

寒区无砟轨道机制砂混凝土疲劳性能

温家馨^{1,2,3}, 李化建^{2,3}, 石贺男^{1,2,3}, 董昊良^{1,2,3}, 黄法礼^{2,3}, 王 振^{2,3}, 杨志强^{2,3}, 易忠来^{2,3}

(1. 中国铁道科学研究院研修学院, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要:为揭示寒区高铁无砟轨道混凝土在冻融循环环境和列车疲劳荷载下的服役性能变化规律,建立了“冻融循环+高频疲劳”的试验制度,以 C60 无砟轨道轨道板机制砂混凝土为研究对象,从损伤过程与能量传递的角度研究了冻融与疲劳耦合作用下的混凝土损伤机理,预测了寒区无砟轨道机制砂混凝土的疲劳寿命。结果表明,高速列车疲劳荷载会加剧无砟轨道混凝土的冻融损伤,混凝土在冻融循环 300 次后损伤加剧,其力学性能与疲劳性能均表现出加速下降的规律,600 次冻融循环后疲劳寿命降低 46.3%,刚度衰减幅度增加 12.9%,冻融循环造成的缺陷连通是混凝土疲劳性能衰减的主要原因。混凝土主要通过变形所产生的变形能来耗散能量,冻融循环导致最大应变降低与残余应变增大使得混凝土变形性能降低。与常温下的疲劳性能相比,冻结阶段混凝土孔隙内冰有增强作用,且冻结状态下冰能加速内能耗散,因此疲劳损伤情况有所缓解。采用两参数 Weibull 函数对冻融破坏概率进行分析,建立了考虑疲劳损伤因子的混凝土“冻融+疲劳”服役状态下的寿命分析模型,预测了无砟轨道机制砂混凝土的服役寿命。

关键词:无砟轨道; 机制砂混凝土; 冻融循环; 弯曲疲劳; 演化机理; 寿命预测

中图分类号: U214.18 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3383-11

网络出版时间: 2024-08-22



截至 2023 年底,中国高速铁路的运营里程已达 4.5 万 km,列车的最高运营时速已达 350 km/h。高铁跨越范围广、条带状的分布及露天服役特征使得无砟轨道混凝土不仅直接承受列车荷载,同时在高纬度寒区、高海拔山区等严寒或寒冷地区还面临着冻融破坏,这对无砟轨道混凝土的服役性能提出了严峻的考验。目前《铁路混凝土结构耐久性设计规范》(TB 10005—2010)^[1]以环境气温、饱水状态、离子侵蚀为依据对铁路混凝土冻融环境进行划分,当最冷月平均气温低于 -8°C 时,铁路混凝土将发生严重的冻融破坏;当最冷月平均气温在 0°C 左右时,铁路混凝土可能发生冻融破坏。但目前标准未考虑高速列车疲劳荷载与冻融循环耦合作用对混凝土服役性能的影响^[2]。

在服役过程中,环境作用与列车荷载的耦合作用在微观和宏观层面对无砟轨道混凝土产生了显著

影响,劣化过程大致分为 2 种类型:混凝土抗冻性的急剧劣化和主要疲劳裂纹的不稳定扩展^[3]。当发生正负温度交替的冻融环境后,水分在低温条件下结冰膨胀导致混凝土微结构产生损伤^[4]。此外,无砟轨道承受的疲劳荷载显著加速了混凝土内缺陷的产生与连通速度,宏观表现为混凝土承载能力会随疲劳加载的进行而下降^[5]。针对荷载历史对混凝土抗冻性的影响^[6]以及冻融损伤对混凝土疲劳性能^[7]的研究表明,冻融循环后的混凝土更容易发生疲劳损伤。Li 等^[8]的研究表明,疲劳荷载增加了微裂纹的数量,而冻融循环增加了微裂缝的宽度。此外,方志等^[9]研究表明,在 -10°C 的作用下,UHPC 中钢纤维性能的下降导致了疲劳性能的降低。Yi 等^[10]研究了冻融和动态荷载作用对全级配混凝土性能的影响,并建立了考虑应变速率和冻融循环作用的统一破坏准则。由于耦合作用的加载试验装置设计

收稿日期: 2024-04-19。 修订日期: 2024-06-12。

基金项目: 2021 年腾讯基金会科学探索奖; 中国铁道科学研究院科研开发项目(2023YJ229)。

第一作者: 温家馨(1995),男,博士研究生。

通信作者: 李化建(1976),男,博士,研究员。

Received date: 2024-04-19. Revised date: 2024-06-12.

First author: WEN Jiaxin (1995-), male, Doctoral candidate.

E-mail: jasonwen_86@163.com

Correspondent author: LI Huajian (1976-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: chinasailor@163.com

复杂，环境与荷载 2 种作用的时间尺度存在差异，因而耦合作用下混凝土性能损伤劣化过程的试验研究相对较少，且多集中在静荷载与环境因素的耦合作用^[11]。至于疲劳荷载与环境因素耦合作用的研究报道就更少，且多以间接交替的作用方式来进行研究^[12–13]。此外，高速列车运行过程中，导致混凝土发生破坏的弯曲疲劳荷载频率超过 20 Hz^[14]，与目前疲劳试验中常用不超过 10 Hz 的试验制度存在较大差异^[15]。

由于不同岩性、不同石粉含量机制砂混凝土动态疲劳性能演变规律不明，无砟轨道轨道板的标准中限制使用机制砂，但受河砂限采禁采政策的实施，机制砂替代河砂制备轨道板混凝土势在必行。此外，作为直接承受高速列车疲劳荷载的承载体，无砟轨道混凝土还需要在服役年限内承受上亿次高频疲劳荷载，但现有研究大多仅集中在机制砂混凝土的抗

冻性上，缺乏针对冻融–疲劳耦合的相关研究^[16–17]，限制了机制砂在混凝土的推广应用。

为更真实反映寒区无砟轨道的实际服役情况，设计了“冻融循环与 20 Hz 疲劳荷载”的耦合试验制度，从力学性能、疲劳寿命、刚度分析了冻融循环对机制砂混凝土性能的影响规律，并将冻融循环分为冻结与溶解 2 个阶段，分析其损伤特点与能量传递规律，从概率学角度建立冻融+疲劳耦合作用下的寿命预测模型，以预测寒区无砟轨道混凝土的服役寿命。

1 实验

1.1 材料

水泥：北京金隅集团有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其化学组成及主要性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 水泥化学组成

Table 1 Chemical composition of cement

w/%

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Loss on ignition
57.68	21.62	6.11	3.23	3.32	2.39	0.22	0.56	2.97

w is mass fraction.

