

文章编号:1007-9629(2023)10-1054-08

冻损梯度对承压混凝土应力-应变关系的影响

刘西光¹, 雷永洁¹, 周佳丽², 牛荻涛^{1,*}, 刘俊¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科大工程技术有限公司, 陕西 西安 710055)

摘要: 对不同冻融损伤程度的混凝土圆环体试件进行了试验研究. 结果表明: 当相对冻融深度小于临界值时, 混凝土的峰值应力、峰值应变均呈线性退化, 超过临界值后则保持稳定; 当冻融循环次数由 100 次增加到 200 次时, 相对冻融深度临界值由 0.5 增大到 0.8; 基于应变等价性假说和统计损伤理论, 建立了不同冻融损伤程度下承压混凝土的应力-应变关系模型.

关键词: 冻融损伤; 承压混凝土; 本构关系; 损伤梯度

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.10.002

Effect of Frozen Damage Gradient on Stress-Strain Relationship of Stressed Concrete

LIU Xiguang¹, LEI Yongjie¹, ZHOU Jiali², NIU Ditao^{1,*}, LIU Jun¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. XAUAT Engineering Technology Co., Ltd., Xi'an 710055, China)

Abstract: Experimental research was conducted on concrete torus-shaped specimens with different degrees of freeze-thaw damage. The results show that when the relative freeze-thaw depth is less than the threshold, the peak stress and peak strain of concrete exhibit linear degradation, while remained stable after exceeding the threshold. When the number of freeze-thaw cycle increases from 100 times to 200 times, the threshold of relative freeze-thaw depth increases from 0.5 to 0.8. Finally, based on the hypothesis of strain equivalence and statistical damage theory, the stress-strain relationship model of stressed concrete with different degrees of freeze-thaw damage is established.

Key words: freeze-thaw damage; stressed concrete; constitutive relationship; damage gradient

寒冷地区桥梁会遭受冻融损伤,同时荷载的作用使桥梁结构混凝土处于承载状态^[1-3],此时混凝土的冻融损伤规律与无应力状态下显著不同,荷载裂缝导致混凝土的饱水程度增加、冻融损伤加剧^[4].

国内外学者对冻融损伤混凝土基本力学性能开展了众多的试验研究,发现冻融循环导致混凝土的表面剥落,力学性能下降^[5-7].随着冻融循环次数的增加^[8-10],混凝土的峰值应力逐渐降低,峰值应变增大,脆性破坏特征更加明显^[11-13].许多学者对冻融损伤混凝土本构模型进行了研究:龙广成等^[14]基于应变等效假

说和统计损伤理论,建立了一种冻融损伤混凝土单调受压本构模型;Duan等^[15-16]建立了冻融循环作用下混凝土的随机损伤本构模型;关斌等^[17]基于 Weibull 强度理论,建立了冻融循环作用下混凝土的细观统计损伤本构模型;Qiu等^[18-19]基于塑性损伤理论,建立了冻融循环作用下混凝土的塑性损伤本构模型.

冻融后混凝土可分为损伤层、损伤过渡层和未损伤层^[20].已有冻融损伤混凝土力学性能研究均未考虑损伤梯度的影响,应力作用下混凝土冻融损伤沿试件深度方向的影响规律尚不清楚.因此,需要开展不同

收稿日期:2022-11-14; 修订日期:2023-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178163;51808437);陕西省重点研发计划项目(2022SF-403)

第一作者:刘西光(1984—),男,陕西西安人,西安建筑科技大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:xgliu@xauat.edu.cn

通讯作者:牛荻涛(1963—),男,陕西华县人,西安建筑科技大学教授,博士生导师,博士.E-mail:niuditao@163.com

冻融损伤程度下承压混凝土的应力-应变关系研究.

1 试验

1.1 试件设计和材料

为得到不同冻融损伤程度的混凝土试件,设计了不同应力水平作用下的混凝土圆柱体试件,试件尺寸均为 $\phi 200 \times 1\,000$ mm(见图1). 构件所用混凝土均为C40强度等级的商品混凝土,配合比见表1. 其中,水为普通自来水,水泥为普通硅酸盐水泥,细骨料为天然河砂,粗骨料为5~20 mm连续级配石子. 预应力钢筋选用PSB830级 $\phi^T 18$ 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%.

