

冻融环境下水工碾压混凝土单轴动态抗压性能研究

孙超伟, 陈兴周, 柴军瑞, 卫田霖, 马斌

Research on the uniaxial compressive behavior of hydraulic roller compacted concrete subjected to freeze-thaw cycles

SUN Chaowei, CHEN Xingzhou, CHAI Junrui, WEI Tianlin, MA Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20211118005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同冻融循环次数混凝土单轴压缩试验

Experimental studies on dynamic properties of concrete under different freeze-thaw cycles
水利水运工程学报. 2017(1): 32 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.005>

冻融劣化混凝土循环加卸载外包络线及能量演化

Study of outer envelope curve and energy evolution for freeze-thaw deteriorated concrete under cyclic loading and unloading test
水利水运工程学报. 2017(6): 85 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.012>

混凝土冻融劣化后动态单轴抗压特性试验研究

Experimental studies of dynamic uniaxial compressive properties of concrete after freeze-thaw deterioration
水利水运工程学报. 2017(6): 69 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.010>

冻融劣化混凝土压剪作用下力学特性及破坏准则

Mechanical properties and failure criterion of freeze-thaw deteriorated concrete under compressive-shear stress
水利水运工程学报. 2019(4): 107 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.015>

基于正交设计的膨胀土冻融循环试验研究

Experimental studies on freeze-thaw cycles of expansive soil based on orthogonal design
水利水运工程学报. 2017(2): 51 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.02.007>

冻融循环对膨胀土变形和力学特性的影响研究

Study on the influence of freeze-thaw cycles on the deformation and mechanical properties of expansive soil
水利水运工程学报. 2021(5): 112 <https://doi.org/10.12170/20210116001>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20211118005

孙超伟, 陈兴周, 柴军瑞, 等. 冻融环境下水工碾压混凝土单轴动态抗压性能研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(1): 83-94. (SUN Chaowei, CHEN Xingzhou, CHAI Junrui, et al. Research on the uniaxial compressive behavior of hydraulic roller compacted concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 83-94. (in Chinese))

冻融环境下水工碾压混凝土单轴动态抗压性能研究

孙超伟¹, 陈兴周², 柴军瑞³, 卫田霖⁴, 马 斌⁴

(1. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 4. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123)

摘要: 为研究冻融循环和加载应变率对水工碾压混凝土抗压力学性能的影响, 通过室内模拟碾压混凝土坝工程配合比和施工工艺制备碾压混凝土试件, 开展不同冻融循环次数(0、25、50、75次)下的冻融试验和不同加载应变率($10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$)下的单轴压缩试验, 分析碾压混凝土冻融表现特征及加载破坏形态, 研究冻融循环次数和加载应变率对抗压力学性能的影响规律; 并基于多元回归分析方法, 构建抗压强度、峰值应变、应力-应变曲线与冻融循环次数和加载应变率的相关关系。结果表明: 碾压混凝土抗压强度与加载应变率呈线性增强关系, 与冻融循环次数满足二次多项式的劣化关系; 峰值应变与加载应变率满足二次多项式的降低关系, 与冻融循环次数满足二次多项式的增长关系。通过全应力-应变拟合曲线与试验曲线的比较发现, 在研究的应变率和冻融循环次数范围内, 二者吻合较好。

关键词: 碾压混凝土; 动力特性; 冻融循环; 加载应变率; 全应力-应变曲线

中图分类号: TV431⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2023)01-0083-12

为满足西部水电能源进一步开发的需要, 我国高海拔寒区正在或即将修建一批 100~300 m 级的高碾压混凝土坝^[1-2]。与常态混凝土坝相比, 碾压混凝土坝在施工时经过振动碾压作用的混凝土密实性较高, 内部孔隙较少, 理论上抗冻性也会有明显提升。但由于提高了粉煤灰的掺量, 水泥用量较少, 由此导致碾压混凝土胶凝材料分布不均匀、水化产物结构不致密, 在冻融循环作用下其力学和耐久性能会出现不同程度的劣化, 从而威胁大坝的安全运行^[3-4]。另外, 混凝土坝在服役期间, 不仅承受着冻融循环的侵蚀作用, 而且也会经受库水位波动、爆炸和地震等动态荷载的作用。作为应变率敏感型材料, 混凝土在动态荷载作用下往往呈现出不同于静态荷载下的力学性能^[5-8]。因此, 有必要开展冻融循环下碾压混凝土动态力学性能研究。

目前, 国内外学者针对冻融循环作用下混凝土动态力学性能的研究, 主要围绕冻融劣化效应和加载应变率效应两个方面展开。在冻融劣化效应研究方面, 施士升^[9]研究了冻融循环作用对普通混凝土及高强混凝土力学性能的影响规律, 并建立了冻融损伤和微观结构之间的关系; Hasan 等^[10]通过对冻融循环作用后混凝土力学特性的分析, 建立了混凝土冻融损伤本构模型; 邹超英等^[11]根据工程中结构构件的实际工作状态, 开展了冻融循环作用后混凝土的抗冻性能及基本力学性能衰减规律的试验研究; Duan 等^[12]针对素混凝土与约束混凝土开展了冻融循环作用下应力-应变全曲线的试验研究, 通过对试验数据的回归分析, 提出了受冻融混凝土及约束混凝土的应力应变全曲线方程及参数求解公式; 曹大富等^[13]对经历冻融损伤的混凝土进行压缩试验, 提出了冻融循环后混凝土抗压性能的计算公式及应力应变全曲线方程; 田威等^[14-16]对自然状态和饱水状态下混凝土试件分别进行了冻融循环试验及单轴压缩试验, 研究了混凝土抗压强度、弹性模

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909224, 51979218, U1965107); 陕西省基础研究计划项目(2020JQ-920); 陕西省教育厅专项科研项目(19JK0910)

作者简介: 孙超伟(1990—), 男, 陕西周至人, 副教授, 主要从事寒区水工混凝土结构安全与耐久性研究。

E-mail: chao_wei_106@126.com

量、应力-应变关系等力学性能随冻融循环次数的变化规律,并基于CT扫描技术对冻融试件进行微观结构分析。在加载应变率效应研究方面,徐媛媛等^[17]通过开展普通混凝土在不同应力比和不同应变速率下的真三轴静、动态压缩试验,分析其强度特性和变形特性,并基于八面体应力空间建立了考虑应变速率效应的真三轴动态破坏准则;Zhang等^[18]针对碾压混凝土本体试件开展了不同应变率加载下的力学特性试验研究,并对碾压混凝土坝在不同水位和地震工况下的力学响应进行分析,揭示了碾压混凝土坝层面在压剪荷载作用下的破坏机理;王怀亮等^[19]针对二级配碾压混凝土本体、层面处理和层面不处理试件,开展单轴及多轴剪切试验,对比分析了不同应力条件下本体和含层面试件的剪切力学特性,并建立了不同应力状态下碾压混凝土剪切破坏准则;王怀亮等^[20]还分别针对二级配和三级配碾压混凝土试件,通过开展单向应力状态下的动态拉、压试验,分析了加载速率对其强度及变形特性的影响规律;张社荣等^[21]通过SHPB试验系统开展碾压混凝土动态冲击压缩试验,分析了应力-应变曲线、强度及变形特征、破坏形态及吸能特性,并建立基于Weibull分布的损伤演化本构模型。