表 2 水泥主要性能

Table 2 Main properties of cement

Density/ (g·cm ⁻³)	Specific surface area/ (m ² ·kg ⁻¹)	Stability	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
			Initial setting	Final setting	3 d	28 d	3 d	28 d
3.08	364	Qualified	165	235	6.2	8.9	28.3	54.6

粉煤灰：元宝山电厂 F 类 I 级粉煤灰，密度为 2.25 g/cm³，主要性能如表 3 所示。

表 3 粉煤灰主要性能

Table 3 Main properties of fly ash

Item	Result
45 μm sieve residue/%	6.0
Water demand ratio/%	93
Loss on ignition/%	3.97
Water content/%	0.1
Mass fraction of SO ₃ /%	0.41
Mass fraction of f-CaO/%	0.03
28 d activity index/%	78.1

矿渣粉：河北唐山唐龙新型建材有限公司生产

的 S95 级矿渣粉，密度为 2.81 g/cm³。

骨料：细骨料为细度模数 2.8、石粉含量为 5%、级配 II 区的凝灰岩机制砂；粗骨料为 5~10 mm、10~20 mm 连续级配石灰岩碎石。

减水剂：聚羧酸系高性能减水剂，减水率 27%，固含量 40%。

拌合水：自来水，符合混凝土拌和用水的规定。

1.2 配合比

设计水胶比为 0.27 的 C60 混凝土，配合比如表 4 所示。控制新拌混凝土坍落度为(160±20) mm，含气量为(3%±1%)。搅拌成型后置于温度(20±5) °C 的室内养护 24 h，拆模后将混凝土试件置于标准养护条件下养护至规定龄期。

表 4 混凝土配合比

Table 4 Concrete mix proportion

kg/m³

Sample No.	Cementitious materials	Cement	Fly ash	Slag	Water	Manufactured sand	5–10 mm crushed stone	10–20 mm crushed stone	Water reducer
C60	480	408	24	48	130	734	771	330	2.4

1.3 方法

静态力学性能试验: 按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测试混凝土抗压强度、抗折强度和静态弹性模量, 每组 3 块试件。试验测得 C60 混凝土 28 d 龄期抗压强度分别为 68.9 MPa, 抗折强度分别为 6.4 MPa, 静态弹性模量为 42.3 GPa。

疲劳试验: 采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 SUNS-890 电液伺服动静万能试验机进行弯曲疲劳试验。每组疲劳试验选用 5 块试件以保证实验准确性, 试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm, 应力水平(应力上限 $f_{\max}$ /抗折强度 f_t)固定为 0.6, 应力(应力上限 $f_{\min}$ /峰值应力 $f_{\max}$)比为 0.1, 加载频率为 20 Hz, 加载同时读取加载端位移数据, 并根据图 1 与式(1)计算混凝土的疲劳刚度:

$$E_s = E_n / E_0 \quad (1)$$

式中: E_s 为刚度; E_0 为第 1 次循环(初始)的瞬时动态模量(GPa); E_n 为第 n 次疲劳加载后的瞬时动态模量(GPa)。

冻融循环试验: 根据标准《普通混凝土长期性能和耐久性方法》(GB/T 50082—2009)进行, 并测试其动弹模量及质量损失情况。

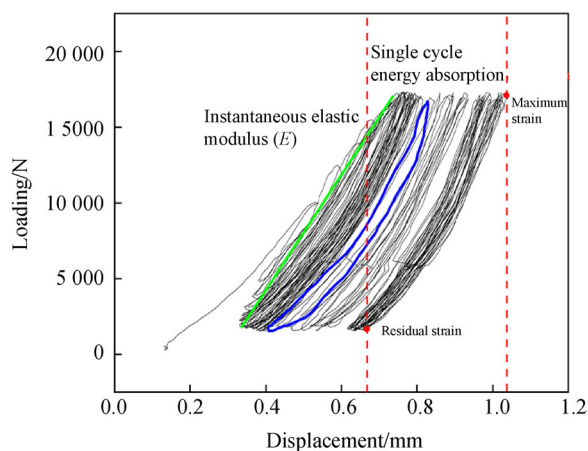


图 1 疲劳加载典型荷载-位移曲线

Fig. 1 Typical load displacement curves under fatigue loading

冻融循环+疲劳荷载耦合加载制度: 由于冻融循环的时间与疲劳加载的时间尺度相差大, 无法实现真正意义上的耦合试验。冻融循环导致的混凝土内部损伤与表面缺陷均导致混凝土在疲劳荷载的作用下更容易发生脆性破坏, 因此结合实际服役特点, 采用“先冻融后疲劳”的试验制度能够较为准确地还原寒区无砟轨道混凝土的耦合损伤特点。混凝土在饱水后进行冻融循环, 冻融循环次数为 0、150、300、450 次和 600 次, 之后进

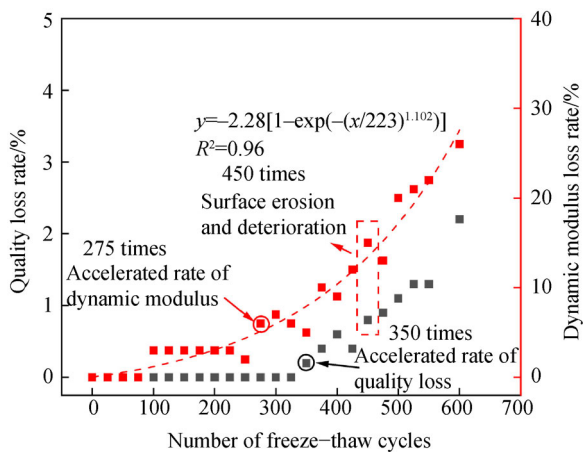
行疲劳试验。

不同温度下混凝土疲劳性能试验: 寒区无砟轨道混凝土结构承受着高速列车疲劳荷载和冻融破坏的耦合作用, 但混凝土承受一次冻融循环的时间为数个小时, 而列车通过时间仅为数秒到数十秒, 单次疲劳循环仅为几十毫秒, 且在冻融循环过程中列车周期性通过, 疲劳荷载不会持续作用, 这导致疲劳荷载仅发生在“冻结”或“融化”某个单一阶段。为分析不同阶段混凝土性能的演化规律, 将混凝土冻融循环分为冻结(-20 °C)与融化(0 °C 和 20 °C)2 个阶段, 在饱水后将试件放置在 -20、0 °C 和 20 °C 进行弯曲疲劳试验。同时, 为分析很恒定温度下混凝土疲劳荷载导致的温升情况, 在混凝土侧面每 25 mm 取一测量点, 在加载过程中采用测温设备测量其温度。

2 结果与讨论

2.1 冻融循环后混凝土性能

2.1.1 冻融损伤 图 2 为冻融循环后混凝土的损伤情况。由图 2 可见, 在冻融次数小于 300 次时其质量损失与动弹模变化均较小, 此时混凝土并未发生明显损伤, 而随着冻融次数增加, 动弹模因混凝土内损伤持续累积而下降, 质量因剥落而下降, 混凝土表面出现损伤。由于无砟轨道混凝土强度为 C60, 混凝土强度等级提高有利于提升冻融损伤的阈值, 冻融循环的累积应力作用需达到较高。当冻融循环次数约为 300 次时, 混凝土损伤速率加快, 相较于动弹模损失, 冻融荷载下混凝土的质量损伤较不敏感; 冻融循环次数达到 450 次后, 其表面开始出现剥蚀劣化; 冻融循环次数达到 600 次后, 最大动弹模损失率达 26.8%, 最大质量损失率为 2.4%, 混凝土表面出现明显的损伤。动弹模与质量均呈指数变化, 虽然未到达标准^[14]所规定的“动弹性模量下降到 60%、质量损失率达 5%”的损伤判定标准, 但仍可表明此时混凝土发生了明显的冻融损伤, 且冻融循环次数越多, 损伤程度越明显。王振等^[18]研究表明, 由于高强混凝土基体脆性大, 冻融应力作用的累积能量在达到破坏阈值后使裂纹快速扩展和连接, 所以高强混凝土在短时间内相对动弹模与质量快速降低的“脆性破坏”特征。同时, 文献^[18]表明, 相同强度等级的河砂混凝土的试验结果与机制砂混凝土结果相近, 说明机制砂混凝土与河砂混凝土冻融损伤的过程与抗冻性基本相同。