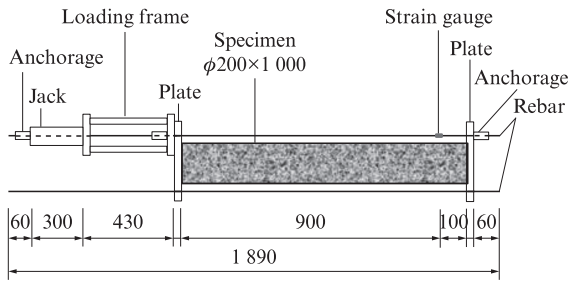


图1 试件尺寸及张拉装置

Fig. 1 Specimen size and tensiling device(size: mm)

表1 混凝土的配合比
Table 1 Mix proportion of concrete

Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Reinforcing agent	Water-reducing agent	Fly ash
1.00	0.42	2.39	3.36	5.15	7.80	95.00

冻融循环次数(N)分别为0、100、200、250次;混凝土的应力水平(μ)为0、0.2、0.3和0.4,即张拉应力为混凝土轴心抗压强度平均值的0%、20%、30%和40%.

1.2 冻融循环试验

张拉试验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,张拉装置如图1所示. 冻融循环试验采用ZHT/W2300型气候环境模拟实验室进行气冻气融循环试验,温度范围为

(-19~25) $^{\circ}\text{C}$,升降温速率均为0.7~1.0 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

1.3 分层取芯

考虑冻融损伤由表及里发展与不同深度处混凝土力学性能的非均匀退化,对冻融后的承压混凝土圆柱体试件进行分层取芯,得到圆环体试件,以研究不同冻融损伤程度下承压混凝土力学性能的退化规律.

冻融结束后对试件进行切割. 为了消除端部复杂应力的影响,每个混凝土圆柱体试件沿长度方向两端各截掉200 mm,形成3个 $\phi 200 \times 200$ mm的圆柱试件,分4层进行取芯,见图2. 用 x 表示试件外边缘到每层试件中心的距离, r 表示圆柱体试件的半径,定义试件相对冻融深度 $\lambda = x/r$,得 $\lambda = 0.1, 0.3, 0.5, 0.8$.

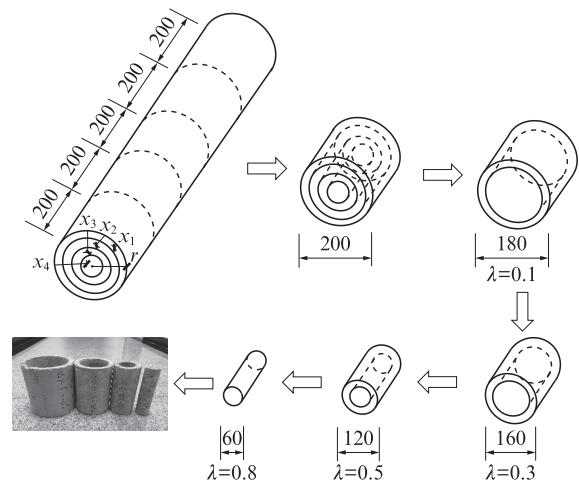


图2 冻融损伤承压混凝土圆柱体构件取芯流程图
Fig. 2 Flow chart of core removal for freeze-thaw damaged stressed concrete cylinder members(size: mm)

2 结果与讨论

2.1 冻融损伤混凝土的表现形态

图3为典型混凝土圆柱体构件表面裂缝的开展情况. 由图3可见,在冻融循环作用下,试件表面出现了沿长度方向发展的微裂缝,且随着冻融循环次数的增加,裂缝的数量和宽度也在逐步增加,表明混凝土的冻融损伤逐渐加剧.

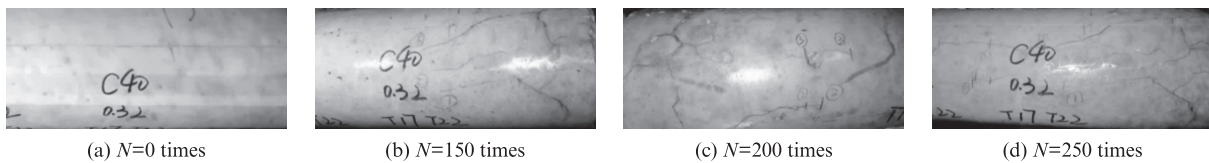


图3 典型混凝土圆柱体构件表面裂缝的开展情况
Fig. 3 Development of surface cracks of typical concrete cylinder members

2.2 冻融损伤混凝土轴压试验结果分析

2.2.1 混凝土单轴受压的破坏形态

图4为冻融损伤混凝土的单调受压破坏形态.