综上所述可以发现,目前针对常态混凝土的冻融劣化效应和加载应变率效应研究较多,关于碾压混凝土的相关研究较少,而且只考虑了加载应变率效应,并未涉及冻融劣化效应。基于此,本文通过开展不同冻融循环次数(0、25、50、75次)下的冻融试验和不同加载应变率($10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$)下的单轴压缩试验,分析碾压混凝土的冻融表现特征及加载破坏形态,研究抗压强度、峰值应变和应力-应变曲线随冻融循环次数和加载应变率的变化规律,构建抗压强度、峰值应变、全应力-应变曲线方程与冻融循环次数和加载应变率的相关关系。

1 试验方案和步骤

1.1 试样制备

碾压混凝土拌合物选用的材料如下:普通自来水、水泥(陕西声威P·O 32.5普通硅酸盐水泥)、粉煤灰(西安灞桥热电厂Ⅱ级粉煤灰)、天然河砂、二级配石灰岩碎石、复合型外加剂(DK-5型)。参考水工碾压混凝土大坝常用的Ⅱ级配配合比进行拌合,其中小石粒径5~20 mm,中石20~40 mm;按照《水工混凝土配合比设计规程》(DL/T 5330—2015)对配合比进行调整,使拌合物和易性达到要求,最终采用的混凝土组成如表1所示。

表1 Ⅱ级配碾压混凝土组成
Tab. 1 Roller compacted concrete mix proportion with gradation aggregates II

水/($kg \cdot m^{-3}$)	水泥/($kg \cdot m^{-3}$)	粉煤灰/($kg \cdot m^{-3}$)	水胶比	砂率/%	砂/($kg \cdot m^{-3}$)	粗骨料/($kg \cdot m^{-3}$)	外加剂质量百分比/%
88	70	106	0.5	33	672	1 507	0.05

碾压混凝土试件采用150 mm×150 mm×150 mm的立方体,参照《水工碾压混凝土试验规程》(DL/T 5433—2009),浇筑前按照湿筛法筛除粒径大于40 mm的粗骨料。试件浇筑时采用钢模成型,分两次装料后进行分层碾压(层厚75 mm),先浇筑成型下半部分试件,再装料浇筑成型上半部分试件。采用平板振捣器对碾压混凝土拌合物进行振捣和碾压,振捣频率和振捣幅度分别设为47 Hz和0.8 mm,碾压和振动时间以表面泛浆为准。所有试件浇筑完养护48 h后拆模,然后采用标准养护箱养护至90 d的设计龄期。

1.2 试验设备和试验方案

根据《水工碾压混凝土试验规程》(DL/T 5433—2009)的规定,采用TDR-28型冻融箱进行碾压混凝土快速冻融试验。试验开始前,首先将试件放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ C$ 的自来水中浸泡4 d,并且每天拿出称取质量,待试件质量不再增加后放入冻融箱内,开启冻融循环试验,控制试样中心温度保持在 $(-18 \pm 2)^\circ C \sim (5 \pm 2)^\circ C$ 范围内,单次冻融循环时间为2~4 h,冻融循环次数设置为0、25、50、75次。冻融循环试验完成后,采用DT-20动弹仪测试试件的相对弹性模量。

碾压混凝土单轴压缩试验采用 MTS 万能试验机。加载应变率设为 $10^{-5}/s$ (准静态加载)、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 。为减小试件加载端面与加载板之间的端部摩擦效应,采取在试件表面粘贴两层聚四氟聚乙烯塑料垫片的措施。在开展正式试验前,先通过轴向荷载控制方式对试件进行预压,加载至 2.0 kN 后,采用轴向位移控制方式进行不同应变率加载,直至试件破坏。根据冻融试验和单轴加载试验方案的组合情况,共设计 16 组试验工况,每组 3 个试件,共计 48 个试件。

2 冻融外观特征及加载破坏形态

2.1 冻融外观特征

碾压混凝土试件在经历不同次数冻融循环作用后的外观特征如图 1 所示。可以看出,未经冻融循环作用的碾压混凝土试件,除天然形成的孔洞外,表面基本平整光滑,如图 1(a) 所示;经历 25 次冻融循环作用后,试件表面有少量的细微水泥浆颗粒脱落,导致局部表面粗糙,如图 1(b) 所示;经历 50 次冻融循环作用后,试件表面部分骨料外露,变得比较粗糙,同时在试件表面的水泥砂浆区域出现肉眼可见的细小裂纹,如图 1(c) 所示;经历 75 次冻融循环作用后,碾压混凝土试件表面胶凝材料严重脱落,骨料外露,四周棱角处的混凝土块脱落,表面微裂纹呈现向四周快速扩展趋势,试样变得酥化,如图 1(d) 所示。

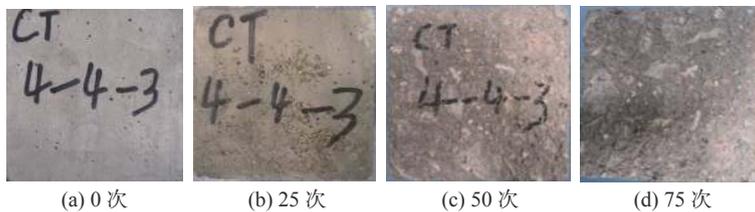


图 1 不同冻融循环次数后外观特征

Fig. 1 Appearance subjected to different freeze-thaw cycles

2.2 加载破坏形态

图 2 为不同冻融循环次数的碾压混凝土试件在应变率为 $10^{-3}/s$ 条件下的加载破坏形态。可以看出,经历不同次数冻融循环作用后碾压混凝土试件在单轴动态加载条件下呈现柱状破坏形态,这是由于加载前对承压端面进行了减摩处理,从而削弱了加载过程中试件端部受到的箍束作用。未经历冻融循环作用下,碾压混凝土试件在单轴动态加载下发生破坏时,侧面端部区域出现竖向裂纹,与加载方向近似平行,但表面裂纹并没有贯通,如图 2(a) 所示;随着冻融循环次数的增加,试件加载破坏时侧面竖向裂纹分布变得愈发密集,并呈现出向试件中心不断扩展的趋势,局部碎裂掉落的迹象也愈发明显,如图 2(b) 和 2(c) 所示;当冻融循环次数为 75 次时,试件的破坏形态呈现劈裂状,整个侧面布满了贯通的竖向裂纹,试件局部被压碎,尤其是底部棱角区域由于应力集中导致破坏十分严重,如图 2(d) 所示。这是由于经历冻融循环作用后,碾压混凝土由内至外形成了逐渐递增的诸如微小裂纹和孔洞等初始损伤,并且初始损伤程度随着冻融循环次数的增加而加剧,导致试件的加载破坏程度加剧。