(a) Quality loss and dynamic modulus loss



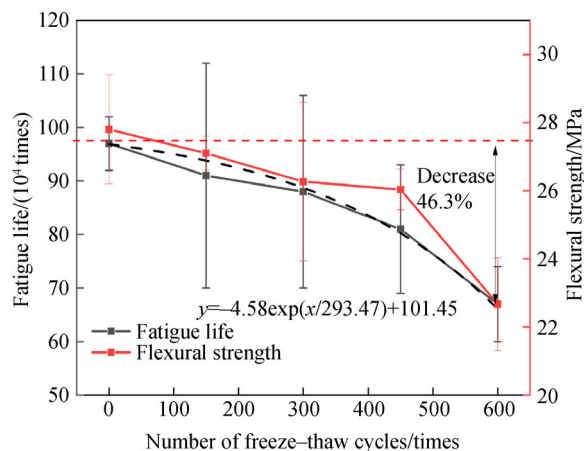
(b) Surface erosion and deterioration of concrete (600 freeze-thaw cycles)

图2 冻融后混凝土损伤情况

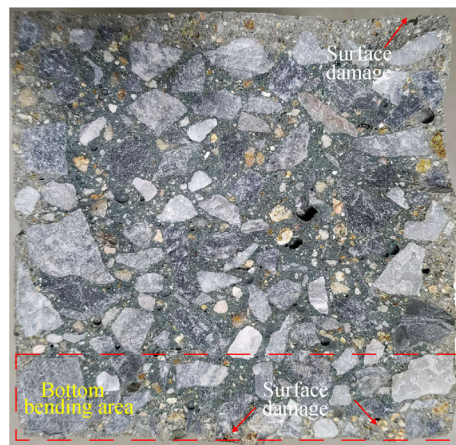
Fig. 2 Concrete damage after freeze-thaw cycles

2.1.2 疲劳性能 图3为冻融后混凝土疲劳损伤情况。由图3a可见,冻融循环降低了混凝土的疲劳性能及抗折强度。在冻融循环次数超过450次后疲劳寿命与抗折强度衰减速度加快。600次冻融循环后,疲劳寿命下降了46.3%,抗折强度在600次冻融循环后下降了18.4%。抗折强度是弯曲疲劳寿命的直接影响因素,混凝土因冻融循环后抗折强度降低会显著影响其疲劳寿命,且抗折强度(f_t)降低可能导致疲劳过程中所受应力水平(应力上限 $f_{\max}$ /峰值应力 f_t)升高,这会进一步降低混凝土的疲劳寿命^[19]。由于冻融循环导致了混凝土损伤持续累积,其力学性能与疲劳性能均持续降低。结合冻融后混凝土损伤情况可知,混凝土冻融次数达300次后损伤开始加速,而冻融循环450次后混凝土疲劳性能与抗折强度的衰减速率加速下降。根据“应变等效原则”,混凝土损伤开始逐步导致有效承载面积有所降低,这就导致其疲劳性能与抗折强度出现加速下降。这也说明在冻融循环造成损伤后,相同服役条件下混凝土的疲劳性能劣化过程加快。此外,混凝土受弯拉处的表面状态对疲劳性能的影响较为显著,当弯曲荷载下的最大拉应力区存在表面缺陷时,产生局部应力集中导致疲劳损伤快速累积,增加了混凝土

发生突然疲劳断裂的可能性^[20],如图4b所示。结合之前的研究^[21]可知,在相同的加载制度下,河砂混凝土与机制砂混凝土寿命相当,说明机制砂混凝土与河砂混凝土疲劳性能相近。



(a) Fatigue life and flexural strength



(b) Fatigue section (600 freeze-thaw cycles + fatigue)

图3 冻融后混凝土疲劳损伤情况

Fig. 3 Fatigue damage of concrete after freeze-thaw cycles

图4为混凝土在疲劳荷载作用下的刚度。由图4可见,混凝土的刚度符合疲劳损伤3阶段的发展规律:第1阶段和第3阶段变化的衰减斜率较大,而第2阶段呈现水平发展的趋势,此时刚度减少为初始刚度的80%左右。冻融450次后混凝土的疲劳刚度有所降低,且刚度衰减速率加快,这与混凝土的疲劳寿命发展规律相同,这说明冻融次数小于300次时导致的混凝土损伤较小。超过300次后,混凝土刚度初始阶段的下降速率与稳定阶段的损伤程度均显著高于未冻融混凝土;在 $N/N_f=0.5$ 时,冻融600次后混凝土刚度损失比未冻融状态的混凝土增加12.9%。综合疲劳寿命、刚度与变形可知,在冻融次数小于300次时,混凝土疲劳性能衰减不明显;但当冻融循环次数较高时会导致疲劳损伤加剧,

疲劳荷载加速了混凝土的性能劣化, 两者耦合作用导致其服役性能加速下降。

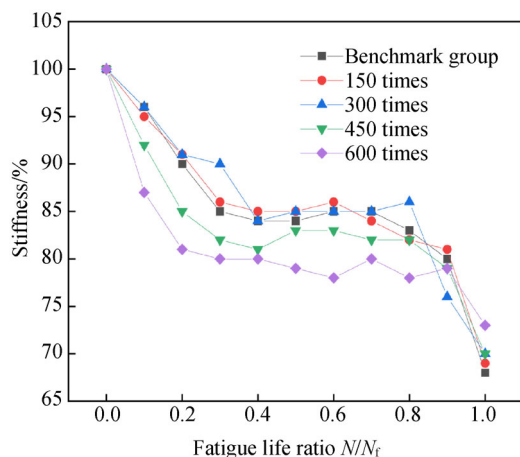


图 4 冻融后混凝土疲劳刚度

Fig. 4 Fatigue stiffness of concrete after freeze-thaw cycles

2.2 “冻融+疲劳”作用下混凝土损伤机理

2.2.1 孔隙结构及孔溶液 图 5 为不同冻融循环下混凝土断面吸水情况。图 6 为冻融循环后混凝土损伤微观形貌。由图 5 可见, 冻融循环次数小于 300 次时断面吸水率保持不变, 而冻融循环达到 300 次后, 混凝土断面吸水率快速增大。由图 6 可见, 冻融循环后混凝土微观损伤主要包括: 混凝土内孔径增大导致浆体密实性下降, 如图 6a 所示, 这些缺陷可能导致应力集中从而成为疲劳损伤的起始点; 混凝土浆体出现微裂缝, 如图 6b 与所示, 冰晶体的形成和膨胀会引起浆体内部微裂纹的产生, 疲劳荷载下微裂纹会连通扩展并逐渐连接成较大的裂缝; 同时, 骨料和浆体之间的热膨胀系数差亦会使得两者热变形不协同, 从而在界面过渡区产生应力集中并

