

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.05.010

机制砂混凝土抗冻性能试验研究

靳连杰¹, 邵永红¹, 陈明涛¹, 陈杰¹, 刘加奇², 王伟^{*2}

(1. 中铁二局集团有限公司, 四川 成都 610039; 2. 长春工程学院 土木工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:【目标】深入探讨机制砂混凝土在道路工程中的抗冻性能, 并分析不同影响因素对其性能的作用机制。【方法】首先, 运用四因素五水平正交试验设计; 然后, 引入钢渣和硅灰作为复合矿物掺合料, 并考虑机制砂替代天然砂含量及石粉含量这2个因素; 最后, 系统评估这些因素的合理掺合量对冻融循环作用机制砂混凝土的质量损失率和相对动弹性模量的影响, 并通过表观分析法、极差分析和方差分析量化各因素的显著性及其交互作用。【结果】石粉含量是影响机制砂混凝土抗冻性能的最显著因素, 可以适当增加石粉含量至9%~15%, 使机制砂混凝土的抗冻性能最优。机制砂混凝土抗冻性能影响因素由强到弱依次排序为石粉含量、硅灰掺量、机制砂取代率及钢渣掺量。在复合掺合料的应用中, 合理控制各掺合料的用量是提升混凝土抗冻性能的关键, 将复合掺合料总量控制在40%以内, 其中钢渣掺量不超过35%, 硅灰掺量约为5%, 机制砂混凝土的抗冻性能达到最优状态。【结论】硅灰的高活性效应显著提高了混凝土的界面过渡区性能, 而钢渣则通过其填充作用和潜在的水化能力增强了基体的抗冻性。此外, 机制砂取代率的适当调整可进一步改善混凝土的体积稳定性, 从而提高抗冻性能。

关键词: 道路工程; 合理掺合量; 正交试验; 机制砂; 抗冻性能

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2025) 05-0088-10

Experimental study on frost resistance of manufactured sand concrete

JIN Lianjie¹, SHAO Yonghong¹, CHEN Mingtao¹, CHEN Jie¹, LIU Jiaqi², WANG Wei^{*2}

(1. China Railway No. 2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610039, China;

2. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract: [Objective] The study deeply explores in the frost resistance of manufactured sand concrete for road engineering, and to analyze the mechanism of different influencing factors on its performance. [Method] First, a four-factor five-level orthogonal experimental design was applied. Then, steel slag and silica fume were introduced as composite mineral admixtures. Two factors were considered, i.e., the manufactured sand contents replacing natural sand, and the stone powder content. Finally, the influences of these factors' reasonable admixture on mass loss rate and relative dynamic elastic modulus of manufactured sand concrete under freezing-thawing cycles were systematically evaluated. The significance of each factor and the interaction effects were quantified by means of apparent analysis method, range analysis and variance analysis. [Result] The stone powder content is the most significant factor affecting the frost resistance of manufactured sand concrete. The stone powder content could be appropriately increased to 9%–15% to

收稿日期: 2024-03-27 修改日期: 2025-03-16

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (JJKH20191243KJ)

作者简介: 靳连杰 (1974-), 男, 云南祥云人, 高级工程师, 研究方向为机制砂混凝土力学性质与工作性能。 (36119600@qq.com)

* 通讯作者: 王伟 (1982-), 男, 吉林长春人, 博士, 副教授, 研究方向为寒区混凝土材料抗冻性能。 (16695496@qq.com)

引用格式: 靳连杰, 邵永红, 陈明涛, 等. 机制砂混凝土抗冻性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (5): 88-97. JIN Lianjie, SHAO Yonghong, CHEN Mingtao, et al. Experimental study on frost resistance of manufactured sand concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (5): 88-97.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

optimize the frost resistance of manufactured sand concrete. The factors affecting manufactured sand concrete frost resistance are ranked in order from strong to weak as stone powder content, silica fume admixture, manufactured sand substitute rate and steel slag admixture. In application of composite admixture, the reasonable control of each admixture is the key to improve concrete frost resistance. The total amount of composite admixture is controlled within 40%, of which the amount of steel slag is not more than 35%, and the amount of silica fume is about 5%. Then the frost resistance of manufactured sand concrete reaches the optimal state. [Conclusion] The high activity of silica fume significantly improves the interfacial transition zone performance of concrete; while steel slag enhances the frost resistance of matrix through its filling effect and potential hydration capacity. In addition, the appropriate adjustment of substitute rate of manufactured sand can further improve the volume stability of concrete, thus enhancing the frost resistance.

