

氯盐冻融耦合环境下特细砂混凝土性能研究

包宁¹, 车佳玲², 马志鹏², 刘统伟²

¹宁夏农垦建设有限公司, 宁夏 银川

²宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月25日

摘要

针对特细砂混凝土在高寒、高盐地区应用的关键问题——其独特的超细颗粒特性可能导致迥异于常规混凝土的盐冻损伤机制与演化规律, 本研究采用单面冻融试验方法, 探究了特细砂掺量与氯盐浓度等因素对特细砂混凝土抗冻性能的影响。结果表明: 特细砂混凝土的工作性能和抗压强度随着特细砂掺量的增加逐渐降低。经历60次冻融循环后, 特细砂混凝土的抗压强度随着特细砂掺量的增加呈现先降低后增加再降低的变化趋势, 掺入30%的特细砂可提高混凝土抗冻性。三种侵蚀溶液对特细砂混凝土侵蚀性的大小表现为3% NaCl > 清水 > 10% NaCl。建立了指数函数盐冻损伤模型, 且模型的计算值与试验值吻合较好, 相关性系数(R^2)均在0.93以上。研究结果为特细砂混凝土在盐冻耦合地区的应用提供了理论支撑与试验依据。

关键词

特细砂混凝土, 氯盐浓度, 盐冻循环, 损伤模型

Study on the Performance of Ultra Fine Sand Concrete under Chloride Freeze Thaw Coupled Environment

Ning Bao¹, Jialing Che², Zhipeng Ma², Tongwei Liu²

¹Ningxia Agricultural Reclamation Construction Co., Ltd., Yinchuan Ningxia

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: October 20, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 25, 2025

Abstract

In response to the durability issue of ultra fine sand concrete in high-altitude and high salt areas, a

文章引用: 包宁, 车佳玲, 马志鹏, 刘统伟. 氯盐冻融耦合环境下特细砂混凝土性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2722-2730. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411291

single-sided freeze-thaw test method was used to study the effects of ultra fine sand content (0%, 20%, 30%, 40%), chloride concentration (0%, 3%, 10%) and other factors on the frost resistance of ultra fine sand concrete. The results show that the workability and compressive strength of ultra fine sand concrete gradually decrease with the increase of ultra fine sand content. After 60 freeze-thaw cycles, the compressive strength of ultra fine sand concrete shows a trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing with the increase of ultra fine sand content. Adding 30% ultra fine sand can improve the frost resistance of concrete. The corrosiveness of three types of erosion solutions on ultra fine sand concrete is shown as 3% NaCl > clear water > 10% NaCl. An exponential function salt freezing damage model was established, and the calculated values of the model were in good agreement with the experimental values, with correlation coefficients (R^2) above 0.93. The research results provide theoretical support and experimental basis for the application of ultra-fine sand concrete in salt frost coupling areas.

Keywords

Ultra Fine Sand Concrete, Chloride Concentration, Salt Freezing Cycle, Damage Model

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滨海及高盐渍化区域的混凝土结构同时面临盐侵蚀与冻融循环的双重挑战[1]。二者的耦合效应显著加速材料劣化[2]，导致结构寿命缩短、安全性下降和维护成本增加等问题[3]。对此，国内外学者对盐冻耦合作用下的混凝土损伤开展了大量研究：Qiu 等[4]揭示了海水冻融循环后混凝土的应力-应变及损伤变化规律；Jiang 等[5]证实盐冻耦合加速微观劣化；Xiao 等[6]研究了硫酸盐中再生混凝土的劣化；Li 等[7]则发现粉煤灰掺量提升能改善再生混凝土在硫酸盐-冻融下的相对动弹性模量。目前研究多集中于普通混凝土、再生骨料混凝土与纤维混凝土的盐冻耐久性，对特细砂混凝土在此多因素下的研究尚少。