诱发微裂缝, 如图 6c 所示。

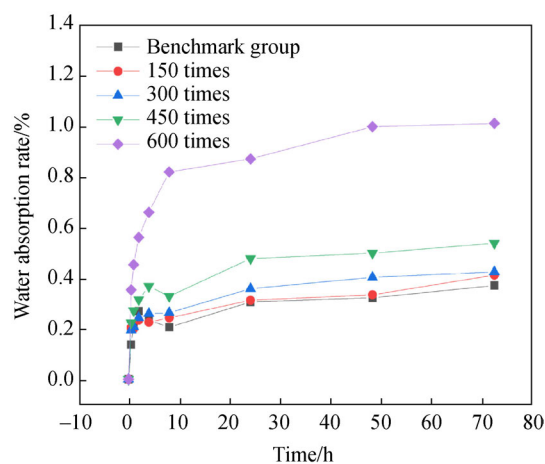


图 5 混凝土断面吸水率

Fig. 5 Water absorption rate of concrete fracture surface

将混凝土微结构损伤过程分为“缺陷形成”与“缺陷贯通”2 个过程, 结合混凝土的疲劳性能衰减规律可知, 冻融循环会导致混凝土内损伤出现, 且在循环作用下损伤逐步连通, 强度和弹性模量逐步下降, 这显著影响了混凝土的疲劳性能。冻融循环初期(循环次数小于 300 次)对应“缺陷形成”阶段, 此时缺陷主要以界面结合区等薄弱部位形成的孔为主, 且缺陷并未连通, 如图 6a 所示。因此混凝土的吸水率变化不大, 此时混凝土疲劳性能因浆体性能的下降而略微降低。在冻融循环造成损伤(循环次数超过 300 次)后, 浆体会形成连裂纹状缺陷, 如图 6b~图 6c 所示, 对应“缺陷贯通”阶段。此时混凝土吸水率会显著增大, 且裂缝更为尖锐的形貌使得应力更容易在裂缝状缺陷的尖端集中^[21], 使得混凝土在疲劳荷载下的性能衰减速率加快。

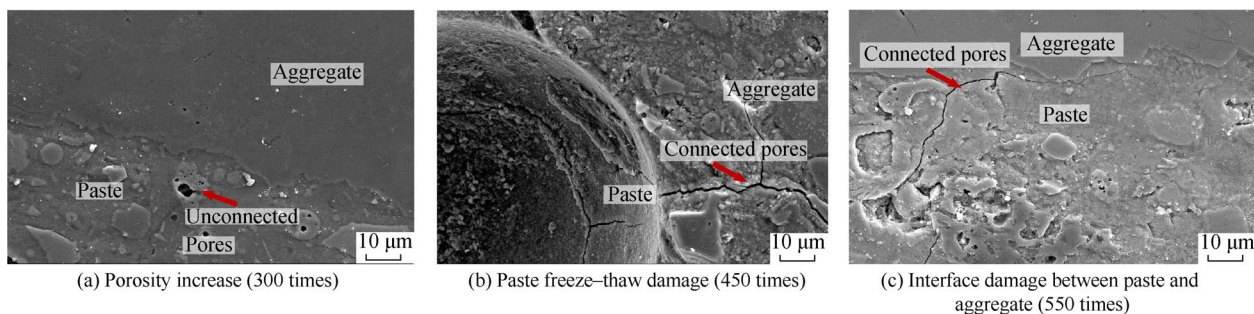


图 6 冻融循环后混凝土损伤微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of concrete damage after freeze-thaw cycles

为分析不同冻融阶段下混凝土疲劳性能的劣化规律, 结合标准^[14]中的冻融循环温度, 对恒定在 -20 、 0 °C 和 20 °C 3 个温度下饱水混凝土进行弯曲疲劳性能试验, 疲劳寿命如图 7 所示。由图 7 可见, 20 °C 与 0 °C 混凝土的抗折强度与疲劳寿命相近, 但

-20 °C 的混凝土抗折强度比 20 °C 时提升了 8.8%, 疲劳寿命提升了 60.0%。在低温作用下混凝土内的孔隙被凝结的冰充填密实, 其损伤情况反而得到了缓解, 抗折强度与疲劳性能随之增强。混凝土力学性能与疲劳性能受其内部冰的凝结和融化影响, 在冻

结阶段下混凝土疲劳性能会有所提升, 在融化状态时对混凝土疲劳性能的影响较小。

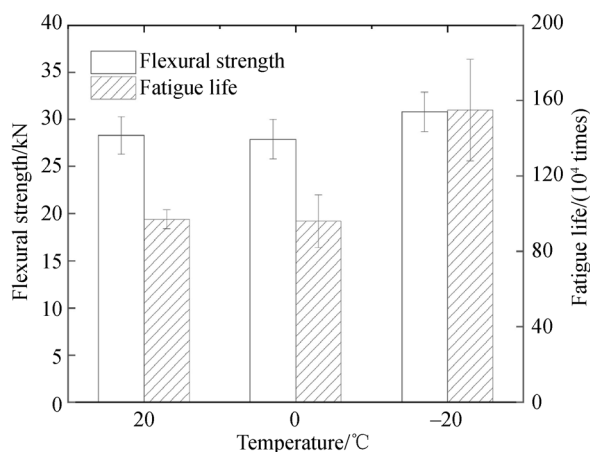


图7 不同温度下的混凝土疲劳寿命

Fig. 7 Fatigue life of concrete at different temperatures

疲劳荷载使得孔隙产生张开与闭合的周期性变化, 主要产生轴向应力与切向剪应力^[22], 而冻融过程中冰晶体不断形成和膨胀, 这都将导致混凝土内缺陷的产生和扩展。根据这一理论, 提出冻融循环与弯曲疲劳加载耦合作用的模型, 如图8所示。由于试验在饱水状态下进行, 因此假定混凝土内孔隙始终被水或冰完全填充。当处于完全冻结状态时(见图8a), 在疲劳受拉区的混凝土最大应力产生于在轴向膨胀与切向抗剪的方向, 此时冰在混凝土中主要起到: 1) 填充与粘结效应: 在完全冷状态下, 混凝土宏观孔、微孔及凝胶孔内水分被冻结成冰并填充内部孔隙, 冰与基体粘结强度的提高也会极大强化微结构的密实程度^[23], 同时冰的填充效应使裂缝尖端钝化^[8], 这些因

素均降低了混凝土内裂缝张开与相对位移的应力。

2) 力学性能提升效应: 冰的强度与弹性模量会随温度的降低而增加, 当温度为-20 °C时, 其最高抗压强度约为6 MPa, 最大拉应力可达2 MPa, 最大弹性模量约为4 GPa^[24], 且在-60~0 °C时均体现出韧性破坏的特点^[25]。与液体状态相比, 固态冰在孔隙中起到了增强相的作用, 使得混凝土力学性能与疲劳性能有所提升。3) 预应力效应: 在持续低温作用下, 冰的膨胀应力引发的预应力作用会进一步提升基体强度^[26], 疲劳性能也随之提升。在3种作用的综合影响下, 混凝土内裂缝的张开与剪切位移均因冰的增强作用而有所缓解, 因此在冻结状态下的混凝土疲劳寿命反而有所提升。与之相对的, 当处于融化状态时(见图8b), 混凝土孔隙内冰水混合物依旧存在液压平衡轴向作用, 其最大轴向应力可达2.5 MPa^[22], 但由于液体水与基体的粘接强度远低于冰与基体的粘接强度, 无法平衡切向应力, 因此界面切向位移更明显。此外, 每个加载循环对水分的挤压效应会进一步加剧混凝土损伤, 且由于泵吸效应水分回吸至孔隙, 这会使得下一次循环中导致的应力更为显著, 混凝土内的缺陷会加速连通, 这进一步导致了混凝土抗冻性能降低。这一模型明确了在冻结与融化2阶段下混凝土的疲劳性能的变化规律, 与冻融循环初期(循环次数小于300次)的寿命变化规律相符。但在冻融循环造成损伤(循环次数超过300次)后, 混凝土疲劳寿命快速降低, 这是因为冰在混凝土内含量较少, 其增强效应有限, 冻融循环下孔隙结构劣化依旧是其疲劳性能劣化的主要因素。