由图4可见:混凝土试件在单调压缩加载过程中,多条纵短裂缝从试件两端同时出现,部分受压裂缝有斜向开展的趋势;冻融循环次数越多,裂缝数量越

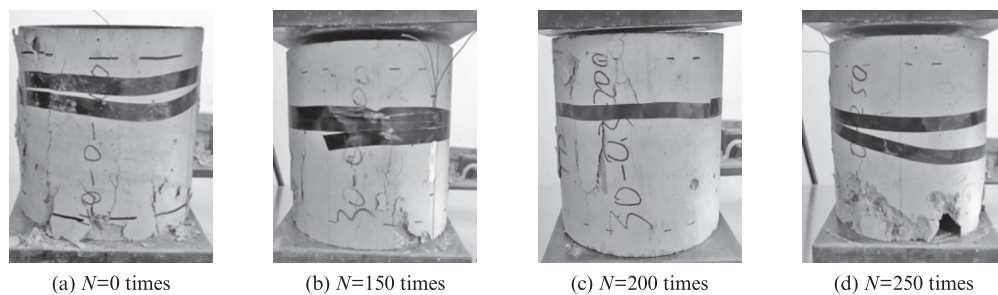


图4 冻融损伤混凝土的单调受压破坏形态

Fig. 4 Monotonic compression failure modes of freeze-thaw damaged concrete($\lambda=0.1$)

少、发展越集中,呈现的脆性破坏特征越明显。

2.2.2 应力-应变曲线

图5为冻融损伤承压混凝土圆环体试件的单调受压应力-应变(σ - ϵ)曲线和理论结果。由图5可见:

(1)当相对冻融深度小于0.3时,随着冻融循环次数和应力水平的增加,混凝土的应力-应变曲线逐渐趋于平缓,整体右移。当相对冻融深度为0.1,冻融循环次数为0~250次时,混凝土的峰值应力降低了32%~77%,峰值应变增加了17%~110%。

(2)当相对冻融深度分别为0.3和0.5时,应力-应变曲线在100次冻融循环时发生了明显的变化。当冻融循环次数增加到200次时,2种相对冻融深度下混凝土应力-应变曲线的发展规律相似。

(3)当相对冻融深度为0.8时,不同工况下混凝土的应力-应变曲线与未冻融时无明显差异。这表明混凝土的浅层损伤大于深层,相对冻融深度超过0.8时混凝土几乎不受冻融影响。

2.2.3 相对峰值应力和相对峰值应变

图6为冻融损伤混凝土相对峰值应力的退化规律。图7为冻融损伤混凝土相对峰值应变的退化规律。由图6、7可见:

(1)当相对冻融深度小于0.3时,随着冻融循环次数的增加,混凝土的峰值应力逐渐降低而峰值应变增加;当相对冻融深度增加到0.5时,100次冻融循环前混凝土的峰值应力较未冻融时相差不大,超过100次循环后的峰值应力显著降低;当相对冻融深度增加到0.8时,不同冻融循环次数下混凝土的重复受压峰值应力相差不大,表明该层不受冻融循环的影响。当相对冻融深度为0.1,应力水平为0时,冻融100、200、250次试件的峰值应力分别降低了23%、40%和50%。

(2)在不同的冻融循环次数下,混凝土的相对冻融深度存在临界值。当冻融循环次数为100次时,相对冻融深度临界值为0.5;当冻融循环次数增加到200次时,相对冻融深度临界值为0.8。当相对冻融深度小于临界值时,混凝土的峰值应力和峰值应变呈线性退化,超过临界值后保持稳定。

3 考虑冻融损伤梯度的承压混凝土应力-应变关系

3.1 数学模型

基于Lemaitre应变等价性假说^[21],冻融循环作用下承压混凝土的受压本构关系可以表示为式(1)。其中,冻融后混凝土初始损伤值可按式(2)进行计算。

$$\sigma_n = E_0 \epsilon (1 - D_m) \quad (1)$$

$$E_n = E_0 (1 - D_m) \quad (2)$$

式中: σ_n 为经历 n 次冻融后的混凝土应力,MPa; E_0 为未冻融混凝土的弹性模量,MPa; D_m 为混凝土的初始损伤值; E_n 为经历 n 次冻融后混凝土的弹性模量,MPa。

