

冻融循环作用下承压混凝土冻胀应变研究

董振平, 黄新凯, 雷永洁, 刘西光, 牛荻涛

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 对不同应力水平的混凝土圆柱体构件进行了冻融循环试验, 在冻融循环过程中通过动态模拟法得到了冻融全过程混凝土冻胀应变的发展规律。试验结果表明: 冻融循环过程中随温度降低冻胀应变不断增大, 温度回升后冻胀应变随之降低。随着冻融循环次数的增加, 钢筋有效应变逐渐降低, 冻胀应变滞回环的上部包络线随之升高, 残余应变不断增加; 随应力水平的增加, 钢筋有效应变损失速率加快, 冻胀应变逐渐降低。

关键词: 冻融损伤; 应力水平; 冻胀应变; 残余应变

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)04-0515-05

Research on frost heaving strain of stressed concrete under freeze-thaw cycle

DONG Zhenping, HUANG Xinkai, LEI Yongjie, LIU Xiguang, NIU Ditao

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The freeze-thaw cycle tests were carried out on concrete cylindrical members with different stress levels, and in the process of freeze-thaw cycle, the development law of frost heave strain of concrete in the whole process of freeze-thaw was obtained by dynamic simulation method. The experimental results showed that the frost heaving strain increased with the decrease of temperature during the freeze-thaw cycle, and decreased with the rise of temperature. With the increase of freeze-thaw cycles, the effective strain of reinforcement gradually decreased, the upper envelope of the freeze-heave strain hysteresis ring increased, and the residual strain increased. With the increase of stress level, the effective strain loss rate of reinforcement accelerated and the frost heaving strain decreased gradually.

Key words: freeze thaw damage; stress level; frost heaving strain; residual strain

寒冷地区混凝土桥梁结构会遭受冻融损伤, 同时荷载作用使混凝土处于承载状态^[1-3]。冻融循环与应力存在明显的交互作用, 交互作用造成预应力混凝土桥梁结构材料损伤加剧^[4]。随应力水平的增加, 混凝土相对动弹性模量损失不断增大, 抗冻性越差^[5]。

国内外学者对冻融损伤混凝土基本力学性能开展了众多试验研究。冻融循环使混凝土产生累积损伤, 导致混凝土表面剥落、力学性能下降^[6-8]。随冻融循环次数增加, 混凝土相对动弹性模量逐渐减小^[9-11]; 混凝土峰值应力逐渐降低而峰值应变不断增大, 脆性破坏特征更加明显^[12-14]。曾强^[15]采用残余变形表征了冻融过程产生的破坏程度, 残余变形越大, 材料破坏越严重。高志浩^[16]实时监测混凝土应变并量化了混凝土

土内部冻融损伤。

目前尚缺乏应力状态与冻融循环共同作用下混凝土冻胀应变发展规律。本文对承压混凝土进行冻融循环试验, 通过动态模拟法得到冻融过程中产生的冻胀应变, 分析了冻融循环次数和应力比对混凝土冻胀应变的影响规律。

1 试验概况

1.1 试件设计和材料

设计并制作了不同应力水平作用下混凝土圆柱体试件, 试件尺寸均为 $\Phi 200\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$ 。

冻融循环次数 N 为 0、100、200 和 250 次; 混凝土应力水平 μ 为 0、0.2、0.3 和 0.4, 依次表示张拉应力为混凝土轴心抗压强度平均值的 0%、20%、30% 和 40%。

收稿日期: 2022-11-11

修回日期: 2023-07-23

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

第一作者: 董振平(1970—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究既有结构的评定与加固。E-mail: dongzp_02@163.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

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Concrete mix

混凝土 强度等级	配合比						外加剂/kg 粉煤 灰/kg
	水泥	水	细骨料	粗骨料	增强剂	减水剂	
C30	1	0.54	3.36	4.20	5.95	3.15	100
C40	1	0.42	2.39	3.36	5.15	7.80	95

混凝土设计强度等级分别为 C30 和 C40，配合比见表 1。C30 和 C40 混凝土轴心抗压强度平均值分别为 20.1 MPa 和 28.6 MPa。预应力钢筋选用 PSB830 级 ϕ^T18 的精轧螺纹钢筋，屈服强度为 918 MPa，抗拉强度为 1 087 MPa，伸长率为 9.1%。