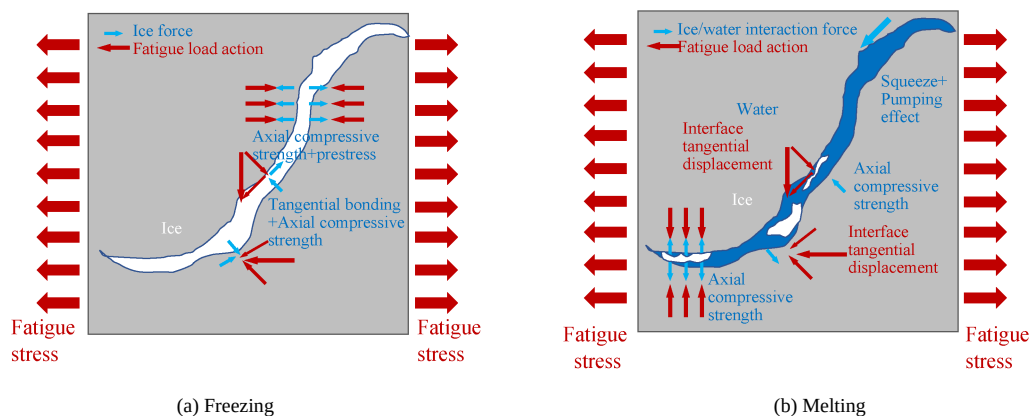


图8 冻融-疲劳破坏耦合模型

Fig. 8 Freeze-thaw fatigue failure coupling model

2.2.2 能量传递 疲劳加载过程中混凝土吸能能力可根据荷载-位移曲线所围成的面积进行计算(见图1), 即单次循环吸能, 这反映了混凝土在疲劳加载过程中的能量传递本质, 吸能能力越强越有利于

将疲劳荷载所输入的能量耗散, 疲劳寿命越长。由于疲劳加载的第2阶段是能量吸收的主要阶段, 因此以疲劳加载第2阶段末的单次循环吸能水平评价混凝土的吸能能力^[27]。图9为冻融循环后混凝土的

吸能情况。由图 9 可见, 在冻融循环次数达到 300 次后开始下降, 在冻融 450 次后混凝土的吸能能力比未冻融的吸能能力下降 12.2%, 冻融 600 次后混凝土的吸能能力下降了 25.7%, 且其吸能能力呈现加速下降的趋势。

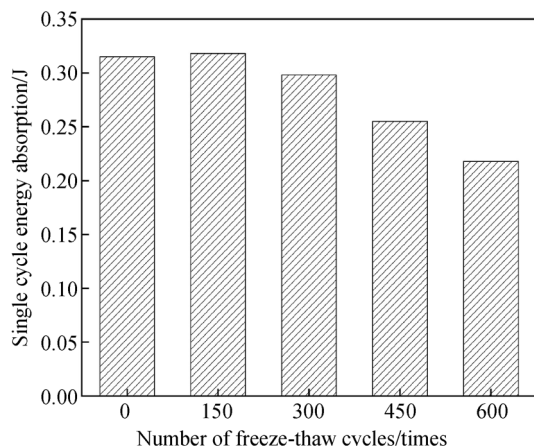


图 9 混凝土吸能能力

Fig. 9 Concrete energy absorption capacity

将能量分为机械能与内能, 混凝土所吸收与耗散的能量可以根据式(2)计算:

$$E_{\text{输入}} = E_{\text{变形}} + E_{\text{温升}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{输入}}$ 为疲劳荷载下混凝土吸收能量; $E_{\text{变形}}$ 为通过变形所耗散的能量, 对应能量传递过程中的机械能; $E_{\text{温升}}$ 为通过温升耗散的能量, 对应能量传递过程中的内能。

疲劳加载过程中, 单次循环所围成的面积主要由循环上限(最大应变)与循环下限(残余应变)所共同决定, 因此可以通过分析混凝土的变形情况明确吸能能力的衰减机理。图 10 为冻融循环后混凝土的最大应变与残余应变。由图 10 可见: 最大应变随冻融循环次数增加而降低, 当冻融 600 次后混凝土的峰值变形下降了 21.1%; 残余应变随冻融循环次数增加而升高, 当冻融 600 次后混凝土的残余变形下降了 15.4%。疲劳荷载使得混凝土发生周期性变形, 从机械能角度分析可知, 变形决定了在疲劳加载中混凝土的变性能 $E_{\text{变形}}$, 其中最大应变的变化程度比残余变形更明显, 最大应变的降低是变性能 $E_{\text{变形}}$ 衰减的主要因素。此外, 残余应变反映了在荷载后不可恢复的变形, 残余应变的增大进一步导致了变性能 $E_{\text{变形}}$ 的衰减。在疲劳荷载超过 300 次后, 2 种应变均呈现逐步加速的特点, 这与吸能能力变化规律相符, 这表明在冻融循环的作用下, 混凝土内微结构缺陷逐步累积发展, 其机械能逐步降低, 混凝土吸能能力呈现出加速损伤的特点, 疲劳性能也随之降低。

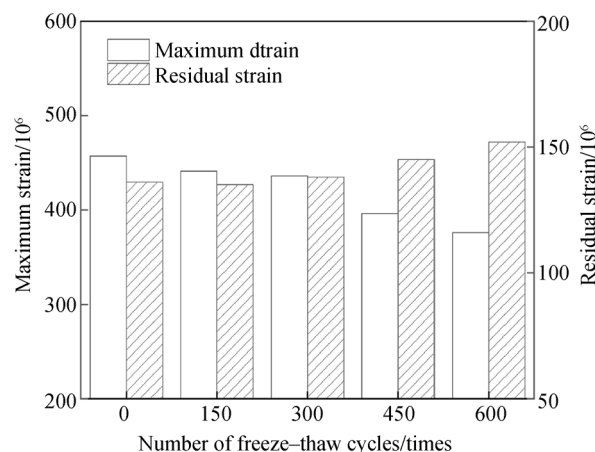


图 10 冻融循环后混凝土最大应变与残余应变

Fig. 10 Maximum strain and residual strain of concrete after freeze-thaw cycles

为进一步分析疲劳荷载下的能量传递过程, 采用测温设备采集冻结($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)与融化($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$)2个阶段时混凝土表面的温度变化情况, 图 11 为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3个恒定温度下疲劳加载过程中混凝土的温度云图。由图 11 可见, 在疲劳加载过程中温度会产生倒三角形的温升区域, 最高温度点在底部受拉区, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时疲劳荷载导致其温度上升 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时温度上升 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时温度上升 $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 结合图 7 不同温度下的疲劳寿命可知, 在加载制度不变, 即 $E_{\text{输入}}$ 不变的情况下, 疲劳加载过程中混凝土的温升是主要由于微结构摩擦等因素产生, 加载过程中的温升越高 $E_{\text{温升}}$ 越大, 混凝土内能越大, $E_{\text{变形}}$ 越小, 这会对混凝土疲劳性能产生不利影响。此外, 在混凝土处于冻结状态($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, 冻结的冰可以填充孔隙, 减少了内摩擦导致的温升, 同时内能还可以通过冰的融化与低温环境耗散, 说明低温冻结状态有利于疲劳内能的耗散, 有助于混凝土疲劳性能的提升。当温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 加载区域的温度始终处于冰点上, 孔隙内的水分始终以液态存在, 此时疲劳性能与常温下的疲劳性能基本无差异。

