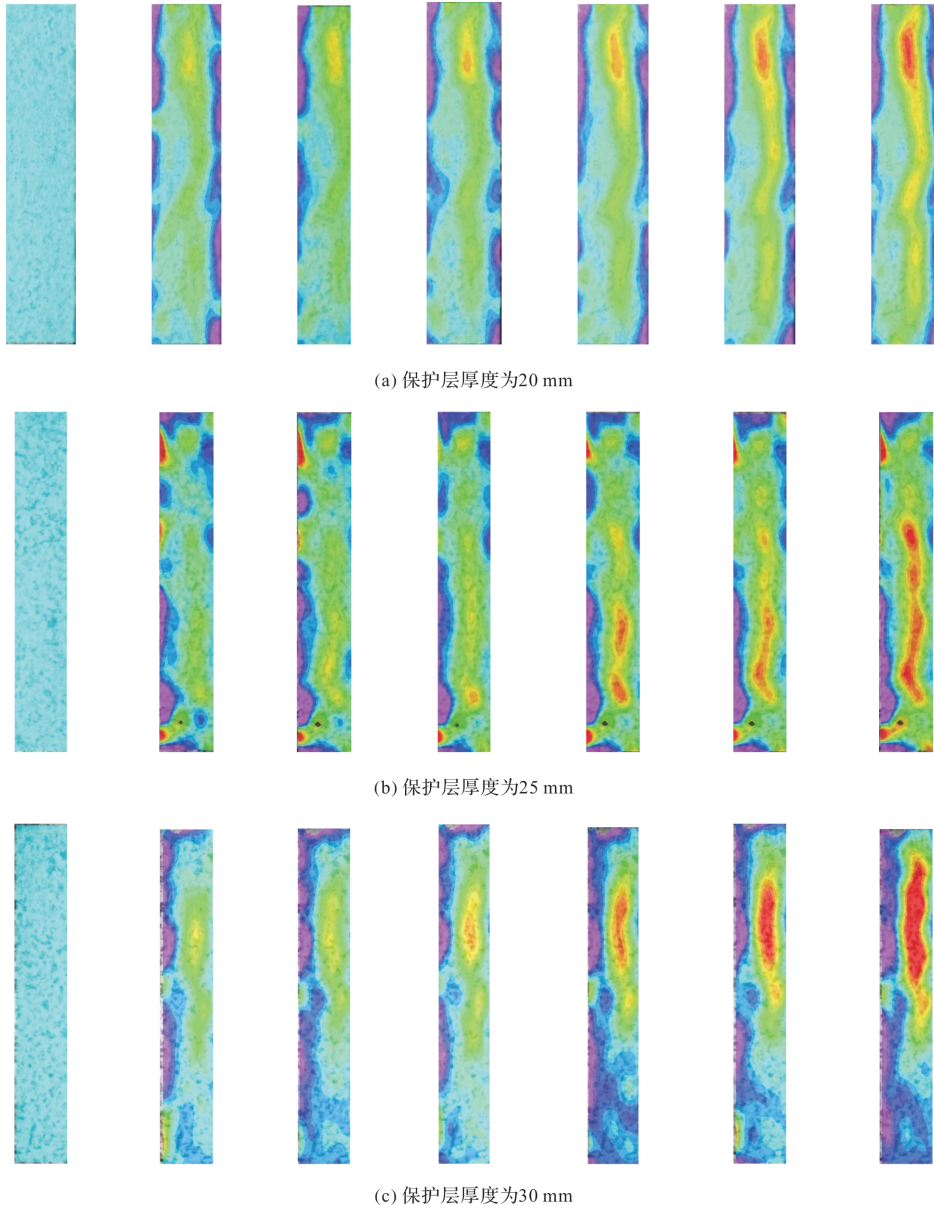


图8 锈胀开裂时刻保护层混凝土表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of concrete cover at the time of rust expansion cracking

### 2.3 钢筋临界锈蚀率试验结果

当混凝土应变云图中出现裂缝后,将钢筋混凝土棱柱体破型,并取出棱柱体内部钢筋,并去除钢筋表面的产生的铁锈。

对除锈后的钢筋进行称重,结合未锈蚀前钢

筋的重量,可利用式(1)进行计算钢筋的临界锈蚀率,试验结果见表2。

$$\rho = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为钢筋失重率,%;  $W_0$  和  $W_1$  分别为钢筋

锈蚀前后质量, g.