1.2 张拉方案

张拉开始前对试件进行为期 4 d 的浸泡，采用自行设计加工的反力架进行张拉，试件张拉如图 1。

实际张拉应力水平见表 2。张拉时钢筋一端张拉一端固定，首先将第一根钢筋张拉至其控制应力的 20%，持载 2 min，持载 2 分钟，拧紧锚具，卸下加载装置；对第一根钢筋的对侧钢筋进行张



图 1 试件张拉

Fig. 1 Specimen tension

拉。张拉至其控制应力的 50%，持载 2 分钟，拧紧锚具，卸下加载装置；再对第一根钢筋进行二次张拉，张拉至其控制力的 80%，持载 2 min，拧紧锚具。按同样的方式对第一根钢筋的对侧钢筋进行张拉，超张拉至其控制力的 110%，持载 2 min；最后对第一根钢筋超张拉至其控制应力的 110%，持载 2 min 后拧紧锚具，卸下加载装置，最终完成试件的张拉。

表 2 混凝土圆柱体构件参数

Tab. 2 Parameters of concrete cylinder specimens

试件编号	冻融循环次数	理论应力水平	实际应力水平	试件编号	冻融循环次数	理论应力水平	实际应力水平
C30-1	0	0	0	C40-17	0	0	0
C30-2	0	0.2	0.23	C40-18	0	0.2	0.16
C30-3	0	0.3	0.27	C40-19	0	0.3	0.29
C30-4	0	0.4	0.37	C40-20	0	0.4	0.33
C30-5	100	0	0	C40-21	100	0	0
C30-6	100	0.2	0.2	C40-22	100	0.2	0.18
C30-7	100	0.3	0.27	C40-23	100	0.3	0.3
C30-8	100	0.4	0.37	C40-24	100	0.4	0.32
C30-9	200	0	0	C40-25	200	0	0
C30-10	200	0.2	0.23	C40-26	200	0.2	0.19
C30-11	200	0.3	0.3	C40-27	200	0.3	0.27
C30-12	200	0.4	0.4	C40-28	200	0.4	0.27
C30-13	250	0	0	C40-29	250	0	0
C30-14	250	0.2	0.23	C40-30	250	0.2	0.18
C30-15	250	0.3	0.3	C40-31	250	0.3	0.33
C30-16	250	0.4	0.4	C40-32	250	0.4	0.31

通过粘贴在钢筋表面的电阻应变片监测钢筋应变在张拉过程的变化情况，应变片位置在距离试件端部 100 mm 处。

1.3 冻融循环试验

冻融循环试验采用气候环境模拟实验室 (ZHT/W2300) 进行气冻气融循环试验，温度范围

为 $-19\sim+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，升降温速率均为 $0.7\sim1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。每个循环持续 6 h，从 $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需 2 h，在 $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 2 h，经历 1 h 升温段后在 $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 持续 1h，进行 3 次喷淋，至此 1 个冻融循环结束。

1.4 冻胀应变测试方法

冻融循环试验过程中，试件产生的应变分为

两部分:因热胀冷缩产生的热应变以及水结冰膨胀产生的冻胀应变^[17]。在试件中间 100 mm 范围内沿试件竖向粘贴混凝土应变片。为了消除由于热胀冷缩对混凝土应变的影响,本文采用动态模拟法进行温度补偿从而剥离热应变。将补偿应变片和测试应变片分别粘贴在试件上。为了剥离热应变,粘贴补偿应变片的试件在冻融试验前进行了防水处理。将两个应变片的数值相减,即可得到剥离热应变的混凝土冻胀应变。由混凝土冻胀变形产生的冻胀应变 ϵ_f 可按式(1)进行计算。

$$\epsilon_f = \epsilon_i - \epsilon_0 - \epsilon_s \quad (1)$$

式中: ϵ_f 为混凝土冻胀应变, ϵ_i 为实际钢筋测得的总应变, ϵ_0 表示由热胀冷缩产生的应变, ϵ_s 表示张拉过程产生的应变。

每一个冻融循环都会使混凝土内部产生内应力即冰冻应力,这些应力会造成混凝土基体产生裂纹,从而产生不可逆的损伤,损伤逐渐积累,导致基体的变形量逐渐增加,滞回曲线最高点对应的最大应变值随着冻融循环次数的增加而增加,增加的这部分应变就是混凝土经历一定循环次数产生的残余应变。混凝土残余应变见图 2。