Key words: road construction; reasonable admixture; orthogonal test; manufactured sand; frost resistance

0 引言

随着工程建设规模的不断扩大,天然砂资源因过度开采而逐渐枯竭,对机制砂替代天然砂的需求日益增长^[1-4]。诸多学者对机制砂混凝土配合比及相关性能进行研究^[5-7],当前针对机制砂混凝土的力学性能研究较为丰富^[8-9]。然而,寒区工程中,由于机制砂的抗冻能力较差,容易导致应力损失。研究人员通过增加石粉来改善这一问题^[10-12]。林洪法^[14]研究了不同石粉含量对机制砂混凝土抗氯离子渗透和抗冻耐久性的影响,发现石粉含量对机制砂混凝土的抗冻性影响不大。王稷良^[14]研究了不同石粉含量对机制砂混凝土抗冻性能的影响,结果表明当石粉含量由3.5%增至14.0%时,低强度混凝土的劣化明显,高强度混凝土的抗冻性能不受影响。这表明适量的石粉掺量可以显著提高混凝土的抗冻性能。

与此同时,学者们也在探索利用矿物掺合料改进混凝土的长期耐久性。例如,钢渣^[15-16]、硅灰^[17-18]等工业废料作为活矿物掺合料的应用取得了一定成果。Dhivya^[19]研究了钢渣作为混凝土矿物添加剂对其力学性能和耐久性的影响,发现钢渣掺量为30%时抗压强度最佳,而钢渣掺量越小耐久性越好。朱训国^[20]研究了钢渣掺量对钢渣混凝土试块抗冻和抗渗性能的影响,结果显示随着钢渣掺量的增加,混凝土的抗渗性和抗冻性能显著提高。叶穆平^[21]采用硅灰替代水泥,制备了不同硅灰掺量的透水混凝土,研究表明硅灰透水混凝土具有良好的强度和抗冻性能。Brescia-Norambuena^[22]研究也表明,硅粉作为混凝土的部分替代品(15%)能显著提高其抗冻性能。

根据《建设用砂》(GB/T14684—2011)的规定,机制砂中的石粉含量上限为7%,这在一定程度

上限制了机制砂混凝土的研究与发展。机制砂骨料通常呈棱角状,容易形成孔隙结构,导致混凝土孔隙率增加,从而影响其抗冻性能;同时,机制砂的粒径分布较窄,导致混凝土颗粒排列不均匀,增加了孔隙的形成和扩展。矿物掺合料的使用可以改善机制砂混凝土的性能,不同的掺合料具有各自独特的特性。钢渣具有良好的胶凝和填充效果,能够填补混凝土中的孔隙,提高混凝土的密实度,减少冻融循环过程中水分的渗透和冰胀对混凝土的损害,从而提升混凝土的抗冻性能。硅灰具有高活性和细度,能与水中的胶凝材料发生水化反应,生成额外的水化产物,增强混凝土的强度和耐久性。采用复合掺合料可以充分发挥不同掺合料的优点,弥补单一掺合料的不足,进而优化机制砂混凝土的性能。复合掺合料对于机制砂混凝土的抗冻性能有重要影响,尤其是在冻融循环和严寒地区的应用中。

因此,将钢渣和硅灰作为胶凝材料以提高机制砂混凝土的抗冻融性能,可能是一种制备高性能混凝土的有效途径。目前这方面的研究较为有限,缺乏系统且有价值的结论。本研究采用正交试验方法,在不同掺合料类型、掺入量、机制砂石粉含量及机制砂取代率的情况下,探讨机制砂混凝土的抗冻性能,并以相对动弹性模量和质量损失率作为评价指标,确定最佳性能配合比,分析最优掺量,为机制砂混凝土的后续应用提供参考依据。

1 原材料及试验

1.1 原材料

试验针对季节性冻融地区,使用的水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥,基本性能指标如表1所示。金甬铁路工程项目中开采的石灰岩经破碎得到机制砂,天然砂为当地河砂,主要性能指标如表2所示。

粗骨料采用级配碎石，由 0~5 mm 和 5~20 mm 这 2 种粒径按 1:4 的质量比掺配而成，其性能指标如表 3 所示。硅灰的化学成分如表 4 所示。钢渣是炼钢过程中的副产品，由生铁中的硅、锰、磷、硫等杂质在熔炼过程中氧化形成的氧化物及与溶剂反应生成的盐类组成，能够降低混凝土的密度，其化学成分如表 5 所示。采用聚羧酸高性能减水剂，减水率为 30%，性能优良。拌和水为实验室自来水。

表 1 水泥基本性能指标
Table 1 Basic performance indicators of cement

密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa		安定性
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
3.3	385	205	265	26.3	48.7	6.4	8.5	合格

表 2 机制砂与天然砂性能指标
Table 2 Performance indicators of manufactured sand and natural sand

指标	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	MB 值/(g·kg ⁻¹)	压碎值/%	石粉含量/%	含泥量/%	细度模数
机制砂	2 828	1 748	1.2	20.2	8.4	—	2.7
天然砂	2 665	1 650	—	16.2	—	2.7	2.2