图 3 为冻融循环 25 次后碾压混凝土试件在不同应变率条件下的加载破坏形态。可以看出,不同应变率加载条件下,试件侧面整体上呈现柱状破坏的形态。当加载应变率为 $10^{-5}/s$ 时,试件破坏时侧面端部区域形成了近似平行于加载方向的竖向裂纹,并且贯通裂纹较少,如图 3(a) 所示;随着加载速率的提高,破坏时侧面竖向裂纹变得更加密集并向试件中心不断扩展,贯通裂纹数目也明显增加,而且局部碎裂掉落现象也愈发显著,如图 3(b) 和 3(c) 所示;当加载应变率提高至 $10^{-2}/s$ 时,贯通的竖向裂纹数量和宽度进一步增大,试件局部被压碎,如图 3(d) 所示。另外,随着加载速率的提升,试件侧面竖向裂纹呈现出分支互相搭接并且交错分布的“桥接”现象,使其保持部分承载能力,没有出现整体被压碎的现象。

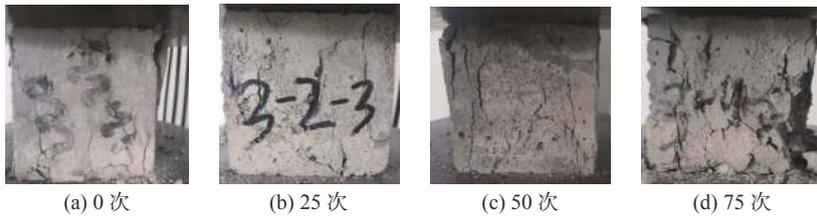


图 2 不同冻融循环次数后加载破坏形态

Fig. 2 Failure mode subjected to different freezing-thawing cycles

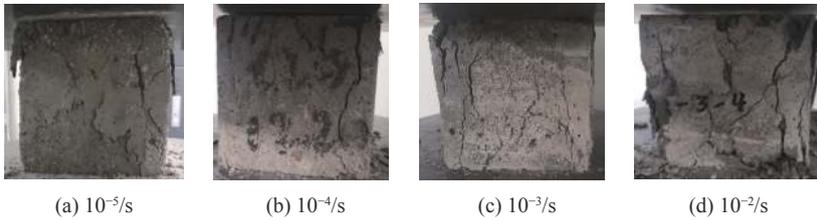


图 3 不同应变率下加载破坏形态

Fig. 3 Failure mode subjected to different loading strain rates

3 物理力学参数

3.1 冻融损伤参数

图 4 和 5 分别给出了碾压混凝土质量损失率和相对动弹性模量随冻融循环次数的变化关系。

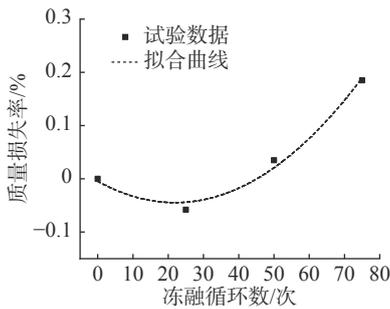


图 4 质量损失率与冻融循环次数的关系曲线

Fig. 4 Relationship between mass loss rate and freezing-thawing cycles

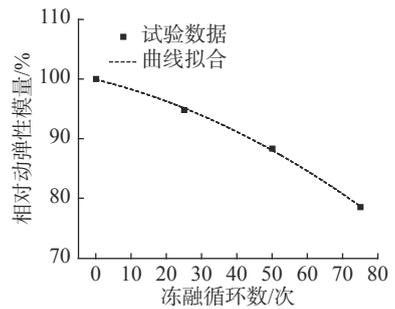


图 5 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系曲线

Fig. 5 Relationship between relative dynamic elasticity modulus and freezing-thawing cycles

由图 4 可见,随着碾压混凝土经历冻融循环次数的增加,其质量损失率整体上呈现先下降再上升的趋势。在经历 25 次冻融循环作用后碾压混凝土质量损失率为负,这是由于冻融循环初始阶段,一方面试件表面砂浆剥落较少,质量损失较小;而另一方面,冻融循环使得试件内微小孔隙数目不断增加,在水冻和水融环境中孔隙水含量提高,试件含水量升高引起的质量增加值高于冻融循环引起的质量损失值,因此质量损失为负值。但当冻融循环超过 25 次后,由于试件质量损失值高于内部孔隙水含量的增加值,因此,试样的质量损失率呈现上升趋势;尤其是当冻融循环次数增加到 75 次时,试件中累积的冻融损伤已经比较显著,试件结构变得疏松,出现表面块体脱落和四周棱角掉落的现象,导致试件的质量损失率明显上升。

由图 5 可以看出,随冻融循环次数的增加,试件相对动弹性模量呈减小趋势。这是由于冻融试验过程中,孔隙自由水冻结时因水冰相变产生的冻胀力,导致试件内部的微裂缝或微小孔隙不断扩展,形成冻融损伤;随着温度升高,孔隙冰融解并伴随冻胀力的释放与自由水的扩散迁移,为进一步冻融损伤提供条件。随