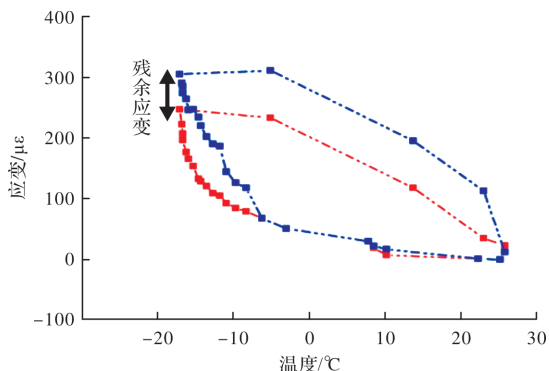


图 2 残余应变随温度变化规律

Fig. 2 Variations of residual strain with temperature

2 试验结果分析与讨论

2.1 冻融损伤混凝土表面形态

典型混凝土圆柱体构件表面裂缝开展情况见图 3 和图 4。从图中可以看出,相同应力水平和冻融循环次数下,混凝土强度等级越高,裂缝数量越少,裂缝发展得越缓慢。随冻融循环次数增加,裂缝数量和宽度也在逐步增加,表明混凝土冻融损伤逐渐加剧。对于 C40 混凝土圆柱体构件,当应力水平为 0.3 时,冻融循环次数由 200 增加到 250,裂缝数量由 2 条增加到 8 条,最大裂缝长度由 400 mm 增加到 487 mm,最大裂缝宽度由 0.1 mm 增加到 0.5 mm。

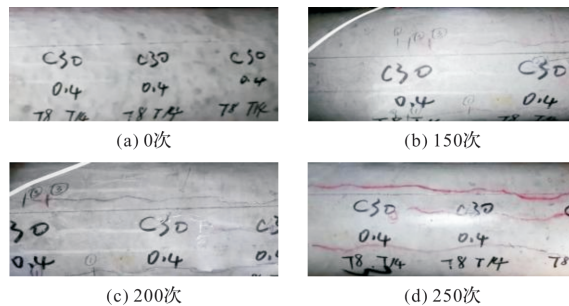


图 3 C30 混凝土圆柱体构件表面裂缝开展情况(C30-16)

Fig. 3 Surface crack development of C30 concrete cylinder members(C30-16)

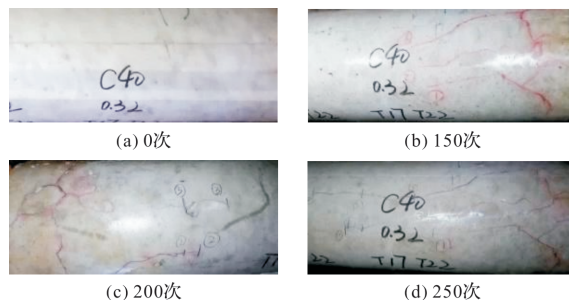


图 4 C40 混凝土圆柱体构件表面裂缝开展情况(C40-32)

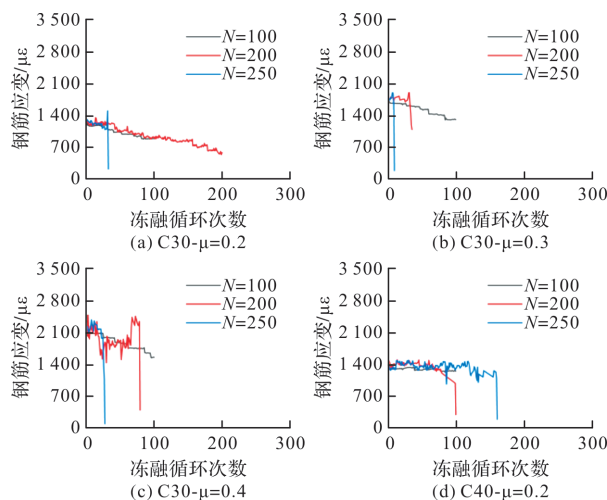
Fig. 4 Surface crack development of C40 concrete cylinder members(C40-32)

2.2 钢筋有效应变

图 5 给出了混凝土圆柱体构件分别经过 100、200、250 次冻融循环后钢筋应变。试验结果表明:随着冻融循环的增加,钢筋应变逐渐降低;随应力水平的提高,应变损失速率加快。

当混凝土强度等级为 C30 时,应力水平为 0.2、0.3、0.4 的构件,100 次冻融循环后钢筋有效应变分别降低了 16.40%、18.21%、19.54%。

当混凝土强度等级为 C40,应力水平分别为 0.2、0.3、0.4 的构件,100 次冻融循环后钢筋有效应变依次降低了 11.06%、12.33%、13.55%。