由能量守恒定律可知, 在相同加载制度下式(2)中疲劳荷载输入的能量 $E_{\text{输入}}$ 保持不变, 即 $E_{\text{变形}}$ 与 $E_{\text{温升}}$ 的总量不变, 其中 $E_{\text{变形}}$ 越大越有利于混凝土吸收能量, 疲劳性能越好, 是决定吸能能力的主要因素, $E_{\text{温升}}$ 则会对疲劳性能产生不利影响。在当处于冻融循环初期(循环次数小于 300 次)时, 混凝土处于“缺陷形成”阶段, 此时混凝土 $E_{\text{变形}}$ 变化不显著, 因此吸能能力与疲劳寿命变化不大。当在冻融循环造成损伤(循环次数超过 300 次)后, 混凝土处于“缺陷贯通”阶段, 最大应变降低与残余应变增大

使得 $E_{\text{变形}}$ 快速衰减, 这导致吸能能力与疲劳寿命快速下降。混凝土微结构的摩擦会加速缺陷发展, 体现为混凝土温度上升, $E_{\text{温升}}$ 越大混凝土疲劳寿命越短。虽然冻结状态下冰的增强作用能缓解疲劳荷载导致的损伤从而降低 $E_{\text{温升}}$, 但由于冰在混凝土内含量较少, 因此吸能能力与疲劳寿命依旧呈现加速下降的趋势。

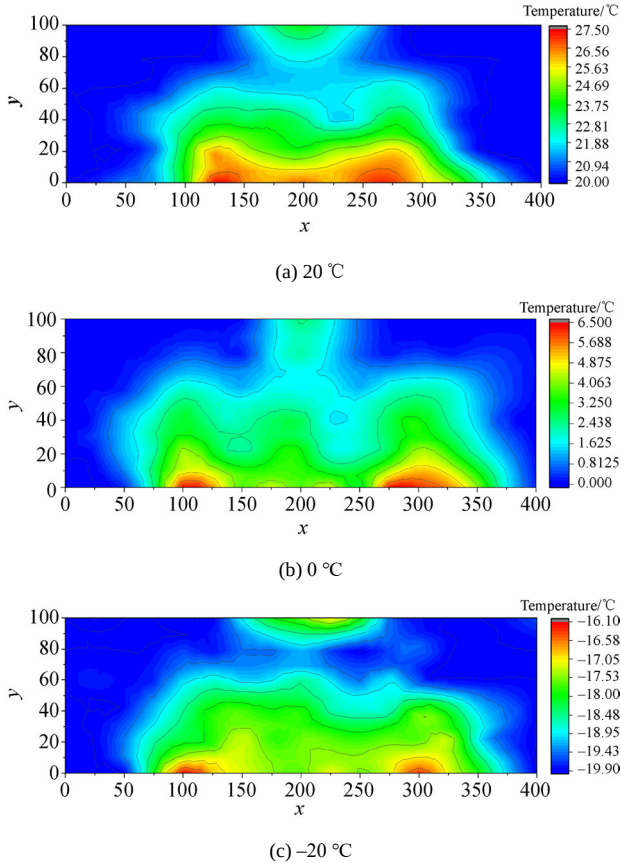


图 11 疲劳加载过程中混凝土的温升云图

Fig. 11 Temperature cloud diagram of concrete during fatigue loading process

3 “冻融+疲劳”作用下混凝土寿命预测模型

混凝土“冻融+疲劳”本质上是损伤随机累积的过程, 为反映损伤累积过程的随机性与疲劳寿命概率分布的数据特征, 目前常采用 Weibull 概率分布模型。本工作采用双参数 Weibull 概率分布对混凝土“冻融+疲劳”寿命与损伤进行分析。混凝土冻融破坏的概率如式(3):

$$P_f = \int f_{\Delta}(\delta) d\delta \quad (3)$$

式中: P_f 为混凝土破坏概率; $f_{\Delta}(\delta)$ 为温差影响的参数, 与随机变量 n 的分布函数有关。

在此基础上, 可推导出冻融循环后混凝土使用

寿命 N 的密度函数, 如式(4)所示。

$$f_N = \left(\frac{N}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{N}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (4)$$

式中: f_N 为 n 次冻融循环后的概率密度函数; η 为寿命特征参数; β 为 Weibull 形状参数。

将上式两边同时积分, 得到其冻融寿命的概率累积函数:

$$F_N = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (5)$$

式中: F_N 为混凝土经过 n 次冻融循环后的破坏概率; 由于弹性模量损伤能够从宏观角度体现混凝土承载性能的下降, 从微观角度体现出混凝土内损伤逐步累积的特点, 因此规定 $F_N = D_N$, 即破坏概率等于破坏程度。本工作采用动弹模量定义的损伤变量 D_N 来表示混凝土的破坏程度, 则 D_N 可表示为:

$$D_N = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (6)$$

结合图 2 可知, $\beta=1.102$, $\eta=223$ 。为考虑疲劳荷载的损伤效果, 结合线性损伤理论引入疲劳损伤因子 α , 可得:

$$D'_N = (1 + \alpha) D_N \quad (7)$$

$$\alpha = 0.07 \exp\left(\frac{n}{285.98}\right) \quad (8)$$

式中: D'_N 为考虑疲劳后的损伤变量; D_N 为未考虑疲劳荷载的损伤变量; α 为疲劳损伤因子。

两边同时取 2 次对数, 可得:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{1-D_N}\right) = \beta \ln\left(\frac{1}{\eta}\right) + \beta \ln(n) \quad (9)$$

$$\text{令: } Y = \ln\left(\ln\frac{1}{1-D_N}\right), X = \ln(n), A = \ln\left(\frac{1}{\eta}\right)$$

则式(8)可表示为:

$$Y = \beta A + \beta X \quad (10)$$

式(9)与动弹模量拟合后发现拟合系数 R^2 为 0.96, 证明混凝土“冻融+疲劳”寿命符合两参数 Weibull 函数分布。标准[14]中规定, 动弹模量损失达 40%即发生冻融损伤, 但相关研究表明^[19], 在动弹模损伤达到 20%后混凝土力学性能已有明显损伤, 且结合图 4a 可知, 动弹模量损失达 25%后, 混凝土发生不稳定脆性断裂的可能性激增。因此, 规定损伤变量达到 0.25 时为混凝土“冻融+疲劳”破坏的临界值。将 $D_N=0.25$, $D'_N=0.25$ 分别带入式(5)和式(6), 可得 $N=644$ 和 $N'=412$, 即在不考虑疲劳荷载时, 无砟轨道机制砂混凝土在实验室可承受 644 次冻融循环, 在考虑冻融与疲劳的耦合效应下, 无砟轨道机制砂混凝土可承受 412 次循环荷载, 这

与相关研究的结果相近^[18]。

建立室内快速冻融循环次数与室外实际冻融次数的关系如式(10)所示：

$$M = KN \quad (11)$$

式中： M 为实际服役次数； K 为快速冻融试验系数，即一个室内快速冻融循环相当于室外自然冻融循环次数的比例，一般取 10~15^[28]，本工作取 $K=13$ 。

将试验结果带入可得，在不承受疲劳荷载的情况下，无砟轨道机制砂混凝土可承受 8 372 次室外冻融循环，而在承受疲劳荷载的情况下，可承受 5 356 次冻融循环。

工程实践表明，高速铁路无砟轨道平面结构混凝土如道床板、底座板、支承层等在严寒、寒冷以及高原地区容易出现冻融破坏，且疲劳荷载会显著加剧混凝土劣化^[29]。通过对以日平均最低温、冻融循环次数等参数对冻融环境进行定量划分是目前主要的划分方法。标准[1]提出考虑年日最低气温