特细砂(细度模数 0.7~1.5)在我国西部及两河流域资源丰富[8]。利用其部分取代传统细骨料制备特细砂混凝土，具有显著的经济效益、环境效益和战略意义。尽管已有特细砂混凝土在温和气候地区的工程应用实例[9]，但其在环境严酷的西北地区面临的核心挑战-盐侵蚀-冻融循环的强耦合作用尚未得到充分研究。更重要的是，特细砂独特的超细颗粒特性可能显著改变混凝土内部的孔隙结构、水分迁移机制及盐结晶行为，进而导致其盐冻损伤机理与演化规律可能迥异于前述研究的普通或改性混凝土。

因此，本研究不仅旨在填补特细砂混凝土在盐冻耦合环境下的研究空白，更致力于揭示其区别于常规混凝土的损伤机制。本文探究了氯盐浓度(0%、3%、10%)和特细砂掺量(0、20%、30%、40%)对特细砂混凝土抗氯盐侵蚀-冻融性能的影响规律。基于试验数据，构建了特细砂混凝土在盐冻耦合作用下的指数函数损伤模型。以期特细砂混凝土在西北等高盐冻地区的安全、可靠与耐久性设计提供理论支撑和试验依据。

2. 试验

2.1. 原材料

特细砂混凝土由水泥、粉煤灰、粗骨料、细骨料(机制砂、特细砂)与外加剂组成。水泥选用 P·O 42.5 R 波特兰水泥；粉煤灰取自宁夏大坝电厂生产的 I 级粉煤灰，其物理性质见表 1；粗骨料采用粒径 5 mm~25

mm 的 II 级配天然碎石;细骨料为细度模数为 3.4 的机制砂和金樾府基坑开挖出的细度模数为 1.3 的特细砂,特细砂物理性质见表 2;外加剂选用萘系液体减水剂,减水率为 15%~25%;拌合水均采用宁夏当地自来水;3%和 10% NaCl 溶液(质量分数)采用中国上海广诺学科技有限公司生产的 NaCl 分析纯配制。

Table 1. Physical properties of fly ash
表 1. 粉煤灰物理性质

Name	Specific surface area (m ² /kg)	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)	Median diameter (μm)
Fly ash	1110	0.2	2.8	7.79

Table 2. Physical properties of ultra fine sand
表 2. 特细砂物理性质

Name	Specific surface area (m ² /kg)	Apparent density (kg/m ³)	Packing density (kg/m ³)	Water content(%)	Median diameter (μm)
Ultra-fine sand	150	2439	1425	0.4	184

2.2. 试验设计

试验以水胶比 0.38、砂率 0.44、砂胶比 1.92、粗骨料用量 1053 kg/m³ 为定量制备特细砂混凝土,配合比如表 3 所示。参照 GB/T 50081-2019 制备特细砂混凝土拌合物,成型为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件。每组配合比制备 21 个试件。

Table 3. Main variation parameters of mix proportion
表 3. 配合比主要变化参数

Group	W/C	Fly ash content (%)	Ultra fine sand content (%)	Sand rate	Water reducing agent dosage (%)
BF18S0	0.38	18	0	0.44	1.8
BF18S2		18	20		2.3
BF18S3		18	30		2.7
BF18S4		18	40		3.2
BF28S0		28	0		1.8
BF28S2		28	20		2.3
BF28S3		28	30		2.7
BF28S4		28	40		3.2

注:编号 B 表示水胶比为 0.38;S0、S2、S3 和 S4 表示特细砂掺量分别为 0%、20%、30%和 40%;F18、F28 表示粉煤灰掺量分别为 18%和 28%。

2.3. 试验方法

2.3.1. 抗压强度

特细砂混凝土立方体试件养护至 7 d、28 d、128 d 龄期时,采用 SHT4106 微机控制电液伺服万能试验机测定试块抗压强度,试验机加载速率为 0.5 MPa/s;当加载仪器数值停止上升时表示试件已破坏,停止加载。