假设当混凝土受到荷载作用后,其微元强度符合Weibull概率分布^[22],则荷载损伤微元(D_c)可用破坏微元(N_d)与总微元(N_t)的比值表示:

$$D_c = \frac{N_d}{N_t} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{a} \right)^b \right] \quad (3)$$

式中: a 和 b 分别为Weibull分布参数。

根据应变等价原理,可以得到荷载作用下混凝土的本构关系:

$$\sigma = E_n \epsilon (1 - D_c) \quad (4)$$

结合式(1)、(3),得到混凝土总损伤变量(D):

$$D = D_c + D_m - D_c D_m = 1 - \frac{E_n}{E_0} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{a} \right)^b \right] \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可以得到冻融损伤承压混凝土的单调受压应力-应变关系:

$$\sigma = E_n \epsilon \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{a} \right)^b \right] \quad (6)$$

3.2 应力-应变关系的验证

通过式(6)对试验应力-应变曲线进行回归拟合,得到不同相对冻融深度下 a 、 b 的取值如图8、9所示。由图8、9可见:当相对冻融深度小于0.5时,随着冻融循环次数的增加,参数 a 和 b 呈现递增的趋势;当相对冻融深度为0.8时,参数 a 和 b 随冻融循环次数与应力比的变化较小。由此可以看出,随着冻融循