的冻融环境划分方法，在此基础上，结合年冻融循环次数和日最低气温^[30]，形成了“冻融+疲劳”作用下的冻融环境划分与服役寿命预测模型，预测结果如表 5 所示，发现冻融与疲劳的耦合作用显著加速了混凝土的劣化损伤。以机制砂制备的无砟轨道混凝土基本满足单独考虑冻融循环作用的设计需求，且由于机制砂混凝土与河砂混凝土抗冻性能与疲劳性能相近，因此采用机制砂替代河砂是可行的。但在列车疲劳荷载耦合作用下，无砟轨道混凝土的疲劳寿命显著降低。以我国冻融情况显著的西北地区(寒冷、少冻)为例，年平均冻融次数为 120 次^[31]，其冻融循环寿命为 69.7 年，满足无砟轨道的设计要求，但当存在高频疲劳荷载时，其服役寿命会骤减至 44.6 年，应引起足够的重视。D3~D4 环境等级下，无论是机制砂混凝土还是河砂混凝土，均有潜在无法满足设计使用寿命的风险，应加强服役后期的检查和维护。

表 5 基于年冻融循环次数与日最低气温的冻融环境划分与服役寿命预测^[30]

Table 5 Classification and prediction of service life based on annual freeze-thaw cycles and daily minimum temperature^[30]

Level	Daily minimum temperature/℃	Annual freeze-thaw cycles	Environmental regional characteristics	Freeze-thaw cycle life/year	Freeze thaw+fatigue life/year
D1	$0 \geq t > -2.5$	$N \leq 50$	Accidental freezing	167.4	107.1
D2	$-3.0 \geq t > -2.5$	$N \leq 80$	Slight freezing	104.6	66.9
D3	$-8.0 \geq t > -3.0$	$N \leq 120$	Cold	69.7	44.6
D4	$t \leq -8.0$	$N \leq 140$	Severe cold	59.8	38.3

4 结论

针对我国寒区高速铁路无砟轨道混凝土结构服役情况，建立了冻融与疲劳耦合的试验制度，提出了耦合作用下的混凝土疲劳寿命预测方法，得出以下结论：

1) 无砟轨道混凝土在冻融循环初期(冻融循环次数<300 次)时基本无损伤，冻融循环 300 次后出现加速损伤的脆性破坏特点，抗折强度与疲劳性能也出现冻融循环次数超过 300 次后加速下降的趋势，600 次冻融循环后疲劳寿命降低 46.3%，刚度衰减增加 12.9%。冻融循环造成的内部与表面缺陷成为疲劳损伤扩展连通的诱发点，同时实际应力水平的提高也使得混凝土更容易发生疲劳断裂。

2) 在冻融循环次数超过 300 次后，冻融循环造成的缺陷连通是混凝土性能衰减的主要因素，此时混凝土断面吸水率升高，疲劳性能加速衰减。从能量角度考虑，加载过程中主要包括变性能与内能，混凝土主要通过变形产生的变形能来耗散能量，冻融循环导致最大应变降低与残余应变增大使得混凝土

土变性能降低，从而对疲劳性能产生不利影响。

3) 将冻融循环看作冻结与融化 2 个阶段，在冻结阶段混凝土孔隙内的冰有填充与粘结效应、力学性能提升效应和预应力效应，因此疲劳性能反而有所提升。此外，冰还能起到缓解内摩擦与加速耗散内能的作用。因此在冻结阶段混凝土的疲劳损伤情况有所缓解。融化阶段孔隙中液体无增强效应，界面切向位移更明显，因此疲劳损伤没有改善作用。

4) 引入疲劳损伤因子，建立了混凝土冻融+疲劳服役状态下的寿命分析模型。结合冻融环境划分依据对不同环境下混凝土寿命进行预测，机制砂混凝土能够满足寒区铁路 D1~D2 环境等级下混凝土的服役需求，应关注 D3~D4 环境等级以及服役后期无砟轨道混凝土的性能。

参考文献:

- [1] TB 10005—2010 铁路混凝土结构耐久性设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [2] 李化建, 谢永江. 我国铁路混凝土结构耐久性研究的进展及发展趋势[J]. 铁道建筑, 2016, 56(2): 1-8.
- LI Huajian, XIE Yongjiang. Railw Eng, 2016, 56(2): 1-8.

- [3] LI D, KAEWUNRUEN S, YOU R L, et al. Fatigue life modelling of railway prestressed concrete sleepers[J]. Structures, 2022, 41: 643–656.
- [4] CAI H, LIU X. Freeze-thaw durability of concrete: Ice formation process in pores[J]. Cem Concr Res, 1998, 28(9): 1281–1287.
- [5] 李士彬, 孙伟. 疲劳、碳化和氯盐作用下混凝土劣化的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(11): 1459–1464.
- LI Shibin, SUN Wei. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(11): 1459–1464.
- [6] HANJARI K Z, UTGENANT P, LUNDGREN K. Experimental study of the material and bond properties of frost-damaged concrete[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(3): 244–254.
- [7] YAN D M, LIN G. Influence of initial static stress on the dynamic properties of concrete[J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(4): 327–333.
- [8] LI W T, SUN W, JIANG J Y. Damage of concrete experiencing flexural fatigue load and closed freeze/thaw cycles simultaneously[J]. Constr Build Mater, 2011, 25(5): 2604–2610.
- [9] 方志, 朱启木, 刘绍琨, 等. -10°C 下超高性能混凝土的弯曲疲劳性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 473–481.
- FANG Zhi, ZHU Qimu, LIU Shaokun, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(2): 473–481.
- [10] YI J Y, SHEN S H, MUHUNTHAN B, et al. Viscoelastic–plastic damage model for porous asphalt mixtures: Application to uniaxial compression and freeze–thaw damage[J]. Mech Mater, 2014, 70: 67–75.
- [11] QIAO Y F, SUN W, JIANG J Y. Damage process of concrete subjected to coupling fatigue load and freeze/thaw cycles[J]. Constr Build Mater, 2015, 93: 806–811.
- [12] BAI J W, XU R, ZHAO Y R, et al. Flexural fatigue behavior and damage evolution analysis of aeolian sand concrete under freeze–thaw cycle[J]. Int J Fatigue, 2023, 171: 107583.
- [13] XUE G, ZHU H J, XU S, et al. Fatigue performance and fatigue equation of crumb rubber concrete under freeze–thaw cycles[J]. Int J Fatigue, 2023, 168: 107456.
- [14] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] MENG Q L, JING X F, WANG H L, et al. Flexural fatigue properties of concrete based on different replacement percentage of natural sand with manufactured sand[J]. J Build Eng, 2024, 87: 108987.
- [16] LI H J, HUANG F L, CHENG G Z, et al. Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 109: 41–46.
- [17] SELVA GANESH M, JAGADEESH P. Assessment of usage of manufactured sand and recycled aggregate as sustainable concrete: A review[J]. Mater Today Proc, 2022, 64: 1029–1034.
- [18] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 石灰岩机制砂混凝土抗冻性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5): 516–523.
- WANG Zhen, LI Huajian, HUANG Fali, et al. J Build Mater, 2023, 26(5): 516–523.
- [19] 洪锦祥, 缪昌文, 黄卫, 等. 冻融损伤对混凝土疲劳性能的影响[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 83–89.
- HONG Jinxiang, MIAO Changwen, HUANG Wei, et al. China Civ Eng J, 2012, 45(6): 83–89.
- [20] 许金泉. 疲劳力学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [21] YANG Z Q, LI H J, WEN J X, et al. The microstructure evolution of ballastless track high-strength concrete exposed to compressive and flexural fatigue loads[J]. Int J Fatigue, 2023, 166: 107247.
- [22] PENTTALA V, AL-NESHAWY F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(9): 1407–1420.
- [23] JIANG Z W, DENG Z L, ZHU X P, et al. Increased strength and related mechanisms for mortars at cryogenic temperatures[J]. Cryogenics, 2018, 94: 5–13.
- [24] ARAKAWA M, MAENO N. Mechanical strength of polycrystalline ice under uniaxial compression[J]. Cold Reg Sci Technol, 1997, 26(3): 215–229.
- [25] 何倍, 杨振东, 扬帆, 等. 极端低温环境下混凝土力学性能及其演变机制研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(5): 1698–1709.
- HE Bei, YANG Zhendong, YANG Fan, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(5): 1698–1709.
- [26] JIANG Z W, HE B, ZHU X P, et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature[J]. Constr Build Mater, 2020, 257: 119456.
- [27] 王瑞敏, 宋玉普, 赵国藩. 混凝土疲劳破坏的概率分析[J]. 大连理工大学学报, 1991, 31(3): 331–336.
- WANG Ruimin, SONG Yupu, ZHAO Guofan. J Dalian Univ Technol, 1991, 31(3): 331–336.
- [28] PENG R X, QIU W L, JIANG M. Micromechanical modeling of frozen concrete by micro-deformation of multi-phase composite material[J]. Compos Struct, 2022, 301: 116224.
- [29] 李化建, 赵国堂, 高亮, 等. 严寒地区高速铁路无砟轨道用聚合物改性混凝土抗冻机理研究[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 1–9.
- LI Huajian, ZHAO Guotang, GAO Liang, et al. J China Railw Soc, 2023, 45(8): 1–9.
- [30] 武海荣, 金伟良, 延永东, 等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 650–657.
- WU Hairong, JIN Weiliang, YAN Yongdong, et al. J Zhejiang Univ Eng Sci, 2012, 46(4): 650–657.
- [31] WANG J T, HAN F X, LIU Q. Research on freeze-thaw damage and life prediction model of polyethylene fiber-reinforced cementitious composites based on reliability analysis[J]. Case Stud Constr Mater, 2024, 20: e03049.