2.3.2. 抗冻性能

将成型后试件在标准养护室中养护 24 d 龄期后取出并擦除侧面浮灰,采用环氧树脂铝膜胶将其顶面与测试面之外的其余四个侧面密封;将密封好的试件测试面向下放置到非金属垫条上,并向试件盒中加入试验液体(清水、3% NaCl 和 10% NaCl)至液面高于测试面,预吸水 7 d 后,擦干试件表面水分,称量初始重量,测定初始横向基频值;测量结束后将试件重新放入试件盒中,并向试件盒中加入新配制的侵蚀溶液进行冻融试验;每 15 次冻融循环更换侵蚀溶液,测试特细砂混凝土试件的横向基频和称重,待冻融循环 60 次后取出试件,测定抗压强度。

3. 结果与分析

3.1. 抗压强度

图 1 为特细砂混凝土 7 d、28 d、128 d 的抗压强度变化曲线图。特细砂混凝土 28 d 抗压强度在 45.1 MPa~55.9 MPa 之间,表明掺入 20%~40%特细砂和 18%~28%粉煤灰可配制出满足 C20~C45 等级混凝土。抗压强度随特细砂掺量的增加而减小,这是因为特细砂掺量的增大,降低了机制砂用量,致使本就不均匀的级配变得更差,此外特细砂自身比表面积大,与水泥浆体粘接强度较低,随着特细砂掺量的增加,水泥浆体与特细砂形成的界面过渡区总体积增大[10]。养护 28 d 时,粉煤灰替代率为 28%的特细砂混凝土抗压强度均略高于粉煤灰替代率为 18%的特细砂混凝土;养护龄期达到 128 d 时,BF28S0、BF28S2、BF28S3、BF28S4、BF28S6 组特细砂混凝土的抗压强度与 BF18S0、BF18S2、BF18S3、BF18S4、BF18S6 相比,分别提高了 10.9 MPa、7.7 MPa、7.0 MPa、4.7 MPa、2.1 MPa。这是因为粉煤灰颗粒中含有许多活性物质,活性物质会与水泥基材料中的氢氧化钙生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,改善水化胶凝物质的组成,从而增强混凝土后期强度。

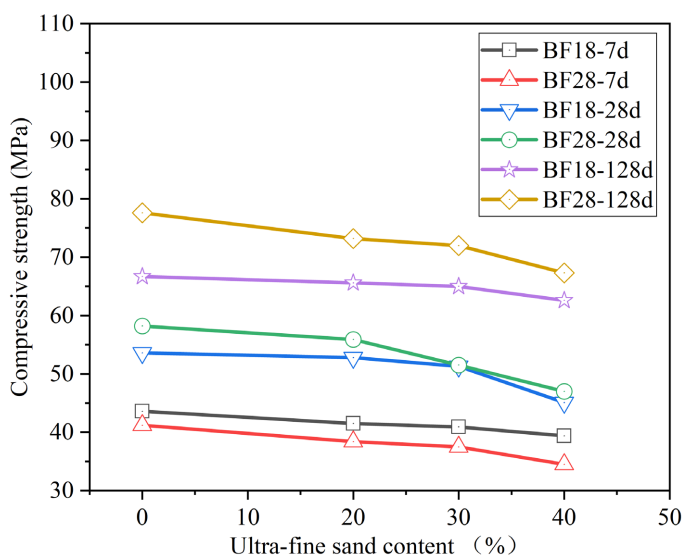


Figure 1. Compressive strength of ultra fine sand concrete
图 1. 特细砂混凝土抗压强度

3.2. 氯盐溶液 - 冻融耦合下的损伤指标

3.2.1. 累计质量损失

图 2 显示了不同浓度侵蚀溶液对混凝土冻融后累计质量损失的影响情况。清水冻融环境中(图 2(a))