表 3 粗骨料性能指标
Table 3 Coarse aggregate performance indicators

骨料粒径/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	孔隙率/%	压碎值/%
0~5	3 080	1 640	46.75	10.24
5~20	2 965	1 675	43.51	11.77

表 4 硅灰化学成分 (单位: %)
Table 4 Chemical composition of silica fume (unit: %)

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	MgO	CaO	Na ₂ O
质量占比	96.56	0.29	0.09	0.10	0.14	0.08

表 5 钢渣化学成分 (单位: %)
Table 5 Chemical composition of steel slag (unit: %)

化学成分	CaO	TFe ₂ O ₃	SiO ₂	TFe	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ ON	K ₂ O
质量占比	45.56	17.45	11.85	11.6	7.62	3.52	1.02	0.75	0.40	0.13	0.10

1.2 机制砂混凝土冻融试验

1.2.1 配合比

通过正交试验法研究机制砂取代率、机制砂中石粉含量、双掺钢渣和硅灰掺量对机制砂混凝土抗冻性能的影响，每项因素均设定了 5 个不同水平。根据现行标准规范、相关研究文献及初步试验结果，确定机制砂混凝土的水胶比为 0.34，砂率为 42%，减水剂掺量为 1%。在双掺矿物掺合料的情况下，试验设计采用 L25 (5.4) 正交表 (见表 6)，并据此制定了 25 组不同的配合比方案。

1.2.2 冻融试验

根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020) 进行快冻法试验。试件在标准条件下养护 24 d 后取出，并在 (20±2)℃ 的水中浸泡 4 d，确保水面高出试件至少 20 mm。养护 28 d 后，进行冻融试验。首先测量初始动弹性模量和质量，随

表 6 正交因素水平

Table 6 Orthogonal factor levels

水平	A	B	C	D
	机制砂取代率/%	机制砂石粉含量/%	钢渣掺量/%	硅灰掺量/%
1	100.0	6	20.0	5.0
2	87.5	9	27.5	7.5
3	75.0	12	35.0	10.0
4	62.5	15	42.5	12.5
5	50.0	18	50.0	15.0

后每 25 次冻融循环后，测试相对动弹性模量和质量损失，直至试件完成 75 次冻融循环。如果试件的相对动弹性模量降至 60% 以下或质量损失率超过 5%，则停止试验并记录其抗冻融循环次数。若未达到这些条件，则继续进行冻融试验，直至相对动弹性模量降至 60% 以下或质量损失率达到 5%，

然后停止试验并记录相关数据。最终, 通过质量损失率和相对动弹性模量损失率来评估复合掺合料机制砂混凝土的抗冻性能。

1.2.3 试验设备

采用 TDR-16 型号混凝土快速冻融试验机进行冻融循环试验, 在冻结和融化终了时, 试件中心温度控制在 $(-18\pm2)^{\circ}\text{C}$ 至 $(5\pm2)^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果及分析

运用极差和方差分析法来研究机制砂取代率、机制砂石粉含量、钢渣掺量及硅灰掺量对复合掺合料机制砂混凝土的抗冻性能的影响。以相对动弹性模量、质量损失率及表面观察法作为判别依据, 试验结果如表 7 所示。

表 7 各组抗冻性能指标试验结果 (单位: %)
Table 7 Test result of frost resistance performance indicator for each group (unit: %)

试验组号	A	B	C	D	25 次冻融循环		50 次冻融循环		75 次冻融循环	
					质量损失率	相对动弹性模量	质量损失率	相对动弹性模量	质量损失率	相对动弹性模量
1	100.0	6	20.0	5.0	0.07	99.88	0.11	99.71	0.21	99.69
2	100.0	9	27.5	7.5	0.10	100.20	0.07	99.86	0.17	99.86
3	100.0	12	35.0	10.0	0.63	89.92	0.84	78.04	0.74	62.33
4	100.0	15	42.5	12.5	0.53	92.49	0.69	80.37	0.75	62.42
5	100.0	18	50.0	15.0	0.16	73.65	0.21	31.48	0.62	8.65
6	87.5	6	27.5	10.0	-0.10	73.97	-0.10	30.13	0.54	7.64
7	87.5	9	35.0	12.5	-0.10	95.40	-0.07	94.40	0	93.98
8	87.5	12	42.5	15.0	0.42	95.85	0.46	90.29	0.53	83.22
9	87.5	15	50.0	5.0	0.17	96.62	0.30	95.42	0.60	95.03
10	87.5	18	20.0	7.5	-0.10	62.21	1.87	47.01	6.01	21.40
11	75.0	6	35.0	15.0	0.48	93.94	0.48	92.44	0.54	89.76
12	75.0	9	42.5	5.0	0.05	93.69	0.11	93.65	0.26	92.65
13	75.0	12	50.0	7.5	0.21	92.02	0.32	93.02	0.43	92.27
14	75.0	15	20.0	10.0	-0.05	91.56	-0.05	80.11	0.53	72.34
15	75.0	18	27.5	12.5	0.31	94.32	0.21	86.87	0.37	75.07
16	62.5	6	42.5	7.5	-0.11	71.65	-0.14	51.89	0.21	35.31
17	62.5	9	50.0	10.0	-0.04	75.87	0.03	60.01	0.63	39.77
18	62.5	12	20.0	12.5	0.88	76.34	0.95	62.55	0.95	52.0
19	62.5	15	27.5	15.0	0.49	73.71	0.66	65.55	0.32	36.09
20	62.5	18	35.0	5.0	0.80	70.77	0.96	61.09	1.38	37.73
21	50.0	6	50.0	12.5	0.37	68.05	0.53	24.64	0.65	14.78
22	50.0	9	20.0	15.0	0.17	95.34	0.31	93.76	0.35	90.97
23	50.0	12	27.5	5.0	0.11	93.91	0.21	91.26	0.31	85.58
24	50.0	15	35.0	7.5	0.07	74.48	0.10	50.76	0.91	32.80
25	50.0	18	42.5	10.0	-0.11	49.05	-0.11	26.74	1.05	10.44