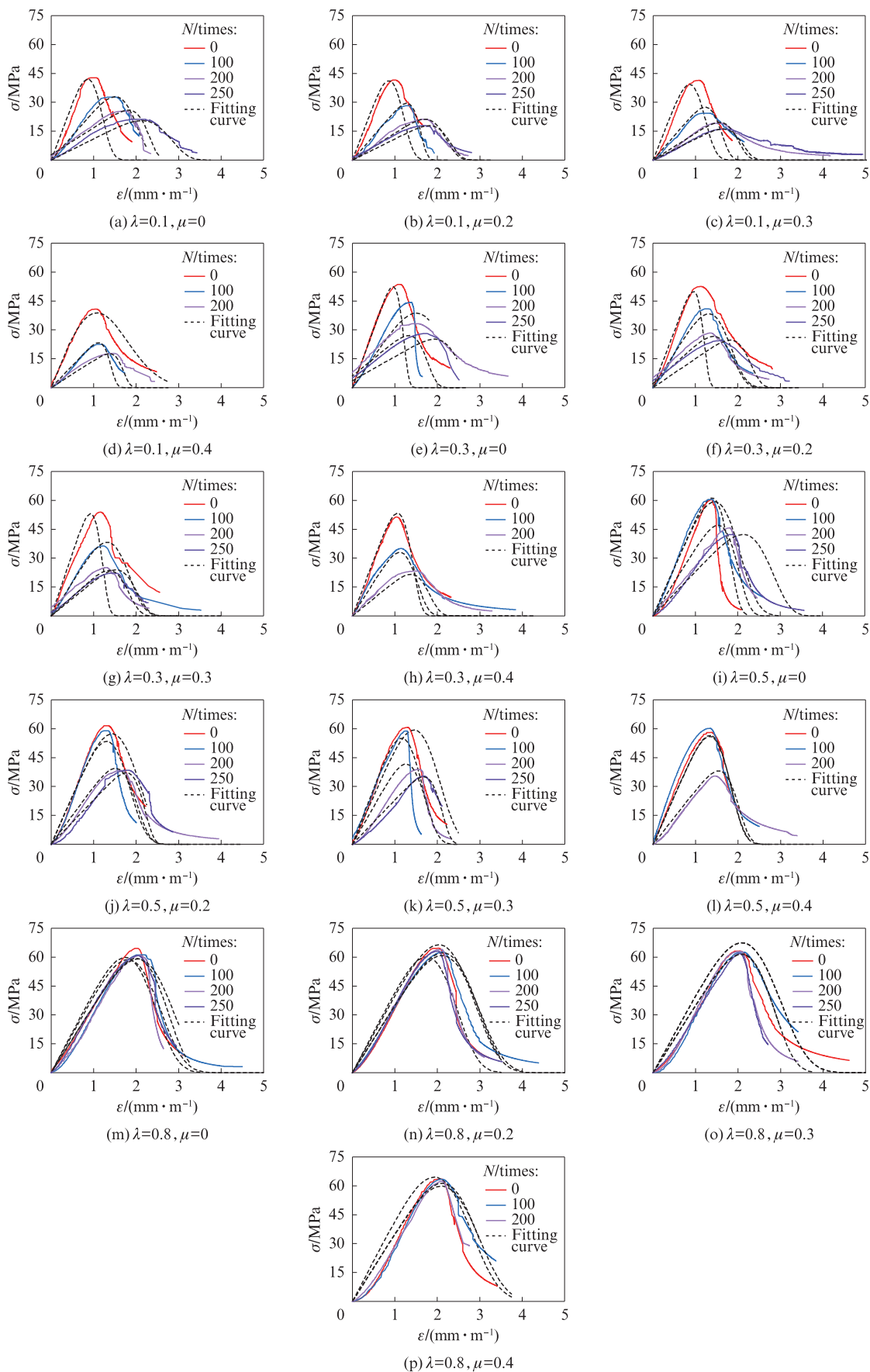


图5 冻融损伤承压混凝土圆环试件的单调受压应力-应变曲线和理论结果

Fig. 5 Monotonic compressive stress-strain curves and theoretical results of the freeze-thaw damaged stressed concrete torus-shaped specimens

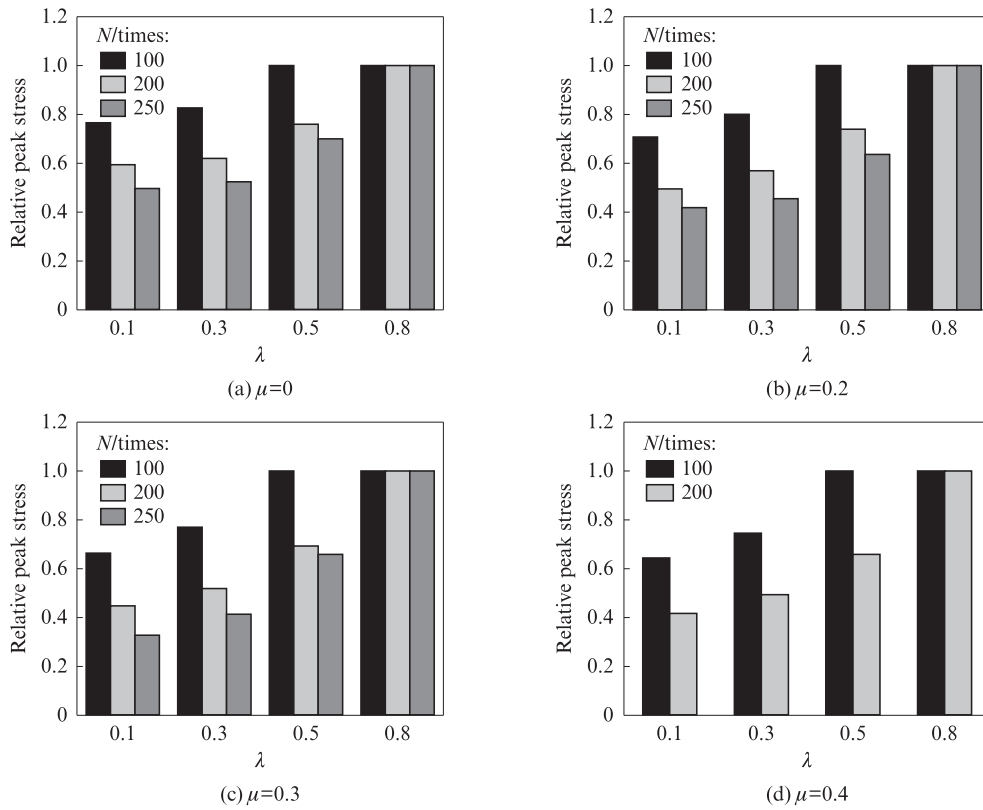


图6 冻融损伤混凝土相对峰值应力的退化规律
Fig. 6 Degradation of relative peak stress of freeze-thaw damaged concrete