混凝土的累计质量损失随着冻融循环次数的增加呈现先减少后增加的变化趋势。冻融前期(次数 < 15), 累计质量损失逐渐降低, 随后增加, 冻融 60 次后的最大损失量 < 6.0 g, 损失率均低于规范 5% 阈值。3% NaCl 组(图 2(b))在 15 次循环后出现拐点, 冻融 60 次后, 掺入 30% 特细砂时, 试块的累计质量损失最小, 仅为 2.7 g (BF18S3)和 2.1 g (BF28S3); 而掺入 20% 特细砂的混凝土试块的累计质量损失最大, 达到 14.6 g (BF18S2)和 9.3 g (BF28S2)。损伤演化分为三阶段: 初期(<15 次)盐结晶填充微裂缝导致质量增益; 中期(15~45 次)裂缝饱和后损伤累积加速; 后期(>45 次)表面剥落主导质量损失, 与既有研究吻合[11] [12]。10% NaCl 溶液冻融环境中(图 2(c))试块的累计质量损失变化趋势不同于其他两组溶液。在 45 次冻融循环时试块的质量增加到最大, 直到 60 次循环结束, 试件的累计质量损失仍处于负值。这是因为 10% NaCl 溶液降低了水的冻结点, 减小了水分子在冻结过程中形成的结晶, 有助于减小试件内部的应力集中, 且 10% NaCl 盐溶液浓度较高, 渗透进特细砂混凝土的盐溶液会在孔隙内饱和形成较小结晶, 填充孔隙。