2.1 冻融试验结果分析

25 组相对动弹性模量试验和质量损失率试验曲线如图 1 所示。由图可知, 复合掺合料的机制砂混凝土受到冻融循环作用影响效果。经过 25 次冻融循环后, 复合掺合料机制砂混凝土试件的表面未出现明显变化。少数试件的质量略有增加, 主要原因是混凝土内部存在孔隙, 在冻融过程中吸水形成微裂缝, 水分子渗入内部并结冰产生冻胀力, 导致试件受损。在冻融试验初期, 由于损伤程度较轻, 混凝土

表面脱落的质量少于其吸收的水分质量, 因此会出现轻微的质量增加^[23]。此时试件表面可能会出现少量细小裂缝, 但这些裂缝不会对整体性能造成显著影响。

经过 50 次冻融循环后, 试件表面出现碎石砂浆浮渣。随着循环次数增多, 混凝土试件表面裂缝、破损和剥落现象愈发明显和严重, 试件的弹性模量逐渐降低, 质量损失率有所上升。这表明机制砂混凝土试件的结构与性能已开始受到冻融循环的影响,

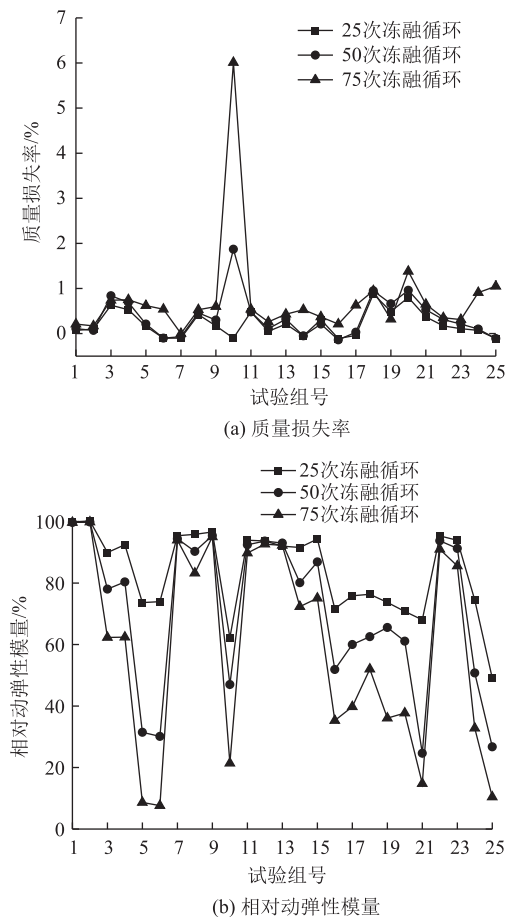


图 1 质量损失率和相对动弹性模量曲线

Fig. 1 Curves of mass loss rate and relative dynamic elastic modulus

但试件的抗冻性能仍保持较好稳定性。此时，第 5，6，10，16，21，24 组试件的相对动态弹性模量降至 60% 以下，内部损伤严重。

经过 75 次冻融循环后，取出复合掺合料机制砂混凝土试件。试件表面砂浆剥落，碎石裸露，且碎石明显未被砂浆包裹，表面出现更多、更宽、更深的裂缝和破坏，裂缝形态更为复杂。试件的弹性模量显著下降，质量损失率明显增加，这表明混凝土试件已严重受损，其耐久性和抗冻性能受到严重影响。此时，第 17~20 组试件的相对动态弹性模量降至 60% 以下。