着冻融循环次数的累加, 累积形成的冻融损伤使试件力学性能不断劣化, 宏观表现为试件表面砂浆的剥落。

根据试验结果, 采用最小二乘法分别建立质量损失率、相对动弹性模量与冻融循环次数的关系式:

$$\Delta W_N = -0.0047 - 0.00365N + 8.32 \times 10^{-5}N^2 \quad (1)$$

$$P_N = 99.87 - 0.14532N - 0.00185832N^2 \quad (2)$$

式中: ΔW_N 为质量损失率(%); P_N 为相对动弹性模量(%); N 为冻融循环次数。

3.2 抗压强度

3.2.1 抗压强度的应变率效应 表 2 为抗压强度试验结果, 图 6 为抗压强度与应变率关系曲线。从表 2 和图 6 可见, 碾压混凝土抗压强度呈现出明显的应变率相关性, 具体表现为: 相同冻融循环次数下的抗压强度随着加载应变率的提高而增大, 以冻融循环 50 次为例, 相对于准静态加载下的抗压强度 14.37 MPa, 当加载应变率为 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$ 时, 抗压强度分别提高至 15.60、17.40、19.00 MPa, 增幅分别为 7.9%、21.1%、32.2%, 说明冻融循环作用后碾压混凝土具有应变率强化效应。这是由于冻融循环作用后碾压混凝土在单轴受压状态下的裂纹扩展速度更快, 随着加载应变率的提高, 裂纹来不及沿着砂浆与粗骨料的界面薄弱区扩展, 而是直接穿越粗骨料发展, 导致抗压强度提高。

引入动态强度增长因子 D_σ (Dynamic Increase Factor), 表征不同应变率下抗压强度相对于准静态下抗压强度的增加程度。已有研究^[20]表明, 动态强度增长因子与加载应变率的对数接近线性关系, 表达式为:

$$D_\sigma = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} = 1.0 + k \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) \quad (3)$$

式中: f_{cd} 为动态加载下的抗压强度 (MPa); f_{cs} 为准静态下的抗压强度 (MPa); k 为拟合参数; $\dot{\epsilon}_d$ 为动态加载应变率 ($\dot{\epsilon}_d = 10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$), $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变率 ($\dot{\epsilon}_s = 10^{-5}/s$)。

采用式 (3) 对不同冻融循环次数下碾压混凝土 D_σ 与 $\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s$ 的关系进行回归分析, 拟合曲线与试验数据的对比如图 7 所示。结果表明, 采用式 (3) 可以表征抗压强度与加载应变率的关系。

3.2.2 抗压强度的冻融劣化效应 图 8 为不同应变率下抗压强度与冻融循环次数的关系曲线。可以看出, 碾压混凝土抗压强度表现出明显的冻融循环次数相关性。具体表现为: 相同加载应变率下的抗压强度随着冻融循环次数的增加而降低。以加载应变率 10^{-2} 为例, 相对于未经历冻融循环作用的抗压强度 35.20 MPa, 冻融循环 25、50、75 次后的抗压强

表 2 抗压强度结果

Tab. 2		Compression strength results				单位: MPa
冻融循环数/次	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$		
0	28.37	30.67	32.97	35.20		
25	22.23	24.50	26.76	28.37		
50	14.37	15.60	17.40	19.00		
75	9.33	11.00	12.00	12.83		

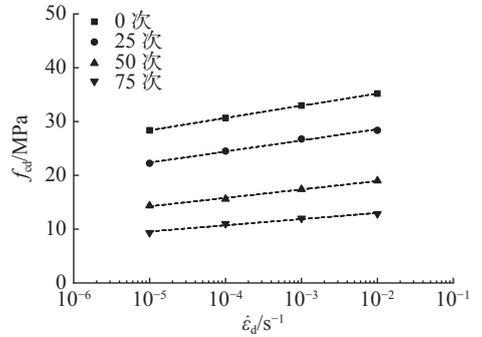


图 6 不同冻融循环次数下 f_{cd} 与 $\dot{\epsilon}_d$ 关系

Fig. 6 Relationship between f_{cd} and $\dot{\epsilon}_d$ under different freezing-thawing cycles

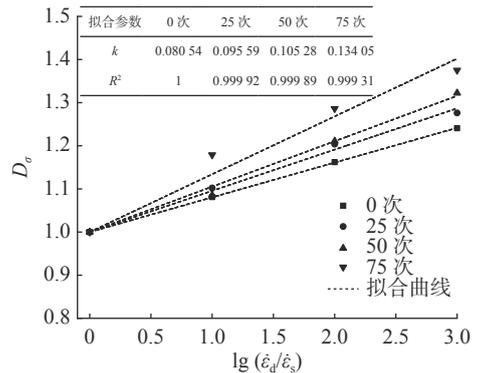


图 7 不同冻融循环次数下 D_σ 与 $\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s$ 关系

Fig. 7 Relationship between D_σ and $\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s$ under different freezing-thawing cycles

度分别降低至 28.37、19.00、12.83 MPa, 降幅分别为 19.4%、46.0%、63.5%, 说明应变率加载条件下碾压混凝土抗压强度具有冻融劣化效应。这是由于随着冻融循环次数的增加, 碾压混凝土内部的冻融损伤进一步加剧并且不断累积, 从而导致其单轴抗压强度明显下降。

类似于动态强度增长因子的定义方式, 引入强度劣化因子 S_σ (Strength Decreasing Factor), 表征不同冻融循环次数下抗压强度的冻融劣化效应。已有研究结果^[21]表明, 混凝土冻融循环强度劣化因子与冻融循环次数接近二次非线性关系, 表达式为:

$$S_\sigma = \frac{f_{cN}}{f_{c0}} = 1.0 + k_1 N + k_2 N^2 \quad (4)$$

式中: f_{cN} 为不同冻融循环次数下的抗压强度 (MPa); f_{c0} 为未经历冻融的抗压强度 (MPa); k_1 、 k_2 为参数。

采用式 (4) 对不同应变率加载下 S_σ 与 N 的关系进行回归分析, 拟合曲线与试验数据的对比如图 9 所示。结果表明, 采用式 (4) 可以表征强度劣化因子与冻融循环次数的关系。

3.2.3 峰值抗压强度与冻融循环次数和加载应变率的变化关系 考虑到抗压强度的应变率增强效应和冻融劣化效应, 利用多元回归分析方法建立水工碾压混凝土抗压强度与加载应变率和冻融循环次数的关系式如下:

$$\frac{f_c}{f_{cs0}} = (1.0 - 0.0098N + 1.374 \times 10^{-5} N^2) \times \left(1.0 + 0.00731g \left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right) \quad (5)$$