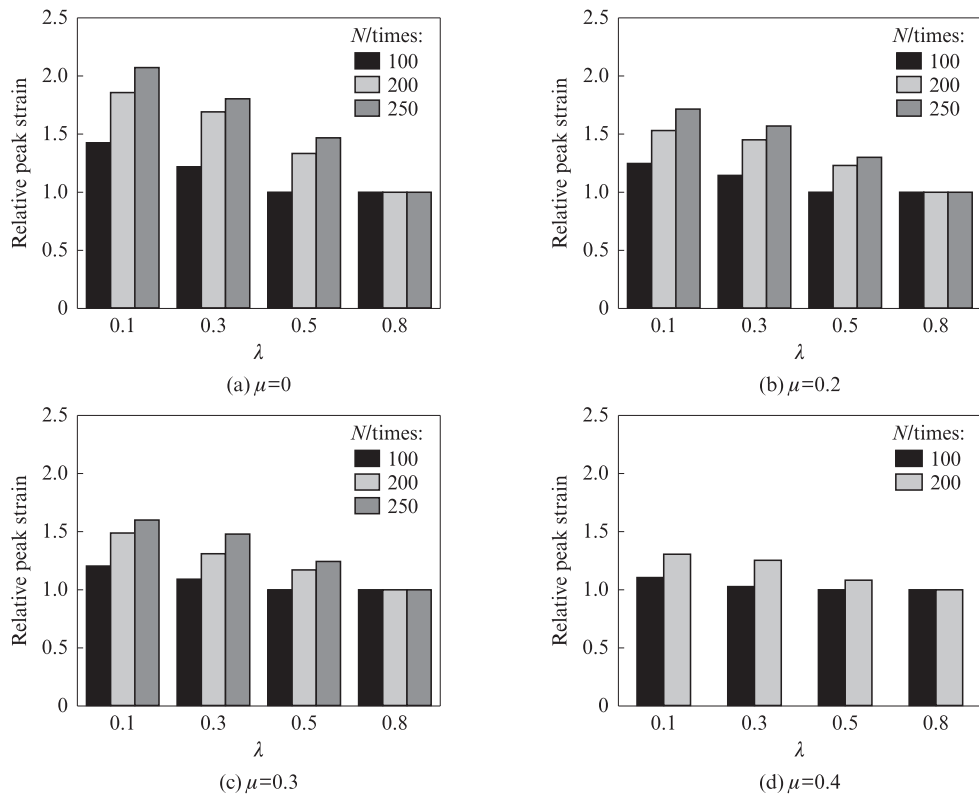


图7 冻融损伤混凝土相对峰值应变的退化规律
Fig. 7 Degradation of relative peak strain of freeze-thaw damaged concrete