经过 100 次冻融循环后，取出复合掺合料机制砂混凝土试件。试件表面裂缝和剥落现象进一步加剧，弹性模量急剧下降，质量损失率大幅增加。在超过 100 次冻融循环的情况下，混凝土试件的性能急剧变化。试件表面出现更多、更大、更严重的裂缝和剥落，弹性模量急剧下降，质量损失率大幅增加。最终，在 150 次冻融循环与 250 次冻融循环后，

第 1，2，7，9，12，13 组试件达到了 F250 的冻融等级，即满足 250 次冻融循环指标。

2.2 最优配合比结果分析

经过 100 次冻融循环后，部分试验组的复合掺合料机制砂混凝土已出现不同程度的破坏。为了更准确地分析各因素对混凝土抗冻性能的具体影响并探究其内在规律，研究采用了前 75 次冻融循环的数据，利用极差分析法对各组试件在 25，50，75 次冻融循环后的质量损失率和相对动弹性模量结果进行了分析。25 次冻融循环后质量损失率和相对动弹性模量极差如表 8 所示，其中， $K_1 \sim K_5$ 分别表示各因素水平下的平均值， R 表示同一因素在不同水平下各指标的极差。 R 值反映了因素对机制砂混凝土冻融循环后的影响程度， R 值越大，表明该因素的影响越大，反之，则影响较小。由表 8 可知，复合掺合料机制砂混凝土在 25 次冻融循环后的质量损失率的各影响因素显著程度由大到小为 B，D，A，C；相对动弹性模量的影响因素显著程度由大到小为 B，A，D，C。同理可以得出复合掺合料机制砂混凝土在 50 次和 75 次冻融循环作用后的各影响因素影响程度顺序，结果如表 9 所示。

表 8 25 次冻融循环后质量损失率和相对动弹性模量极差 (单位: %)

Table 8 Mass loss rate and relative dynamic elastic modulus range after 25 freezing-thawing cycles (unit: unit)

指标	质量损失率				相对动弹性模量			
	A	B	C	D	A	B	C	D
K_1	0.30	0.14	0.19	0.24	91.23	81.50	85.07	90.97
K_2	0.06	0.04	0.18	0.04	84.81	92.10	87.22	80.11
K_3	0.20	0.45	0.38	0.07	93.11	89.61	84.90	76.07
K_4	0.41	0.24	0.16	0.40	73.67	85.77	80.55	85.32
K_5	0.12	0.21	0.17	0.35	76.17	70.0	81.24	86.50
R	0.35	0.41	0.20	0.36	19.44	22.10	6.67	14.90

表 9 各因素影响程度顺序

Table 9 Order of various factors' influencing degree

指标	质量损失率	相对动弹性模量
25 次冻融循环	B, D, A, C	B, A, D, C
50 次冻融循环	B, C, D, A	B, D, A, C
75 次冻融循环	B, C, A, D	B, D, A, C

为了评估误差对复合掺合料机制砂混凝土性能的影响，对数据进行方差分析。25 次冻融循环作用方差分析结果如表 10 所示。其中 F 值越高，表明影响越显著。复合掺合料机制砂混凝土在 25 次冻融循环后的质量损失率影响因素显著程度由大到小排序

依次为 D, B, A, C; 相对动弹性模量的影响因素显著程度由大到小排序依次为 B, A, D, C, 与极差分析结果一致。

表 10 25 次冻融循环作用方差分析结果

Table 10 Variance analysis result after 25 freezing-thawing cycles

指标	方差源	平方和	自由度	均方	显著性系数 F	显著性
质量损失率/%	A	0.38	4	0.10	1.58	0.27
	B	0.47	4	0.12	1.93	0.20
	C	0.16	4	0.04	0.68	0.63
	D	0.53	4	0.13	2.19	0.16
相对动弹性模量/%	A	1 518.66	4	379.67	4.71	0.03
	B	1 511.25	4	377.81	4.69	0.03
	C	158.30	4	39.57	0.49	0.74
	D	671.74	4	167.94	2.08	0.18

同理可以得到复合掺合料机制砂混凝土在 50 次和 75 次冻融循环后的质量损失率和相对动弹性模量的影响因素显著程度排序。除 25 次冻融循环后的质量损失率影响因素的主次顺序略有不同外, 其他情况下质量损失率的影响因素显著程度由大到小排序均依次为 B, C, A, D。造成这种差异的主要原因是由于在冻融初期, 部分试件出现了质量增加的现象, 而后期则不再受此影响, 质量损失趋于稳定, 从而导致初期和后期的结果存在差异, 各影响因素影响程度如表 11 所示。综上, 复合掺合料机制砂混凝土抗冻性能最优显著程度由大到小排序依次为 B, D, A, C; 最优配合比为机制砂取代率 75%, 石粉含量 9%, 钢渣掺量 20%, 硅灰掺量 5%。

表 11 各影响因素影响程度

Table 11 Degrees of various influencing factors

冻融循环/次	质量损失率	相对动弹性模量
25	D, B, A, C	B, A, D, C
50	B, C, A, D	B, A, D, C
75	B, C, A, D	B, A, D, C