式中: f_c 为不同冻融循环次数下的动态抗压强度 (MPa); f_{cs0} 为未经历冻融的准静态抗压强度 (MPa)。

3.3 峰值应变

3.3.1 峰值应变的应变率效应 峰值应变描述了混凝土材料达到抗压强度时变形的大小, 是反映材料发生变形及破坏的重要指标。表 3 为峰值应变试验结果, 图 10 为峰值应变与应变率关系。可以看出, 冻融循环作用后碾压混凝土单轴动态加载下的峰值应变表现出明显的应变率相关性: 同一冻融循环次数下的峰值应变随着加载应变率的增大, 先明显降低而后有小幅提高, 但整体上仍然呈下降趋势。以冻融循环作用 50 次为例, 相对于准静态加载下的峰值应变 2.12×10^{-3} , 加载应变率为 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} /s 时的峰值应变分别下降至 1.66×10^{-3} 、 1.60×10^{-3} 、 1.68×10^{-3} , 降幅分别为 21.70%、24.5%、20.8%。这是由于冻融循环作用后碾压混凝土在单轴受压状态下的裂纹扩展速度更快, 随着加载应变率的提高, 变形来不及充分发展, 从而导致峰值应变逐渐降低。

引入峰值应变比 $\epsilon_{cd}/\epsilon_{cs}$, 表示不同加载应变率下峰值应变相对于准静态下峰值应变的增加程度。根据前人的研究结果^[20], 单轴加载下峰值应变比与应变率的对数具有二次非线性关系, 表达式如下:

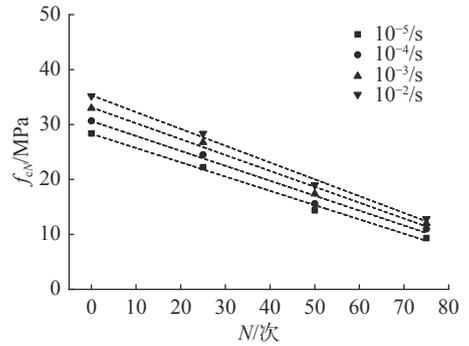


图 8 不同应变率下 f_{cN} 与 N 关系

Fig. 8 Relationship between f_{cN} and N under different loading strain rates

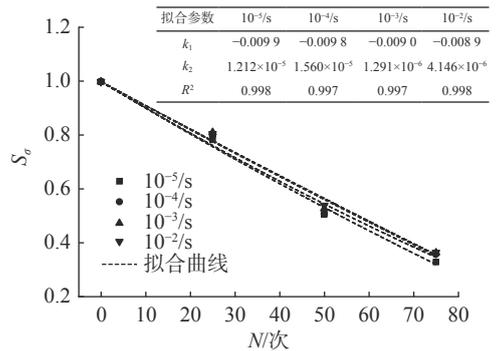


图 9 不同应变率下 S_σ 与 N 关系

Fig. 9 Relationship between S_σ and N under different strain rates

表 3 峰值应变试验结果

Tab. 3 Peak strain results

冻融循环次数/次	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
0	1.67×10^{-3}	1.17×10^{-3}	1.11×10^{-3}	1.18×10^{-3}
25	1.71×10^{-3}	1.27×10^{-3}	1.20×10^{-3}	1.25×10^{-3}
50	2.12×10^{-3}	1.66×10^{-3}	1.60×10^{-3}	1.68×10^{-3}
75	2.52×10^{-3}	2.06×10^{-3}	1.99×10^{-3}	2.08×10^{-3}

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{cs}} = 1.0 + l_1 \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s}\right) + l_2 \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s}\right)^2 \quad (6)$$

式中: ε_{cd} 为动态加载下的峰值应变; ε_{cs} 为准静态加载下的峰值应变; l_1 、 l_2 为参数。

采用式(6)对不同冻融循环次数下 $\varepsilon_{cd}/\varepsilon_{cs}$ 与 $\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s$ 的关系进行回归分析, 拟合曲线与试验数据的对比如图 11 所示。结果表明, 采用式(6)可以表征峰值应变比与应变率的关系。

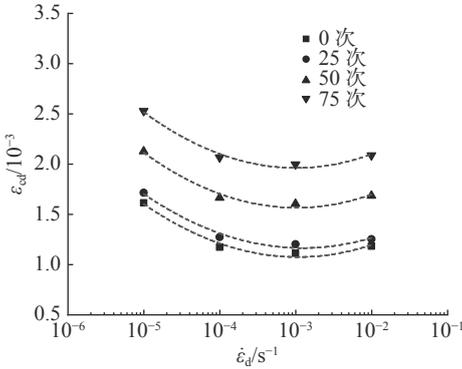


图 10 不同冻融循环次数下 ε_{cd} 与 $\dot{\varepsilon}_d$ 关系

Fig. 10 Relationship between ε_{cd} and $\dot{\varepsilon}_d$ under different freezing-thawing cycles

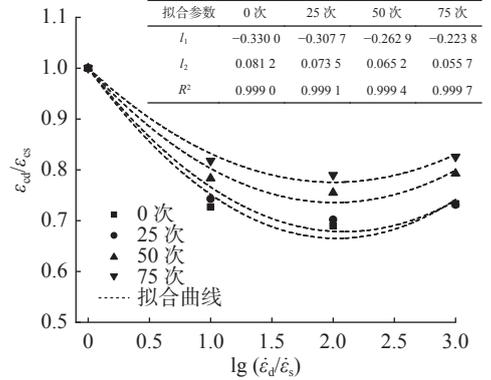


图 11 不同冻融循环次数下 $\varepsilon_{cd}/\varepsilon_{cs}$ 与 $\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s$ 关系

Fig. 11 Relationship between $\varepsilon_{cd}/\varepsilon_{cs}$ and $\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s$ under different freezing-thawing cycles

3.3.2 峰值应变随冻融循环次数的变化规律

图 12 为不同应变率下峰值应变与冻融循环次数的关系。可以看出, 相同应变率加载下的峰值应变随冻融循环次数的提高而上升, 且冻融循环次数越多, 增幅越明显, 说明单轴动态加载下峰值应变呈现出明显的冻融循环次数相关性。以加载应变率为 10^{-2} 为例, 相对于未经历冻融循环作用下的峰值应变 1.18×10^{-3} , 冻融循环 25、50、75 次后的峰值应变分别提高至 1.25×10^{-3} 、 1.68×10^{-3} 、 2.08×10^{-3} , 增幅分别为 5.9%、42.4%、63.5%。这是由于单轴动态加载作用下裂纹扩展速度更快, 随着冻融循环次数的增加, 冻融损伤加剧引起裂纹扩展更加容易, 从而导致变形及峰值应变也不断增大。