环次数的增加,混凝土的峰值应变增加,应力-应变曲线下降段变陡,脆性特征更加明显.随着应力比的

增加,混凝土的峰值应力不断降低,表明应力作用加剧了混凝土的损伤.并且冻融损伤表现出逐层递减

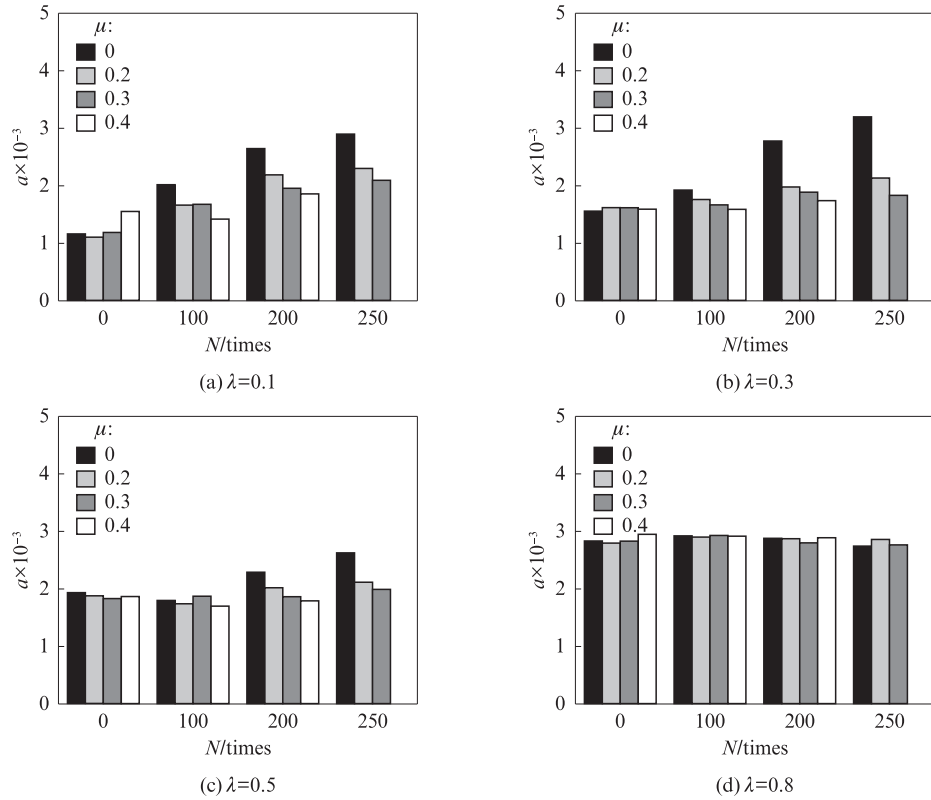


图8 参数 a 随冻融循环次数的变化
Fig. 8 Variations of parameter a with freeze-thaw cycles

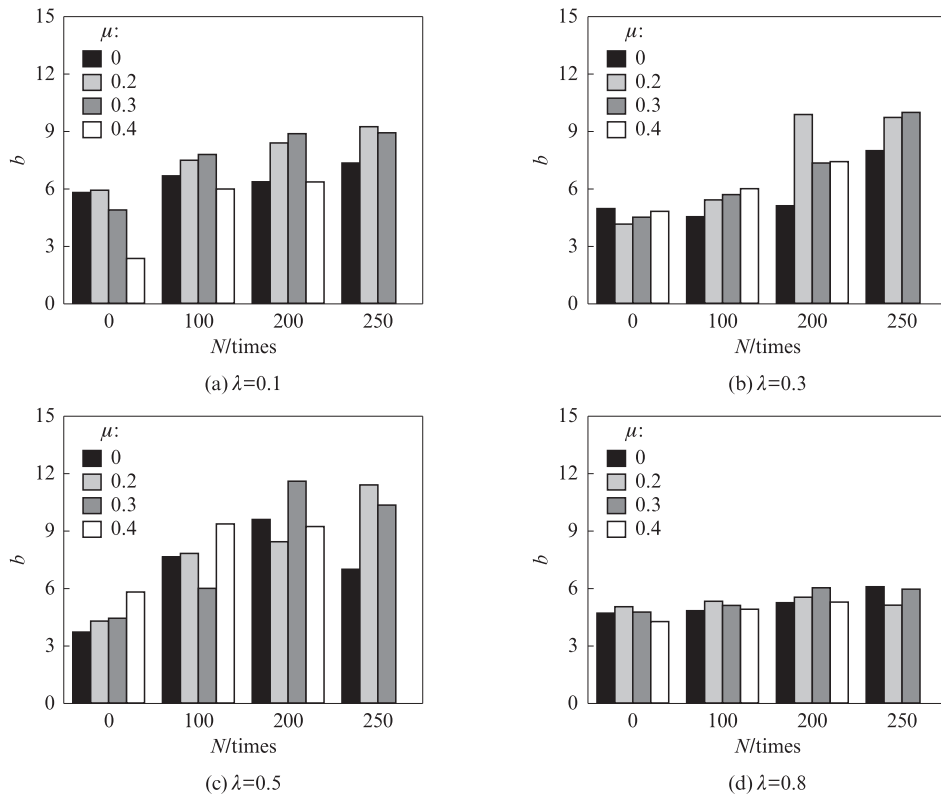


图9 参数 b 随冻融循环次数的变化
Fig. 9 Variations of parameter b with freeze-thaw cycles

的趋势,当相对冻融深度为0.8时,冻融损伤不再对混凝土应力-应变曲线的形状造成影响.

将不同深度处参数 a 和 b 的取值代入本构方程中,得到理论计算结果如图5所示.由图5可见,该理

论模型计算结果与试验结果吻合较好。

4 结论

(1)冻融损伤混凝土的浅层损伤大于深层.当相对冻融深度为0.1时,混凝土的应力-应变曲线随着冻融次数的增加逐渐趋于扁平,整体右移.当相对冻融深度分别为0.3和0.5时,应力-应变曲线在100次冻融循环时发生了明显的变化.当相对冻融深度为0.8时,各冻融循环次数下的应力-应变曲线与未冻融时基本吻合,表明混凝土未有较大的损伤劣化行为。

(2)不同冻融循环次数对应不同的相对冻融深度临界值.当冻融循环次数为100次时,相对冻融深度临界值为0.5;当冻融循环次数增加到200次时,相对冻融深度临界值增加到0.8.当相对冻融深度小于临界值时,混凝土的峰值应力、峰值应变呈线性退化,超过临界值后保持稳定。