2.3 各因素对抗冻性能的影响

为了能够更加直观地分析各因素水平的变化对复合掺合料机制砂混凝土抗冻性能的影响, 分析了单因素对观测水平变量的影响, 并结合极差方差分析结果, 得出以下结论。

(1) 机制砂取代率对混凝土抗冻性能的影响如图 2 所示。由图可知, 不同机制砂取代率在前 75 次冻融循环质量损失率及相对动弹性模量间变化较大,

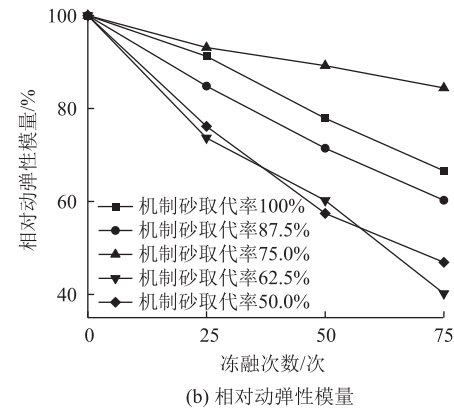
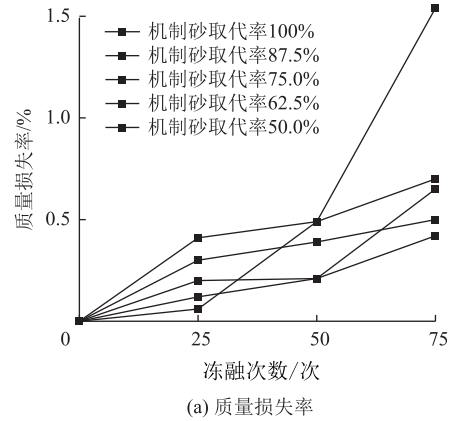


图 2 机制砂取代率对混凝土抗冻性能的影响

Fig. 2 Influence of manufactured sand substitute rate on concrete frost resistance

以相对动弹性模量为主, 质量损失率及表面观察为辅助判别依据, 最优配比均为 75.0%的取代率。

图 2 (a) 中, 87.5%取代率在 25 次循环后质量损失速率增加, 主要是由于该级配的机制砂在初期的冻融循环中, 混凝土内部的孔隙还不够连通, 导致水分进入混凝土内部的能力相对较弱, 从而减少了质量损失, 50.0%取代率在 50 次循环后也产生同样变化。

图 2 (b) 中, 在 25 次循环后 62.5%取代率相对动弹性模量下降速率变缓, 优于 50.0%取代率, 随后速率增加使得相对动弹性模量加速减小, 还有快速下降的趋势。主要是由于该取代率随着循环次数的增加, 材料在前期阶段的相变和微裂纹形成并不明显, 而在后期阶段, 材料内部发生相变和微裂纹形成, 导致材料的弹性模量发生变化, 从而影响其动弹性模量的特性。

机制砂取代率在一定范围内提高时有利于抗冻性能的提升, 然而, 当机制砂取代率超过 75.0%时, 抗冻性能的改善效果逐渐减弱, 甚至出现下降趋势。因此, 在实际应用中, 应根据具体的环境条件和工

程需求,选择适宜的机制砂取代率。适当的机制砂取代率可以改善混凝土的抗冻性能。其主要原因是机制砂颗粒形状规整,粒度分布较好,与水泥胶凝体结合紧密,因此制成的混凝土结构件表面平整、孔隙率低,能够减少水分在混凝土中的渗透和凝结,从而提高混凝土的抗冻性能。正因为机制砂的颗粒形状和粒度分布均匀,易于搅拌和浇注,且具有较好的流动性和可塑性,所以能够保证混凝土结构件的质量和均匀性,一定情况下能够提高混凝土的抗冻性能。

(2) 石粉含量对混凝土抗冻性能的影响如图3所示。由图可知,随石粉含量增加,前75次冻融循环质量损失率大概呈现增加趋势,而相对动弹性模量整体呈现下降趋势,最优配比均为9%。