引入峰值应变比 $\varepsilon_{cN}/\varepsilon_{c0}$, 表征不同次数冻融循环作用下峰值应变相对于未冻融条件下峰值应变的增加程度。已有研究结果^[21]表明, 碾压混凝土峰值应变比与冻融循环次数接近二次非线性关系, 表达式如(7)所示:

$$\frac{\varepsilon_{cN}}{\varepsilon_{c0}} = 1.0 + m_1 N + m_2 N^2 \quad (7)$$

式中: ε_{cN} 为冻融循环后的峰值应变; ε_{c0} 为未冻融下的峰值应变; m_1 、 m_2 为参数。

采用式(7)对不同应变率加载下 $\varepsilon_{cN}/\varepsilon_{c0}$ 与 N 的关系进行回归分析, 拟合曲线与试验数据的对比如图 13 所示。结果表明, 采用式(7)可以表征峰值应

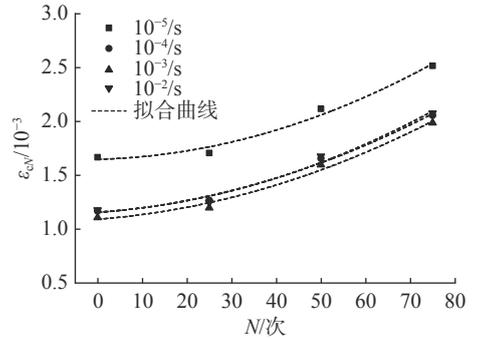


图 12 不同应变率下 ε_{cN} 与 N 的关系

Fig. 12 Relationship between ε_{cN} and N under different strain rates

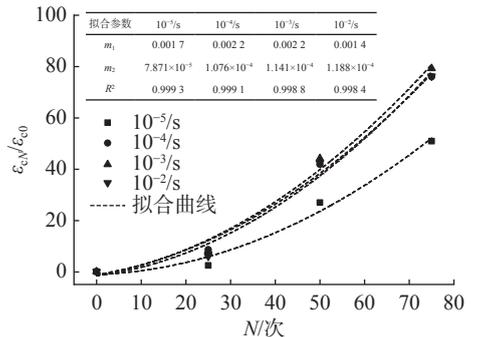


图 13 不同应变率下 $\varepsilon_{cN}/\varepsilon_{c0}$ 与 N 的关系

Fig. 13 Relationship between $\varepsilon_{cN}/\varepsilon_{c0}$ and N under different strain rates

变比与冻融循环次数的关系。

3.3.3 峰值应变与冻融循环和加载应变率的变化关系 综合考虑冻融循环和加载应变率对峰值应变的影响,采用多元回归方法建立碾压混凝土峰值应变随应变率和冻融循环次数的关系表达式如下:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cs0}} = (1.0 - 0.0117N + 1.1447 \times 10^{-5}N^2) \times \left(1.0 - 0.02237g \left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s} \right) + 0.0135 \left[\lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s} \right) \right]^2 \right) \quad (8)$$

式中: ε_c 为不同冻融循环次数下的动态峰值应变; ε_{cs0} 为未经历冻融下的准静态峰值应变。

4 全应力-应变曲线

图 14 和图 15 为不同加载应变率和不同冻融循环次数下全应力-应变曲线。

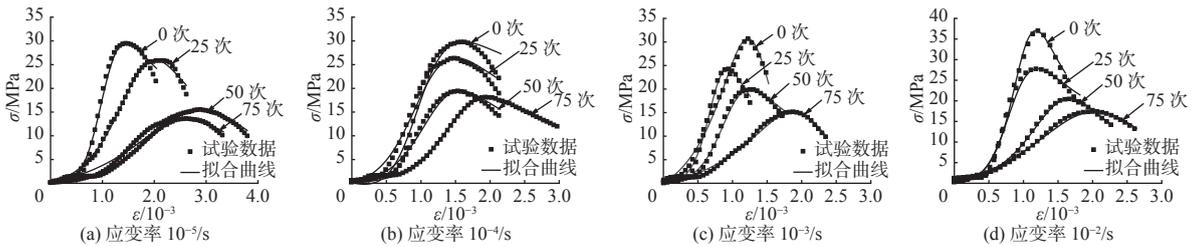


图 14 不同应变率下全应力-应变曲线

Fig. 14 Complete stress-strain curves under different strain rates

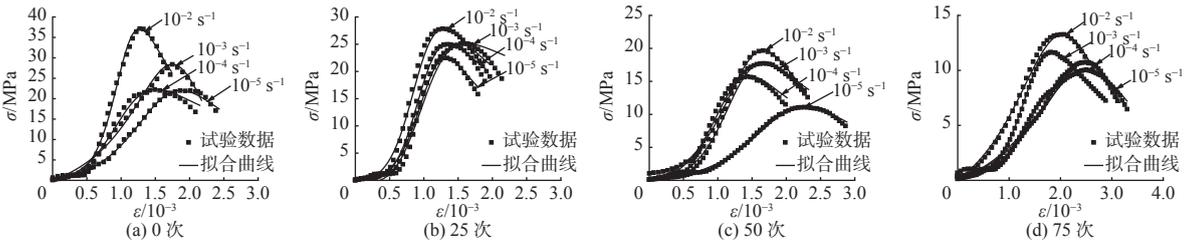


图 15 不同冻融循环次数下全应力-应变曲线

Fig. 15 Complete stress-strain curves under different freeze-thaw cycles

可以看出,全应力-应变曲线全过程大致经历了以下 3 个阶段:

(1)初始变形阶段。该阶段应力缓慢增加而变形发展较快。该阶段变形源于在轴向压缩下试件内部孔隙和裂隙被压密而产生了闭合。由于该阶段试件所受荷载和产生的闭合变形都较小,因此曲线形状受应变率效应和冻融效应的影响也比较小。

(2)弹性变形阶段。该阶段的应力与应变呈线性关系,曲线斜率(即弹性模量)表现出不同程度的冻融次数和应变率相关性,具体表现在:线性段斜率(即弹性模量)随着冻融循环次数的增加而降低,随着加载应变率的增加而提高。

(3)塑性变形至破坏阶段。该阶段曲线呈现下凹状,同一应变率下,随着冻融循环次数的增加,曲线由陡峭变得更加扁平,其峰值应力点呈现显著下降并且右移的趋势,说明峰值应力显著降低,相应的峰值应变明显增大;同一冻融循环次数下,随着应变率的提高,曲线由扁平逐渐变得更加陡峭,其峰值应力点呈现逐渐增大且左移的趋势,说明峰值应力逐渐增大,相应的峰值应变逐渐减小。另外,对比图 14 和图 15 可以发现,全应力-应变曲线对冻融的敏感性明显高于对加载应变率的敏感性。