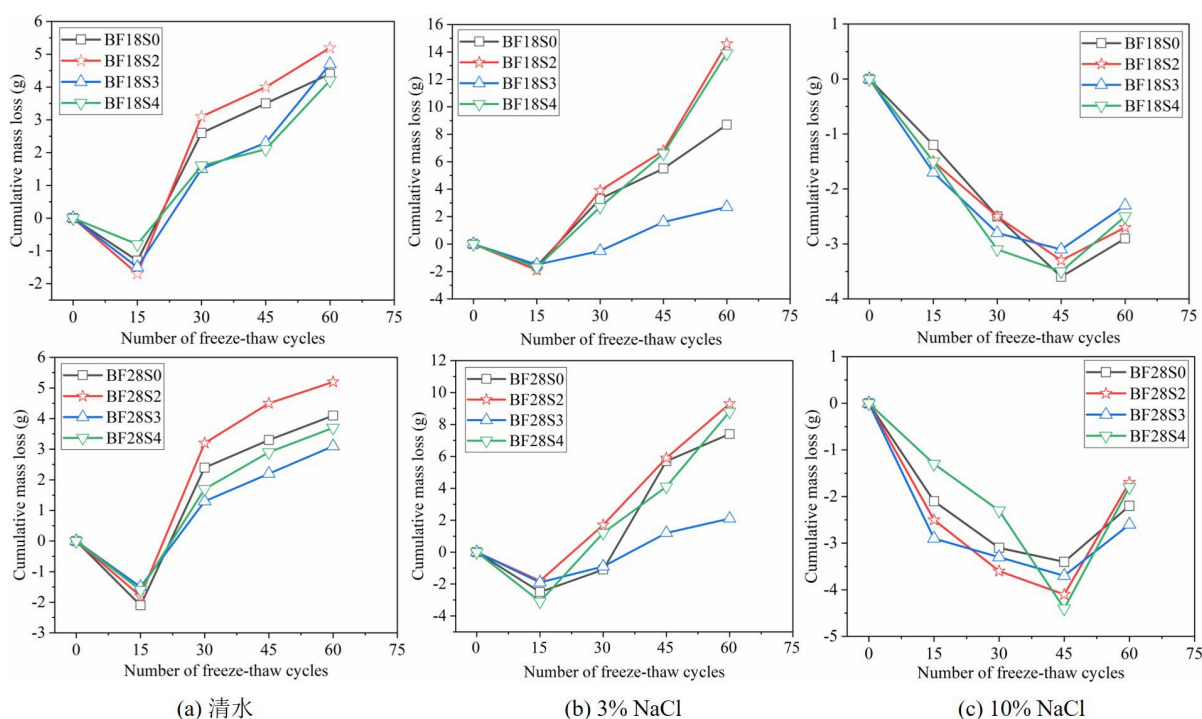


Figure 2. Quality loss rate of ultra fine sand concrete

图 2. 特细砂混凝土质量损失率

3.2.2. 相对动弹性模量

图 3 展示了不同浓度侵蚀溶液下混凝土冻融后相对动弹性模量的变化。随冻融循环次数增加, 所有试块的模量均持续降低。清水环境(图 3(a))中冻融前期(<15 次)模量下降较小。延长侵蚀周期后, BF28S3 模量高于 BF28S0, 而其他掺量组则低于或接近其未掺组。60 次冻融时, BF18S3 组模量较 BF18S0 组高 4%; BF28S3 组较 BF28S0 组高 2%。3% NaCl 溶液环境(图 3(b))中模量随冻融次数增加而显著下降, 60 次后各组模量均降至约 60%。BF28S3 组模量较 BF28S0 组高 6%; BF18S3 组仅较 BF18S0 组高 2%。10% NaCl 溶液环境(图 3(c))中各组模量下降速率缓慢, 这与表观形貌变化和累计质量损失的前期结论一致。在 15、30、45 及 60 次侵蚀时, BF18S3 组的模量分别为 97%、91%、84%、75%; BF28S3 组的模量分别为 98%、88%、80%、74%。