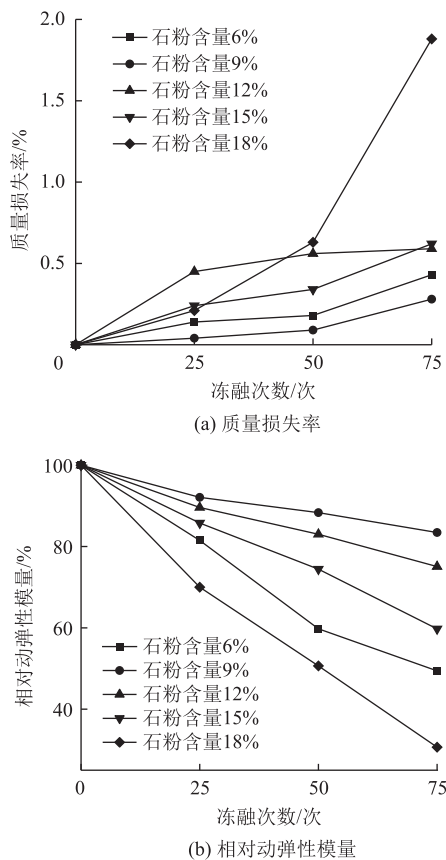


图3 石粉含量对混凝土抗冻性能的影响

Fig. 3 Influence of stone powder content on concrete frost resistance

图3(a)中,18%石粉含量为在25次循环前质量损失相对稳定,随后损失速率骤增,主要原因是在初期的冻融中,大量的石粉填充效应^[24]可以使孔隙率变小,阻止水分进入混凝土内部的能力相对较好,减少了质量损失。随着循环次数的增加,石粉逐渐被冻融循环中产生的应力破坏,导致其填充效

应减弱,进而加速了质量损失的发生。12%石粉含量相较于其他含量在前期损失率较其他组高,50次循环后质量损失速率趋于稳定。主要原因是较高的石粉含量导致混凝土内部的微观结构发生变化,形成更多的微裂纹。这些微裂纹会在循环加载中逐渐扩展和扩大,导致质量损失速率增加。然而,在经过多次循环后,微裂纹的扩展趋于稳定,从而使质量损失速率也趋于稳定。图3(b)中可以明显发现石粉含量为18%时随冻融循环次数增加相对动弹性模量值下降明显较快,与质量损失率曲线基本对应。总体看来,石粉含量在9%~12%区间时有利于机制砂混凝土的抗冻性能。

适当的石粉含量有利于抗冻性能。机制砂混凝土中适当的石粉含量不仅可以改善机制砂的物理性能和抗冻性能,还能增强砂浆体系的密实性和强度,并增加砂的表面积,提高与水泥等胶结材料的黏结能力。这些特性可以使机制砂更加坚固和耐久。另外,适量的石粉含量还可以增加机制砂的孔隙度,使其更易于透水 and 透气,防止在低温条件下由于水分凝结而导致的冻胀破坏。但是,如果石粉含量过高,会使机制砂的颗粒分布不均匀,从而降低砂的整体强度和稳定性。

(3) 钢渣掺量对混凝土抗冻性能的影响如图4所示。由图可知,前75次冻融循环质量损失率随钢渣掺量增加呈现先减小后增大的趋势;而相对动弹性模量随钢渣掺量增加呈现逐渐减小趋势;其中质量损失率最小为27.5%,相对动弹性模量最大为20.0%。

图4(a)中,20.0%掺量在25次循环后质量损失速率增加,主要是由于较低掺量的钢渣可以填充细微空隙并提高混凝土的密实性,从而减少水分的渗透和冻融引起的损伤。然而,随着循环次数的增加,钢渣颗粒与水泥基体之间的结合逐渐减弱,导致质量损失率增加。图4(b)中,随着冻融次数的增加,27.5%掺量下降速率增加,在25次循环后趋于稳定,主要是27.5%钢渣掺量对混凝土内部结构的影响更为显著,引起了更多的微观结构破坏和孔隙扩大。这导致混凝土的强度和稳定性受到更大的损害,进而加速了相对动弹性模量的下降速率。

适量的钢渣掺量可以改善混凝土的抗冻性能。其主要原因是钢渣中含有大量玻璃体和无定形物质,适量钢渣可使这些物质填充在混凝土的孔隙中,改善混凝土的密实性和均匀性,同时钢渣中的钙硅酸盐和水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行二次水化反应,从