通过对试验实测的应力与应变数据进行无量纲化处理,绘制以 $\varepsilon/\varepsilon_c$ 为横坐标,以 σ/f_c 为纵坐标的全应力-

应变曲线。可以发现, 冻融循环后碾压混凝土在单轴动态加载下的全应力-应变曲线呈现出相似的几何特征, 其上升段和下降段分别具备特定的函数关系。因此, 本文全应力-应变曲线控制方程采用不同的数学表达式, 上升段参考 Sargin 等^[22] 建议的曲线形式, 下降段选用过镇海等^[23] 提出的曲线形式, 全曲线方程如下:

$$y = \begin{cases} \frac{ax + (b-1)x^2}{1 + (a-2)x + bx^2} & (0 \leq x \leq 1) \\ \frac{x}{c(x-1)^2 + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_c$, ε 为应变, ε_c 为峰值应变; $y = \sigma/f_c$, σ 为应力, f_c 为抗压强度 (MPa); a, b 为上升段控制参数, c 为下降段控制参数。

根据式 (9) 对应力、应变试验数据, 采用最小二乘法进行非线性拟合, 得到不同加载应变率与冻融循环作用下全应力-应变曲线方程的控制参数 a, b, c , 如表 4 所示。可以看出, 相同加载应变率下, 随着冻融循环次数的增加, a 值先减小后增大, 整体上呈增大趋势; b 值先增大后减小, 整体上呈减小趋势; c 值呈现一直增大的趋势。同一冻融循环次数下, 随着应变速率的增大, a, b, c 值整体上呈现不同程度的增大趋势。

表 4 全应力-应变曲线方程控制参数
Tab. 4 Control parameters of stress-strain equations

冻融循环数/次	$10^{-5}/s$			$10^{-4}/s$			$10^{-3}/s$			$10^{-2}/s$		
	a	b	c									
0	0.256	1.007	1.820	0.202	1.308	1.997	0.158	1.625	2.192	0.108	1.945	2.512
25	-0.230	1.414	2.018	-0.066	1.717	2.171	0.018	2.044	2.344	0.036	2.325	2.623
50	0.136	1.144	2.215	0.273	1.332	2.344	0.345	1.741	2.497	0.333	1.788	2.802
75	0.468	0.886	2.412	0.576	0.994	2.518	0.641	1.278	2.649	0.644	1.290	2.963

分别建立参数 a, b, c 与应变率 $\dot{\varepsilon}_d$ 和冻融循环次数 N 的关系。通过回归分析, 得到全应力-应变曲线方程的控制参数 a, b, c 与应变率和冻融循环次数的关系表达式, 分别如下:

$$\frac{a_D}{a_0} = \begin{cases} (1.0-0.049\ 08N)(1.0+0.015\ 08\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)-0.019\ 35[\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)]^2) & (0 \leq N < 25) \\ (-0.840\ 98+0.033\ 79N)(1.0+0.517\ 92\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)+0.108\ 71[\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)]^2) & (25 \leq N \leq 75) \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{b_D}{b_0} = \begin{cases} (1.0+0.01336N)(1.0-0.020\ 84\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)) & (0 \leq N < 25) \\ (1.705\ 44-0.011\ 56N)(1.0-0.060\ 21\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)) & (25 \leq N \leq 75) \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{c_D}{c_0} = (1.0+0.003\ 72N)(1.0-0.009\ 48\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)-0.002\ 59[\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)]^2) \quad (12)$$

式中: a_D, b_D, c_D 为加载应变率加载下全应力-应变曲线的控制参数; a_0, b_0, c_0 为准静态加载下全应力-应变曲线的控制参数。

由于式 (9)~(12) 中涉及的相关参数 $f_c, \varepsilon_c, a_0, b_0, c_0$ 都是各参数在同一加载应变率、未冻融情况下的特征值, 为了构建同时考虑应变率和冻融循环作用的碾压混凝土单轴动态本构模型, 还需确定并建立未冻融情况下各参数与加载应变率之间的关系。因此, 将表 2 和 3 中未冻融、准静态应变率下的试验数据, 代入式 (3) 和 (6), 分别得到未冻融情况下 f_c, ε_c 与加载应变率 $\dot{\varepsilon}_d$ 的关系, 表达式如下:

$$f_{c0} = 28.37 + 2.284\ 92\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s) \quad (13)$$

$$\varepsilon_{c0} = [1.67 - 0.551\ 11\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s) + 0.135\ 61\lg(\dot{\varepsilon}_d/\dot{\varepsilon}_s)^2] \times 10^{-3} \quad (14)$$

对表 4 中未冻融、不同应变率下各参数的特征值, 分别进行最小二乘法拟合, 得到的参数 a_0 、 b_0 、 c_0 与加载应变率 $\dot{\epsilon}_d$ 的关系表达式如下:

$$a_0=0.254\ 41-0.048\ 91\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (15)$$

$$b_0=1.001\ 6+0.313\ 1\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (16)$$

$$c_0=1.789\ 6+0.227\ 1\lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (17)$$

对于冻融循环作用后的碾压混凝土, 其在单轴加载应变率加载下的本构模型建立过程如下: 采用式(9)作为全应力-应变曲线的控制方程, 由式(5)、(13)确定不同应变率和冻融循环次数下的抗压强度, 由式(8)、(14)确定不同应变率和冻融循环次数下的峰值应变, 由式(10)、(15)和式(11)、(16)分别确定不同应变率和冻融循环次数下全应力-应变曲线上升段的控制参数 a_D 、 b_D , 由式(12)、(17)确定不同应变率和冻融循环次数下应力-应变曲线下降段的控制参数 c_D 。根据该本构模型, 计算所得的碾压混凝土应力-应变拟合曲线与试验曲线的对比如图 14、15 所示。可以看出, 在本试验应变率和冻融循环范围内, 二者吻合较好。

5 结 语

(1)冻融循环作用后, 碾压混凝土抗压强度、峰值应变均呈现出明显的应变率和冻融循环次数相关性。抗压强度与应变率呈线性增强的关系, 与冻融循环次数满足二次多项式的劣化关系; 峰值应变与加载应变率呈二次多项式的降低关系, 与冻融循环次数满足二次多项式的增长关系。

(2)碾压混凝土应力-应变曲线形状表现出明显的冻融次数和应变率相关性, 通过回归分析得到的冻融循环作用下应力-应变全理论曲线方程, 通过与试验曲线的比较发现, 在本文应变率和冻融循环次数范围内, 二者吻合较好。

参 考 文 献:

- [1] 席浩, 武斌忠, 王保法. 碾压混凝土研究与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 8-15. (XI Hao, WU Binzhong, WANG Baofa. Research and engineering practice of roller compacted concrete[M]. Beijing: China Water Power Press, 2015: 8-15. (in Chinese))
- [2] 贾金生. 碾压混凝土坝发展水平和工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (JIA Jinsheng. Development level and engineering examples of roller compacted concrete[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [3] HAZAREE C, CEYLAN H, WANG K J. Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(1): 313-319.
- [4] ALGIN Z, GERGINCI S. Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117382.
- [5] 张楚汉, 金峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 253-264. (ZHANG Chuhan, JIN Feng, WANG Jinting, et al. Key issues and developments on seismic safety evaluation of high concrete dams[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 253-264. (in Chinese))
- [6] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project: NB 35047—2015[S]. Beijing: China Water Power Press, 2015. (in Chinese))
- [7] 郑丹, 梁云涛, 李鑫鑫. 黏性对动力荷载下混凝土强度的影响机理[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(6): 152-159. (ZHENG Dan, LIANG Yuntao, LI Xinxin. Influence mechanism of pore liquid viscosity on concrete strength under dynamic loading[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(6): 152-159. (in Chinese))
- [8] 王国盛, 路德春, 杜修力, 等. 混凝土材料真实动态强度及率效应机理研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(6): 58-67. (WANG

- Guosheng, LU Dechun, DU Xiuli, et al. Research on the actual dynamic strength and the rate effect mechanisms for concrete materials[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [9] 施士升. 冻融循环对混凝土力学性能的影响[J]. *土木工程学报*, 1997, 30(4): 35-42. (SHI Shisheng. Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties of concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1997, 30(4): 35-42. (in Chinese))
- [10] HASAN M, OKUYAMA H, SATO Y, et al. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2004, 2(1): 89-99.
- [11] 邹超英, 赵娟, 梁锋, 等. 冻融作用后混凝土力学性能的衰减规律[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(1): 117-123, 138. (ZOU Chaoying, ZHAO Juan, LIANG Feng, et al. Degradation of mechanical properties of concrete caused by freeze-thaw action[J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(1): 117-123, 138. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(1): 17-23, 32. (CAO Dafu, FU Lizhi, YANG Zhongwei, et al. Study on constitutive relations of compressed concrete subjected to action of freezing-thawing cycles[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(1): 17-23, 32. (in Chinese))
- [14] 田威, 邢凯, 谢永利. 冻融环境下混凝土损伤劣化机制的力学试验研究[J]. *实验力学*, 2015, 30(3): 299-304. (TIAN Wei, XING Kai, XIE Yongli. Experimental study of damage degradation mechanism of concrete in freeze-thaw environment[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(3): 299-304. (in Chinese))
- [15] 田威, 谢永利, 党发宁. 冻融环境下混凝土力学性能试验及损伤演化[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(4): 38-44. (TIAN Wei, XIE Yongli, DANG Fanning. Experimental study on the mechanical property and damage evolution of concrete under freeze-thaw environment[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(4): 38-44. (in Chinese))
- [16] 田威, 韩女, 张鹏坤. 混凝土冻融循环下动态破损机理的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(8): 79-85. (TIAN Wei, HAN Nü, ZHANG Pengkun. Experimental study on the dynamic damage mechanism of concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(8): 79-85. (in Chinese))
- [17] 徐媛媛, 彭刚, 王乾峰, 等. 真三轴应力下混凝土的动态力学性能及破坏准则[J]. *水利水电工程学报*, 2021(1): 133-141. (XU Yuanyuan, PENG Gang, WANG Qianfeng, et al. Dynamic mechanical properties and failure criteria of concrete under true triaxial stress[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(1): 133-141. (in Chinese))
- [18] ZHANG C H, WANG G L, WANG S M, et al. Experimental tests of rolled compacted concrete and nonlinear fracture analysis of rolled compacted concrete dams[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(2): 108-115.
- [19] 王怀亮, 宋玉普. 多轴应力条件下碾压混凝土层面抗剪强度试验研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(9): 1095-1101, 1109. (WANG Huailiang, SONG Yupu. Mechanical properties of roller compacted concrete under multiaxial stress state[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(9): 1095-1101, 1109. (in Chinese))
- [20] 王怀亮, 闻伟. 碾压混凝土单轴动态力学性能研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(4): 155-160, 167. (WANG Huailiang, WEN Wei. Dynamic mechanical properties of RCC under uniaxial stress[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(4): 155-160, 167. (in Chinese))
- [21] 张社荣, 宋冉, 王超, 等. 碾压混凝土的动态力学特性分析及损伤演化本构模型建立[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(1): 130-138. (ZHANG Sherong, SONG Ran, WANG Chao, et al. Dynamic mechanical property analysis of roller compacted concrete and damage constitutive model establishment[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(1): 130-138. (in Chinese))
- [22] SARGIN M, GHOSH S K, HANDA V K. Effects of lateral reinforcement upon the strength and deformation properties of concrete[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1971, 23(75/76): 99-110.
- [23] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982, 3(1): 1-12. (GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. Experimental investigation of the complete stress-strain curve of concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 1982, 3(1): 1-12. (in Chinese))

Research on the uniaxial compressive behavior of hydraulic roller compacted concrete subjected to freeze-thaw cycles

SUN Chaowei¹, CHEN Xingzhou², CHAI Junrui³, WEI Tianlin⁴, MA Bin⁴

(1. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: In order to study the effect of freeze-thaw cycles and loading strain rate on the compressive behavior of hydraulic roller compacted concrete, actual mix design and construction technology of hydraulic concrete dam project was considered to prepare specimens, and the freeze-thaw tests with various cycles (0, 25, 50, 75) and dynamic uniaxial compressive tests with different loading strain rates ($10^{-5}/s$, $10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$, $10^{-2}/s$) were conducted for roller compacted concrete. The freeze-thaw appearance and failure mode subjected to dynamic uniaxial compressive loading and freeze-thaw cycles were analyzed. The effects of freeze-thaw cycles and strain rates on uniaxial compressive strength, peak strain and stress-strain curves were studied, and the corresponding relationship was established based on multiple regression analysis method. The results show that the compressive strength increases linearly with the increasing strain rates and reduces with the increasing freeze-thaw cycles in accordance with two-polynomial relation. The peak strain reduces with the increasing strain rates in accordance with two-polynomial relation, and increases with the increasing strain rates in accordance with two-polynomial relation. By comparing the theoretical stress-strain curves obtained from the constitutive model with the experimental curves, it is revealed that they are in good agreement with the studied range of strain rates and freeze-thaw cycles.

Key words: roller compacted concrete; dynamic mechanical property; freeze-thaw cycles; loading strain rate; complete stress-strain curve