表 2 钢筋锈蚀率试验结果  
Tab. 2 Test results of steel corrosion rate

试件编号	保护层 厚度 $c$ /mm	冻融循环 次数 $N$ /次	$c/d$	钢筋锈 蚀率/%
C30-50-20	20	50	1.43	1.95
C30-100-20	20	100	1.43	1.75
C30-150-20	20	150	1.43	1.52
C30-200-20	20	200	1.43	1.42
C30-50-25	25	50	1.79	2.56
C30-100-25	25	100	1.79	2.41
C30-150-25	25	150	1.79	1.61
C30-200-25	25	200	1.79	1.49
C30-50-30	30	50	2.14	2.59
C30-100-30	30	100	2.14	2.53
C30-150-30	30	150	2.14	2.17
C30-200-30	30	200	2.14	1.85
C40-50-20	20	50	1.43	1.67
C40-100-20	20	100	1.43	0.99
C40-150-20	20	150	1.43	0.94
C40-200-20	20	200	1.43	0.65
C40-50-25	25	50	1.79	2.53
C40-100-25	25	100	1.79	2.25
C40-150-25	25	150	1.79	2.08
C40-200-25	25	200	1.79	1.43
C40-50-30	30	50	2.14	3.66
C40-100-30	30	100	2.14	2.90
C40-150-30	30	150	2.14	1.78
C40-200-30	30	200	2.14	1.51

2.4 钢筋临界锈蚀率影响因素

2.4.1 混凝土强度等级

混凝土保护层为 20 mm 时, 混凝土强度等级对钢筋临界锈蚀率的影响见图 9.

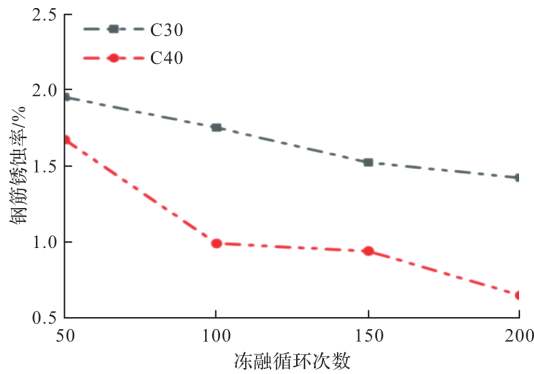


图 9 钢筋锈蚀率随混凝土强度等级的变化  
Fig. 9 Variations of steel corrosion rate with concrete strength grade

由图可以看出, 随着冻融循环次数增加, 钢筋锈蚀率逐渐降低, 混凝土强度等级越高, 钢筋锈蚀率越低. 当冻融循环次数为 50 次, 混凝土强

度等级从 C30 增加到 C40, 钢筋锈蚀率降低了 0.28%.

2.4.2 冻融循环次数

不同强度等级混凝土钢筋锈蚀率随冻融循环次数变化规律见图 10. 可以看出, C30 和 C40 两种强度等级混凝土钢筋锈蚀率均随冻融循环次数降低而降低, 且混凝土保护层越大, 钢筋锈蚀率降低幅度越大. 当混凝土强度等级为 C40, 混凝土保护层厚度为 30mm 时, 冻融循环从 50 次增加到 200 次, 钢筋锈蚀率从 3.66% 降低到 1.51%, 降低了 2.15%.

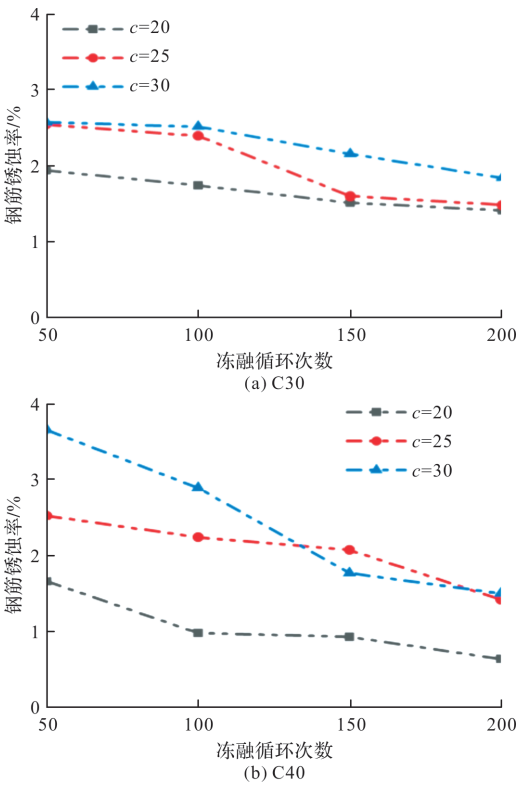
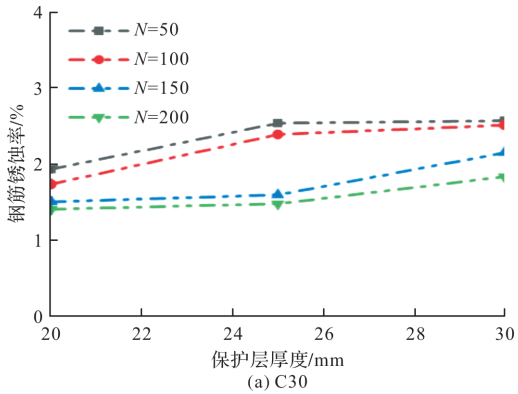


图 10 钢筋锈蚀率随冻融循环次数变化规律  
Fig. 10 Variations of steel corrosion rate with the number of freeze-thaw cycles

2.4.3 混凝土保护层厚度

两种强度等级混凝土钢筋锈蚀率随混凝土保护层变化规律见图 11.