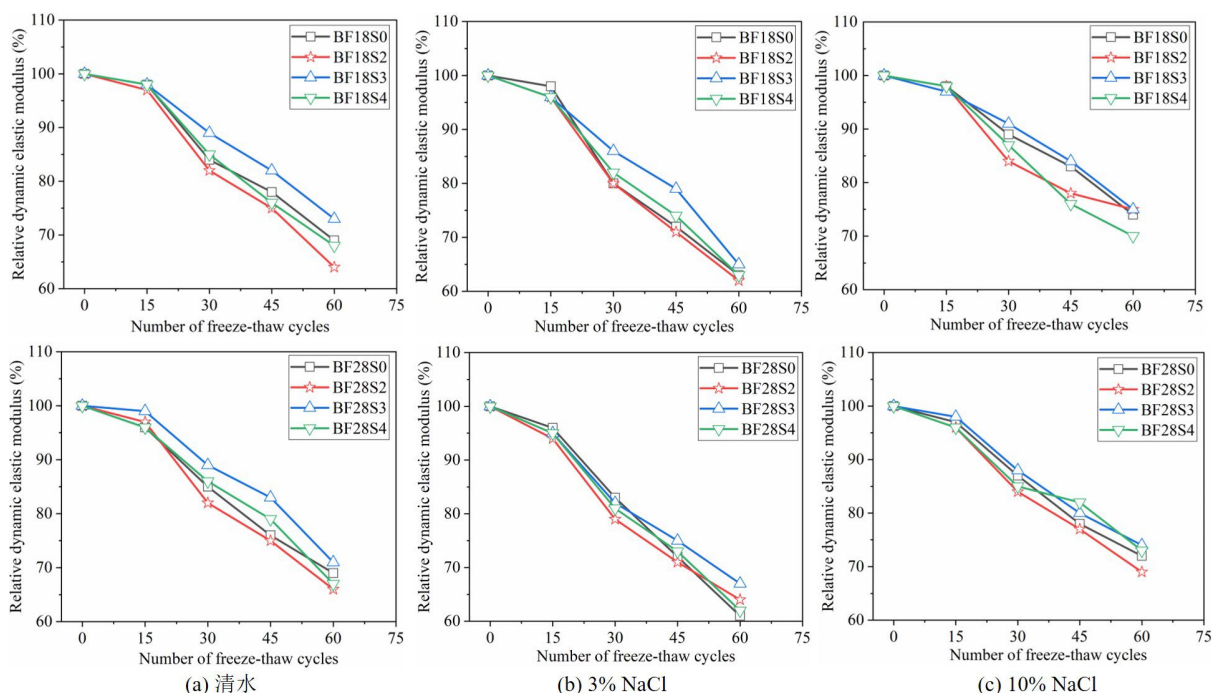


Figure 3. Relative dynamic elastic modulus of ultra fine sand concrete

图 3. 特细砂混凝土相对动弹性模量

3.2.3. 抗压强度损失

图 4 显示了不同浓度侵蚀溶液下混凝土试块冻融后的抗压强度变化情况。由图可知, 经历不同浓度侵蚀溶液冻融循环后, 特细砂混凝土的抗压强度均存在不同程度的降低, 其中 3% NaCl 溶液中试件抗压强度降低最大, 清水中试件次之, 10% NaCl 溶液中试件最小。冻融循环后的特细砂混凝土的抗压强度随特细砂掺量增加先降低后增加再降低的变化趋势, 其中特细砂掺量为 30% 时, 抗压强度最大, 且略微超过了未掺组, 表明适量掺入特细砂可以提高混凝土抗冻性。这是因为特细砂的填充作用细化有害孔隙, 降低孔隙连通性, 阻断水分迁移通道, 减少可冻水的含量, 削弱了冻胀压力[13]。

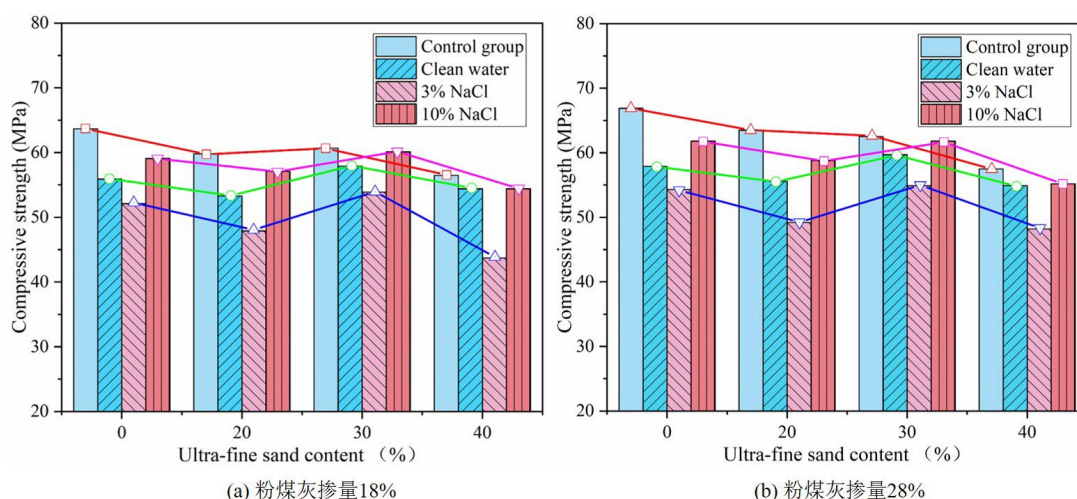


Figure 4. Compressive strength of ultra fine sand concrete after freeze thaw cycle

图 4. 冻融循环后特细砂混凝土抗压强度

由图 5 可知,不同浓度侵蚀溶液中混凝土试块的抗压强度损失率呈现不同的变化趋势。随着特细砂掺量的增多,清水中混凝土试块的抗压强度损失率持续降低,3% NaCl 溶液中则是先上升后下降再上升的变化趋势,而 10% NaCl 溶液中为先下降再上升的变化趋势。相较于清水和 3% NaCl 溶液中的混凝土试块,10% NaCl 溶液中试块的抗压强度损失率相对较小,均在 8% 以下。这与混凝土试件的表观形貌、累计质量损失和相对动弹性模量规律完全吻合。掺入 18% 粉煤灰时,混凝土的抗压强度损失相对较小,掺入 28% 时略大。