(3)基于应变等价性假说和统计损伤理论,建立了不同冻融损伤程度下承压混凝土的受压应力-应变关系模型。

参考文献:

- [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 the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(8): 2728-2738. (in Chinese)
- [2] ZHENG Y X, LIU J Q, GUO P, 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 Y, FENG W K, WANG H J, 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: 103115.
- [4] LEI B, LI W G, TANG Z, 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] 周大卫,刘娟红,段品佳,等.混凝土超低温冻融循环损伤演化规律和机理[J].建筑材料学报,2022,25(5):490-497. ZHOU Dawei, LIU Juanhong, DUAN Pinjia, et al. The damage evolution law and mechanism of concrete ultra-low temperature freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):490-497. (in Chinese)
- [6] LI Z, LIU L L, YAN S H, 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.
- [7] 吴倩云,马芹永.冻融循环作用下BSFC的抗冻性及损伤模型[J].建筑材料学报,2021,24(6):1169-1178. WU Qianyun, MA Qinyong. Frost resistance and damage model of BSFC under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1169-1178. (in Chinese)
- [8] 刘海峰,马映昌,张润奇,等.冻融环境下沙漠砂对混凝土轴心受压力学性能的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(3):101-109,117. LIU Haifeng, MA Yingchang, ZHANG Runqi, et al. Influence of desert sand on the pressure properties of concrete axis under freeze-thaw environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(3):101-109, 117. (in Chinese)
- [9] 张卫东,董云,彭宁波,等.冻融循环下透水再生混凝土力学性能损伤分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):292-296. ZHANG Weidong, DONG Yun, PENG Ningbo, et al. Damage analysis of mechanical properties of pervious recycled concrete under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):292-296. (in Chinese)
- [10] 牛建刚,左付亮,王佳雷,等.塑钢纤维轻骨料混凝土的冻融损伤模型[J].建筑材料学报,2018,21(2):235-240. NIU Jiangan, ZUO Fuliang, WANG Jialei, et al. Freeze-thaw damage model of plastic steel fiber light weight aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):235-240. (in Chinese)
- [11] 姜磊,牛获涛.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), 2016, 48(3):71-78. (in Chinese)
- [12] LI Y L, GUO H Y, ZHOU H, et al. Damage characteristics and constitutive model of concrete under uniaxial compression after freeze-thaw damage[J]. Construction and Building Materials, 2022, 345:128171.
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 龙广成,刘赫,马昆林,等.考虑冻融作用的混凝土单轴压缩损伤本构模型[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(8):1884-1892. LONG Guangcheng, LIU He, MA Kunlin, et al. Constitutive model of concrete uniaxial compression damage considering freeze-thaw effect[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2018, 49(8):1884-1892. (in Chinese)
- [15] DUAN A, JIN W L, QIAN J R. Effect of freeze-thaw cycles on

- the stress-strain curves of unconfined and confined concrete[J]. *Materials and Structures*, 2011, 44(7):1309-1324.
- [16] DUAN A, TIAN Y, DAI J G, et al. A stochastic damage model for evaluating the internal deterioration of concrete due to freeze-thaw action[J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(6): 1025-1039.
- [17] 关斌, 牛荻涛, 王家滨, 等. 基于Weibull强度理论的混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. *混凝土*, 2015(5):5-9, 13.
GUAN Xiao, NIU Ditao, WANG Jiabin, et al. Research on the freeze-thaw damage constitutive model of concrete based on Weibull strength theory[J]. *Concrete*, 2015(5): 5-9, 13. (in Chinese)
- [18] QIU J S, ZHOU Y X, VATIN N, et al. Damage constitutive model of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264:120720.
- [19] QI W L, TENG F, PAN S S. Damage constitutive model of concrete under repeated load after seawater freeze-thaw cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 236:117560.
- [20] 黄灵芝, 柯梅尉, 司政, 等. 冻融损伤混凝土单轴压缩细观破坏研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(4):1400-1407.
HUANG Lingzhi, KE Meiwei, SI Zheng, et al. Study on the mesoscopic failure of freeze-thaw damaged concrete under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(4):1400-1407. (in Chinese)
- [21] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2):233-245.
- [22] KHAN M S, KING R. Transmuted modified Weibull distribution: A generalization of the modified Weibull probability distribution [J]. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2013, 6(1):66-88.