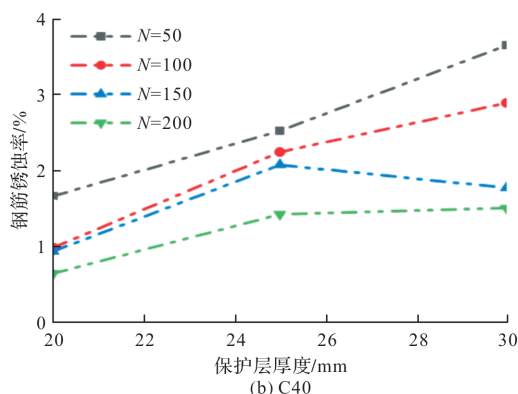


图11 钢筋锈蚀率随混凝土保护层变化规律

Fig. 11 Variations of steel corrosion rate with concrete protective layer

可以看出,同一冻融循环次数下,随着混凝土保护层的增大,钢筋锈蚀率呈现递增的趋势。当冻融循环次数为100次,混凝土强度等级为C40时,混凝土保护层从20 mm增加到30 mm,钢筋锈蚀率从0.99%增加到2.90%,增加了1.91%。

### 3 结论

(1)混凝土抗压强度随冻融循环次数的增加出现逐渐降低的趋势,抗压强度损失率随混凝土强度等级的降低而增高。

(2)通过DIC技术监测混凝土表面锈胀开裂的情况,得到保护层开裂时刻及开裂时混凝土保护层应变变化。

(3)随着混凝土强度等级的增加,钢筋临界锈蚀率逐渐降低。随冻融循环次数增加,钢筋临界锈蚀率逐渐降低。随着混凝土保护层的增大,钢筋锈蚀率呈现递增的趋势。

### 参考文献 References

- [1] 赵炜,黄巍林,管庭. 混凝土冻融损伤对内部钢筋锈蚀影响研究[J]. 混凝土, 2016(6):42-45.  
ZHAO Wei, HUANG Weilin, GUAN ting. Influence of the freeze-thaw damage on the steel corrosion in reinforced concrete[J]. Concrete, 2016(6):42-45.
- [2] 陈际洲,赵铁军,张鹏等. 冻融损伤对引气混凝土中钢筋锈蚀的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020, 285(1):16-20.  
CHEN Jizhou, ZHAO tiejun, ZHANG peng, et al. The study on steel corrosion in air entraining concrete under the coupling effects of freeze-thaw damage[J]. China Concrete and Cement Products, 2020, 285(1):16-20.
- [3] 刘继睿,高怀帅,王玮钊,等. 钢筋非均匀锈蚀导致混凝土开裂的研究[J]. 青岛理工大学学报, 2022, 43(2):19-27.  
LIU Jirui, SHANG Huaishuai, WANG Weizhao, et al. Study on concrete cracking caused by non-uniform corrosion of steel bar[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(2): 19-27.
- [4] LIU Jirui, SHANG Huishuai, WANG Weizhao, et al.

Study on concrete cracking caused by non-uniform corrosion of steel bar[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(2):19-27.

- [5] CHEN J, ZHANG W, GU X. Modeling time-dependent circumferential non-uniform corrosion of steel bars in concrete considering corrosion-induced cracking effects[J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109766.
- [6] 李磊,王卓涵,张艺欣,等. 钢筋混凝土冻融损伤黏结滑移本构模型及其在构件中的应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9):213-222.  
LI Lei, WANG Zhuohan, ZHANG Yixin, et al. Adhesion slip constitutive model of reinforced concrete with freeze-thaw damage and its application to structural members[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(9):213-222.
- [7] ZHANG Y, SU R K L. Experimental investigation of the process of corrosion-caused cover cracking[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119166.
- [8] 张菊辉,熊杰. 角区钢筋非均匀锈蚀引发混凝土保护层开裂全过程研究[J]. 上海理工大学学报, 2020, 42(1): 70-78.  
ZHANG Juhui, XIONG Jie. Research on the whole process of concrete protective layer cracking caused by non-uniform corrosion of steel bar in corner area[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2020, 42(1): 70-78.
- [9] 王明年,杨恒洪,张艺腾,等. 氯盐渗透下钢拱架锈蚀与喷射混凝土间锈胀力研究[J]. 隧道建设, 2022, 42(2): 224-230.  
WANG MingNian, YANG Henghong, ZHANG Yiteng, et al. Study on rust expansion force between steel arch corrosion and shotcrete under chloride penetration[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(2):224-230.
- [10] HE S, CAO Z, LIU W, et al. Experimental study on long-term performance of reinforced concrete beams under a sustained load in a corrosive environment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117288.
- [11] ZHANG P, CONG Y, VOGEL M, et al. Steel reinforcement corrosion in concrete under combined actions: The role of freeze-thaw cycles, chloride ingress, and surface impregnation[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 113-121.
- [12] CHEN D, DENG Y, SHEN J, et al. Study on damage rules on concrete under corrosion of freeze-thaw and saline solution[J]. Construction and Building Materials, 2021, 304: 124617.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法:GBJ 82-1985[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Test method for long-term performance and Durability of ordinary concrete: GBJ 82-1985[S]. Beijing: China Construction Industry Press, Beijing, 2009.

(编辑 郑晓龙 沈波)