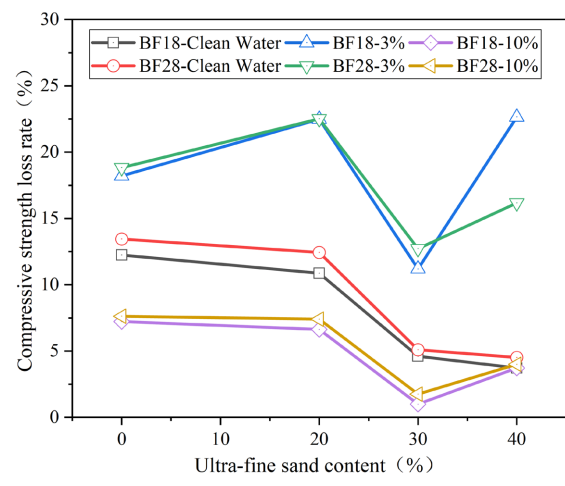


Figure 5. Loss rate of compressive strength of ultra-fine sand concrete
图 5. 特细砂混凝土抗压强度损失率

3.3. 指数函数盐冻损伤模型

通过监测相对动弹性模量的变化,可以对材料的损伤状态进行定量描述和预测。因此,根据刘崇熙等[14]的研究和本文试验结果,以相对动弹性模量为依据,NaCl 溶液浓度与粉煤灰掺量为参数,建立特细砂掺量为 20%、30%和 40%的特细砂混凝土指数函数盐冻损伤模型(公式 1):

$$Q = e^{a(C_c M_f N)^2 + b C_c M_f N + c} \tag{1}$$

式中: Q ——相对动弹性模量; C_c ——NaCl 溶液浓度; M_f ——粉煤灰掺量; N ——冻融循环次数; a 、 b 、 c ——损失系数。

通过式(1)对试验数据进行拟合,特细砂混凝土指数函数盐冻损伤模型如表 4 所示,除 BF18S2-10% 组相关性系数 R^2 为 0.93 外,其余各组相关性系数 R^2 均在 0.95 以上。说明模型能够较准确预测特细砂混凝土结构在盐冻耦合地区的损伤情况。

Table 4. Index function salt frost damage model
表 4. 指数函数盐冻损伤模型参数

Group	a	b	c	R ²
BF18S2-3%	-1.8271	-0.9730	4.6178	0.9586
BF18S3-3%	-2.9588	-0.3416	4.6055	0.9844
BF18S4-3%	-2.2153	-0.7506	4.6135	0.9742
BF28S2-3%	-0.2360	-0.8167	4.6163	0.9637

续表

BF28S3-3%	-0.3824	-0.6333	4.6136	0.9716
BF28S4-3%	-0.8311	-0.5523	4.6125	0.9784
BF18S2-10%	0.0062	-0.3056	4.6217	0.9389
BF18S3-10%	-0.1781	-0.0740	4.6057	0.9996
BF18S4-10%	-0.1731	-0.1743	4.6169	0.9755
BF28S2-10%	-0.0439	-0.1561	4.6133	0.9721
BF28S3-10%	-0.0502	-0.1083	4.6148	0.9594
BF28S4-10%	-0.0270	-0.1420	4.6099	0.9746

4. 结论

(1) 随着特细砂掺量的增加,混凝土拌合物的和易性和抗压强度均降低,拌合物的坍落度仍然保持在 140 mm 以上,扩展度最低为 380 mm;特细砂混凝土的 28 d 抗压强度在 45.1 MPa~55.9 MP 之间,满足 C20~C45 强度等级的要求。