Fatigue Performance of Manufactured Sand Concrete for Ballastless Track in Cold Regions

WEN Jiaxin^{1,2,3}, LI Huajian^{2,3}, SHI Henan^{1,2,3}, DONG Haoliang^{1,2,3}, HUANG Fali^{2,3}, WANG Zhen^{2,3}, YANG Zhiqiang^{2,3}, YI Zhonglai^{2,3}
 (1 Technology Research College, China Academy of Railway Science Railway, Beijing 100081, China;
 2 Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China;
 3 State Key Laboratory for Track Technology of High-speed Railway, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Extended Abstract

Introduction The wide range and strip-like distribution of high-speed rail crossings, as well as the exposed service characteristics,

result in ballastless track concrete not only directly bearing train loads, but also facing freeze–thaw damage in severely cold or cold areas such as high-latitude cold regions and high-altitude mountainous areas. In the service process, the coupling between environmental effects and train loads has significantly affected the ballastless track concrete at the micro- and macro-levels. However, current standards do not consider the effects of high-speed train fatigue loads and freeze–thaw cycles on the service performance of concrete. During the operation of high-speed trains, the flexural fatigue load frequency that causes damage to the concrete exceeds 20 Hz, which is a significant difference from the test system commonly used in current fatigue tests.

To reflect the actual service conditions of ballastless track more realistically in cold regions, a coupled test system of ‘freeze–thaw cycles and 20 Hz fatigue loads’ was designed. The effects of freeze–thaw cycles on the performance of concrete were analyzed from the perspectives of mechanical properties, fatigue life, and stiffness. The freeze–thaw cycles were divided into freezing and thawing stages, and their damage characteristics and energy transfer laws were analyzed. A life prediction model considering the coupling of freeze–thaw and fatigue was established from a probabilistic perspective to predict the service life of ballastless track manufactured sand concrete in cold regions.

Methods The study used C60 manufactured sand concrete as the research object, with specimen dimensions of 100 mm (width) × 100 mm (height) × 400 mm (length). A SUNS-890 electro-hydraulic servo static and dynamic universal testing machine was used for fatigue tests. The stress level (maximum stress $f_{\max}$ /flexural strength f_t) was fixed at 0.6, stress ratio (minimum stress $f_{\min}$ /peak stress $f_{\max}$) was 0.1, loading frequency was 20 Hz, and displacement data was simultaneously recorded during loading. After being saturated, the concrete underwent a series of freeze–thaw cycles, including 0, 150, 300, 450 cycles, and 600 cycles, before undergoing fatigue testing. To analyze the evolutionary of concrete performance during different stages, the freeze–thaw cycles were divided into two stages: freezing (–20 °C) and thawing (0 °C and 20 °C). After saturation, the specimens were placed at –20, 0 °C, and 20 °C to conduct bending fatigue tests. Simultaneously, in order to analyze the temperature rise caused by fatigue loads at a constant temperature, a temperature measurement point was taken every 25 mm along the side of the concrete during the loading process, and a thermometer was used to measure its temperature.

Results and discussion After 300 freeze–thaw cycles, the ballastless track concrete exhibits accelerated brittle failure characteristics. Both flexural strength and fatigue performance show a trend of accelerated decline with freeze–thaw cycles exceeding 300 times, resulting in a 46.3% decrease in fatigue life and a 12.9% increase in stiffness degradation after 600 freeze–thaw cycles. The internal and surface defects caused by freeze–thaw cycles serve as initiation points for fatigue damage propagation, with the increased actual stress level making the concrete more prone to fatigue fracture. Defect connectivity induced by the cycles becomes the main factor contributing to the deterioration of concrete performance. From an energy perspective, the loading process involves both potential and internal energy, with concrete dissipating energy mainly through deformation energy generated by deformation. The decrease in maximum strain and increase in residual strain caused by freeze–thaw cycles result in reduced deformability of the concrete, thereby negatively affecting its fatigue performance. Ice within the concrete pores during the freezing stage has a reinforcing effect, leading to an improvement in fatigue performance. Additionally, ice helps alleviate internal friction and accelerates internal energy dissipation, thereby mitigating fatigue damage during the freezing stage. By introducing a fatigue damage factor, a life analysis model for concrete under freeze–thaw + fatigue service conditions are established. Predictions of concrete life under different environments are made based on freeze–thaw environmental criteria, revealing that C60 manufactured sand concrete can meet the freeze–thaw design requirements of cold region at level D1 and level D2, but considerations must be made for the intensified damage from fatigue loads.

Conclusions A test regime of ‘freeze–thaw cycle + high-frequency fatigue’ was established to investigate the damage mechanism of concrete under the coupled action of freeze–thaw and fatigue from the perspectives of damage progression and energy transfer. It was found that high-speed train fatigue loads exacerbated the freeze–thaw damage of ballast-free track concrete, with defect connectivity caused by freeze–thaw cycles being the main reason for the decline in concrete fatigue performance. Freeze–thaw cycles lead to a decrease in maximum strain and an increase in residual strain, resulting in reduced deformability of the concrete. Compared to fatigue performance at room temperature, ice within the concrete pores during the freezing stage has a reinforcing effect, and ice in the frozen state can accelerate internal energy dissipation, thereby alleviating fatigue damage. A life analysis model for concrete under ‘freeze–thaw + fatigue’ service conditions, considering a fatigue damage factor, was successfully established to predict the service life of ballast-free track C60 manufactured sand concrete.

Keywords ballastless track; manufactured concrete; freeze–thaw cycles; flexural fatigue performance; evolutionary mechanism; life prediction