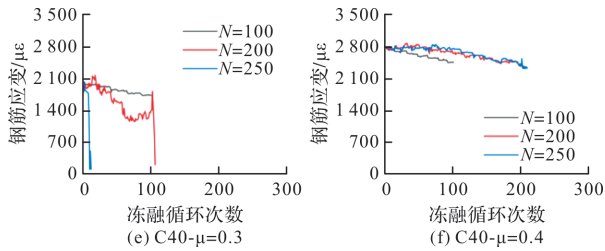


图5 冻融全过程混凝土构件钢筋应变

Fig. 5 Steel reinforcement strain of concrete members during freeze-thaw process

2.3 混凝土冻胀应变滞回环

采用动态模拟法进行温度补偿来消除由于热胀冷缩引起的热应变,将补偿应变片和被测应变片分别固定在相同材料的试件上,并将其置于相同温度环境里,为分离温度应变,在冻融试验前对补偿应变片试件进行防水处理,因此由温度引起的伸缩量相同,即由温度引起的应变相同,可以相互抵消,从而达到消除温度带来影响的目的。

图6为混凝土圆柱体构件冻胀应变滞回环。可以看出,随着冻融循环次数的增加,应变曲线的上部包络线随之升高,后一个循环的最低温度时的最大应变值总是比前一个循环大。在冻融试验过程中,混凝土中水的冻融会引起体积变化,产生内部冻胀应力和应变。随着冻融循环次数的增加,内部冻胀应力和应变的累积效应会导致混凝土微观结构的破坏和改变,引起冻胀应变的增加。冻融损伤导致混凝土有效截面减小,在应力的相互作用下,导致冻融裂缝进一步扩大。随着冻融循环次数的增加,混凝土的损伤将继续积累,导致冻胀应变增加。

随着应力水平的增加,应变曲线最高点的值也随之增加,说明荷载对混凝土内部造成了一定的损伤,且随着应力水平的增大,损伤越大。冻融损伤使混凝土有效截面减小,在应力的交互作用下,导致冻融裂缝进一步扩大。随着冻融循环次数的增加,混凝土的损伤将不断累积。

当混凝土强度等级为C30,应力水平为0.2时,在第1、25、50、75、100次循环的最大应变值分别为 $188\mu\epsilon$ 、 $225\mu\epsilon$ 、 $256\mu\epsilon$ 、 $288\mu\epsilon$ 、 $312\mu\epsilon$ 。应力水平为0.2、0.3、0.4时,第1次冻融循环最大应变依次为 $188\mu\epsilon$ 、 $198\mu\epsilon$ 、 $238\mu\epsilon$,表明荷载加剧了混凝土内部损伤劣化的程度。

当混凝土强度等级为C40,应力水平为0.2时,在第1、25、50、75、100次循环的最大应变值分别为 $158\mu\epsilon$ 、 $175\mu\epsilon$ 、 $206\mu\epsilon$ 、 $268\mu\epsilon$ 、 $272\mu\epsilon$ 。应力水平为0.2、0.3、0.4时,第1次冻融循环的最大应变依次为 $158\mu\epsilon$ 、 $159\mu\epsilon$ 、 $178\mu\epsilon$ 。