(2) 经历 60 次冻融循环后,特细砂混凝土的抗压强度随着特细砂掺量的增加呈现先降低后增加再降低的变化趋势;综合累计质量损失、相对动弹性模量与抗压强度损失来看,掺入 30%的特细砂可提高混凝土抗冻性。

(3) 建立了指数函数盐冻损伤模型,且模型的计算值与试验值的相关系数(R^2)均达到 0.93 以上,能够反映盐冻循环对特细砂混凝土损伤的影响。

基金项目

宁夏农垦建设有限公司技术开发合同“低碳、环保型砗系列建筑材料的研究与开发”(技术合同登记号: 2022640101000054)。

参考文献

- [1] Lei, B., Li, W., Tang, Z., Tam, V.W.Y. and Sun, Z. (2018) Durability of Recycled Aggregate Concrete under Coupling Mechanical Loading and Freeze-Thaw Cycle in Salt-Solution. *Construction and Building Materials*, **163**, 840-849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.194>
- [2] Li, W., Liu, H., Zhu, B., Lyu, X., Gao, X. and Liang, C. (2020) Mechanical Properties and Freeze-Thaw Durability of Basalt Fiber Reactive Powder Concrete. *Applied Sciences*, **10**, Article 5682. <https://doi.org/10.3390/app10165682>
- [3] Wang, B., Pan, J., Fang, R. and Wang, Q. (2020) Damage Model of Concrete Subjected to Coupling Chemical Attacks and Freeze-Thaw Cycles in Saline Soil Area. *Construction and Building Materials*, **242**, Article ID: 118205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118205>
- [4] Qiu, W., Teng, F. and Pan, S. (2020) Damage Constitutive Model of Concrete under Repeated Load after Seawater Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, **236**, Article ID: 117560. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117560>
- [5] Jiang, L., Niu, D., Yuan, L. and Fei, Q. (2015) Durability of Concrete under Sulfate Attack Exposed to Freeze-Thaw Cycles. *Cold Regions Science and Technology*, **112**, 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.12.006>
- [6] Xiao, Q.H., Li, Q., Cao, Z.Y. and Tian, W.Y. (2019) The Deterioration Law of Recycled Concrete under the Combined Effects of Freeze-Thaw and Sulfate Attack. *Construction and Building Materials*, **200**, 344-355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.066>
- [7] Li, Y., Wang, R., Li, S., Zhao, Y. and Qin, Y. (2018) Resistance of Recycled Aggregate Concrete Containing Low- and High-Volume Fly Ash against the Combined Action of Freeze-Thaw Cycles and Sulfate Attack. *Construction and Building Materials*, **166**, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.084>
- [8] 林忠财, 许潇, Hamideh Mehdizadeh, 等. 特细砂替代率对自密实砂浆流变性的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学

- 版), 2022, 49(1): 94-101.
- [9] 王斌. 特细砂在肯尼亚蒙内铁路混凝土工程中的应用[J]. 建材世界, 2020, 41(6): 18-22.
- [10] 汪伟, 赖增成, 谭鹏, 等. 机制砂与特细砂抗氯盐侵蚀混凝土的制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(6): 2121-2129.
- [11] Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, W. and She, W. (2018) Study on Sulfate Resistance of Concrete with Initial Damage under Drying-Wetting Cycles. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **7**, 311-322.
<https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1499564>
- [12] Xu, H., Bu, J., Chen, X., Chen, Q. and Xu, B. (2023) Fracture Behavior of Dredged Sand Concrete under Freeze-Thaw Cycles. *Construction and Building Materials*, **366**, Article ID: 130192.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130192>
- [13] 邢文杰. 黄河特细砂混凝土耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [14] 刘崇熙, 汪在芹. 坝工混凝土耐久寿命的衰变规律[J]. 长江科学院院报, 2000(2): 18-21.