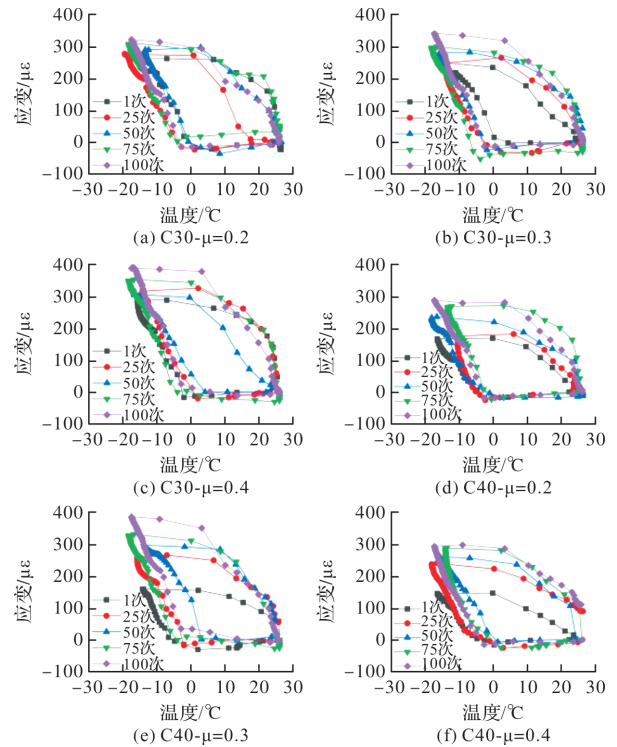


图6 混凝土圆柱体构件冻胀应变滞回环

Fig. 6 Frost heaving strain hysteresis ring of concrete cylinder members

将两次冻融循环曲线最低温度时的应变差作为承压混凝土试件的残余应变^[20]。图7是混凝土残余应变随冻融循环次数变化图。

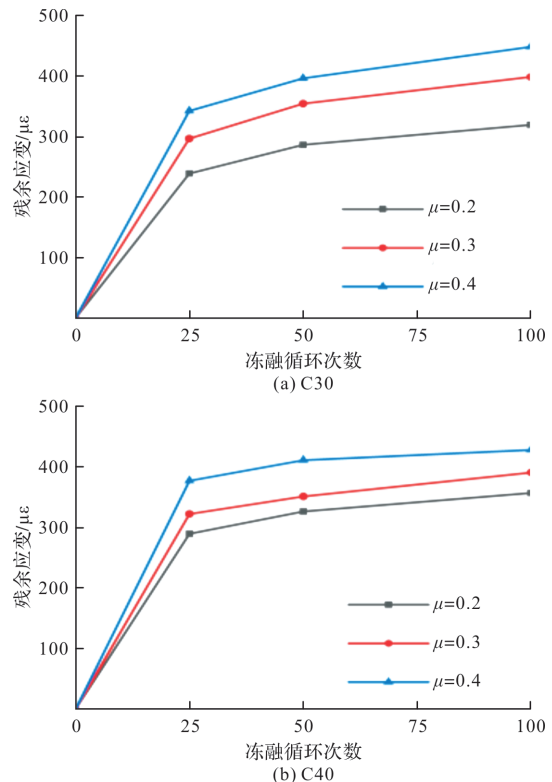


图7 混凝土圆柱体构件残余应变

Fig. 7 Residual strain of concrete cylinder members

从图中可以看出,随冻融循环次数的增加,各应力比下试件的残余应变均呈现增加趋势.当应力比为0.2时,冻融循环次数从25次增加到100次,残余应变增加了23%.

3 结论

(1)随冻融循环次数和应力水平增加,混凝土裂缝数量和宽度也在逐步增加,表明混凝土冻融损伤逐渐加剧.混凝土强度等级越高,裂缝数量越少,裂缝发展得越缓慢;

(2)在冻融循环过程中,随着冻融循环次数的增加,钢筋应变逐渐降低;随应力水平的增加,应变损失速率加快;

(3)随着冻融循环次数和应力水平的增加,冻胀应变不断增加.在冻融循环过程中,随着温度降低冻胀应变增加,温度回升后冻胀应变逐渐降低.两个冻融循环过程中产生了残余应变,表明混凝土产生了冻融损伤.

参考文献 References

- [1] 孙杰,冯川,吴爽,等.持续荷载与冻融循环耦合作用下纤维混凝土损伤性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(8):2728-2738.
SUN Jie, FENG Chuan, WU Shuang, et al. Study on the damage performance of fiber reinforced concrete under the coupling action of continuous load and freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Silicate, 2022, 41(8): 2728-2738.
- [2] ZHENG Yuanxun, LIU Jiaqi, GUO Pan, et al. Fatigue characteristics of double damage reinforced prestressed hollow slab beams under freeze-thaw cycle erosion[J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7692.
- [3] WANG Yu, FENG Wenkang, WANG Haijiang, et al. Rock bridge fracturing characteristics in granite induced by freeze-thaw and uniaxial deformation revealed by AE monitoring and post-test CT scanning[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 177: 103-115.
- [4] LEI Bin, LI Wengui, TANG Zhuo, et al. Durability of recycled aggregate concrete under coupling mechanical loading and freeze-thaw cycle in salt-solution[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 840-849.
- [5] LEI Bin, LI Wengui, LI Zhaoang, et al. Effect of cyclic loading deterioration on concrete durability: water absorption, freeze-thaw, and carbonation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(9): 04018220.
- [6] 关斌,牛荻涛,李强,等.冻融环境钢筋混凝土梁抗弯承载力研究[J].铁道学报,2017,39(11): 108-115.

- GUAN Xiao, NIU Ditao, LI Qiang, et al. Research on flexural capacity of reinforced concrete beams in freezing-thawing environment[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(11): 108-115.
- [7] LI Zhe, LIU Lulu, YAN Shihao, et al. Effect of freeze thaw cycles on mechanical and porosity properties of recycled construction waste mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 347-363.
- [8] 关斌,牛荻涛,肖前慧.考虑残余强度修正的混凝土冻融损伤层及轴心受压模型研究[J].铁道学报,2021,43(3): 175-182.
GUAN Xiao, NIU Ditao, XIAO Qianhui. Study on freeze-thaw damaged layer and axial compression model of concrete considering residual strength modification[J]. Journal of the Chinese Railway Society, 2021, 43(3): 175-182.
- [9] 姜磊,牛荻涛.硫酸盐与冻融复合作用下混凝土劣化规律[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9): 3208-3216.
JIANG Lei, NIU Ditao. Deterioration law of concrete under composite action of sulfate and freeze-thaw[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(9): 3208-3216.
- [10] 陈好,刘荣桂,蔡东升,等.冻融与氯盐侵蚀作用下预应力结构耐久性试验及数值模拟[J].建筑结构学报,2010,31(2): 104-110.
CHEN Yu, LIU Ronggui, CAI Dongsheng, et al. Durability test and numerical simulation of prestressed structures under freeze-thaw and chloride erosion[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 104-110.
- [11] 王晨霞,刘路,曹芙波,等.冻融循环后再生混凝土力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(12): 193-202.
WANG Chenxia, LIU Lu, CAO Fubo, et al. Experimental study on mechanical properties of recycled concrete after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 193-202.
- [12] 姜磊,牛荻涛.硫酸盐与冻融环境下混凝土本构关系研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(3): 71-78.
JIANG Lei, NIU Ditao. Research on the constitutive relationship between sulfate and concrete under freeze-thaw environment[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(3): 71-78.
- [13] LI Yanlong, GUO Hanyan, ZHOU Heng, et al. Damage characteristics and constitutive model of concrete under uniaxial compression after Freeze-Thaw damage[J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128-171.

- interfacial transition zone of cementitious material[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 110: 103585.
- [12] 汤玉娟,左晓宝,殷光吉. 基于孔结构参数的混凝土气体扩散模型[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 976-981.
- TANG Yujuan, ZUO Xiaobao, YIN Guangji. Gas diffusion model in concrete based on pore structural parameters[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6): 976-981.
- [13] 朱劲松. 混凝土双轴疲劳试验与破坏预测理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- ZHU Jingsong. Study on biaxial fatigue test and failure prediction theory of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [14] 卫军,李松林,董荣珍,等. 考虑残余变形影响的混凝土疲劳损伤本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 57-61.
- WEI Jun, LI Songlin, DONG Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2016, 43(7): 57-61.
- [15] YADAV I N, THAPA K B. Fatigue damage model of concrete materials[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 108: 102578.
- [16] WEI Jun, LI Songlin, D Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation[J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2016, 43(7): 57-61.
- [17] ANDRADE C. Types of models of service life of reinforcement: the case of the resistivity[J]. Concrete Research Letters, 2010, 1(2): 73-80.
- [18] 弗兰克, P. 英克鲁佩勒, 大卫. 传热和传质基本原理(原著第六版)[M]. 化学工业出版社, 2007.
- INCROPERIS F P, De Will D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Chemical Industry Press, 2007.
- [19] HOUST Y F, WITTMANN F H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 1165-1176.

(编辑 郑晓龙 沈 波)

(上接第 519 页)

- [14] 徐善华,王友德,李安邦,等. 冻融损伤混凝土重复受压本构关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(4): 104-110.
- XU Shanhua, WANG Youde, LI Anbang, et al. Constitutive relationship of freeze-thaw damaged concrete under repeated compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(4): 104-110.
- [15] ZENG Qiang, LI Le, PANG Xiaoyun, et al. Freeze-thaw behavior of air entrained cement paste saturated with 10 wt. % NaCl solution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 21-31.
- [16] 高志浩. 约束应力调控及其对混凝土单面盐冻行为的影响[D]. 北京:中国建筑材料科学研究总院, 2020.
- GAO Zhihao. Regulation of confining stress and its effect on single side salt freezing behavior of concrete [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2020.
- [17] LV, Zhitao, XIA Caichu, WANG Yuesong, et al. Frost heave and freezing processes of saturated rock with an open crack under different freezing conditions [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(4): 947-960.

(编辑 郑晓龙 沈 波)