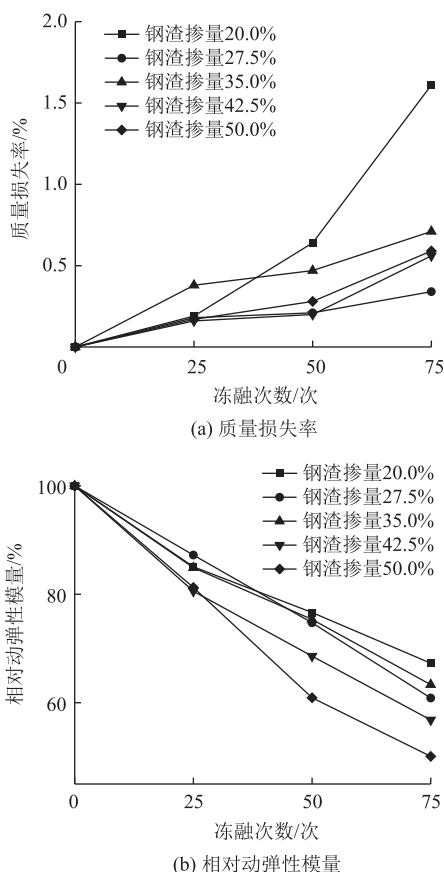


图4 钢渣掺量对混凝土抗冻性能的影响

Fig. 4 Influence of steel slag content on concrete frost resistance

而提高混凝土的抗渗性和抗冻性。然而,过量的钢渣掺量会对抗冻性能产生不利影响。首先,增加钢渣使用量会增加其中的硫酸盐,导致水化反应不完全,降低混凝土的强度和抗冻性能。其次,钢渣掺量过大会增加硅酸盐和非晶态氧化物的占比,且与水泥胶体和骨料颗粒之间的结合降低,从而导致多余孔的产生。这些颗粒和孔隙会吸收和储存水分,当温度下降时,水分结冰引起相变,并伴随体积膨胀,从而降低混凝土的抗冻性能。

(4) 硅灰掺量对混凝土抗冻性能的影响如图5所示。由图可知,随硅灰掺量增加前75次冻融循环质量损失率先增高后降低;相对动弹性模量与之相反,二者相对最优配比均为5.0%。图5(a)中硅灰掺量7.5%在25次循环后质量损失速率增加,10.0%掺量在50次循环后质量损失速率增加。由于硅灰掺量较少时,不能充分填充混凝土中的孔隙和微裂缝。在冻融循环过程中,混凝土中的水分会通过毛细作用迁移,并在孔隙和微裂缝中结冰,导致体积膨胀,进一步损伤混凝土的结构。图5(b)中

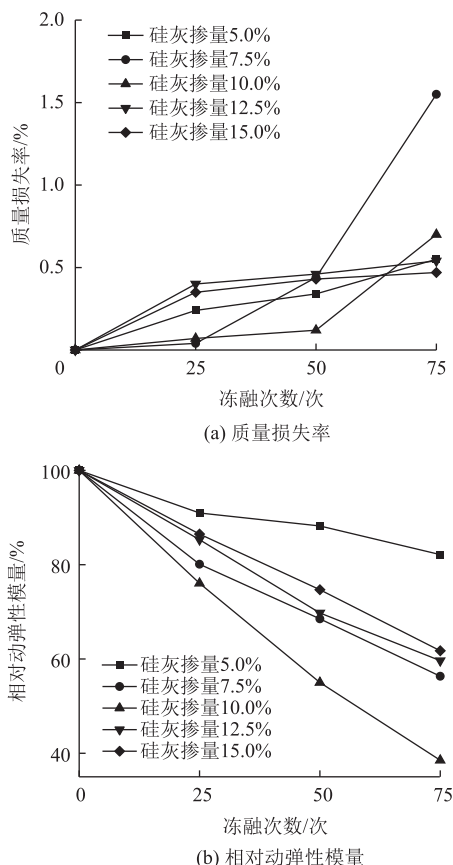


图5 硅灰掺量对混凝土抗冻性能的影响

Fig. 5 Influence of silica fume content on concrete frost resistance

硅灰掺量5.0%时抗冻性能最好,在掺量10.0%时下降到谷值,随后到掺量15.0%时抗冻性能有所增加。其主要原因是硅灰中含有大量细小的硅酸盐晶体,少量硅灰掺量使这些晶体能够填充混凝土中的孔隙,提高混凝土的密实性和均匀性,从而改善混凝土的抗冻性。

适量的硅灰有利于改善抗冻性,硅灰能够反应生成C—S—H凝胶,并与水泥反应生成额外的水化产物,进一步增强混凝土的强度和耐久性。随着硅灰掺量的增加,大量的硅灰掺量会导致混凝土中的硅酸盐晶体填充过多,使得混凝土的孔隙率过低,空隙过小,从而影响混凝土的透气性和抗渗性,甚至导致混凝土的开裂和剥落,降低混凝土的抗冻性能。再次增加硅灰掺量,当硅灰掺量过高时,混凝土的孔隙率又会增加,使得混凝土更易于透气和透水,从而提高混凝土的抗冻性能。

3 结论

为研究机制砂取代率、机制砂中石粉含量、双

掺钢渣和硅灰掺量对复掺机制砂混凝土抗冻性能的影响程度,通过设计 25 组正交试验,采用质量损失率、相对动弹性模量及破坏形态等指标评估机制砂混凝土的抗冻性能。

(1) 通过正交试验结果所得到的复合掺合料机制砂混凝土抗冻性能最优配合比为:机制砂取代率 75%,石粉含量 9%,钢渣掺量 20%,硅灰掺量 5%。

(2) 随着硅灰掺量的增加,机制砂混凝土抗冻性能呈现先减小后增大的趋势,随着钢渣掺量的增加,抗冻性能有减小的趋势。复合掺合料总掺量不超过 40%,其中钢渣掺量不超过 35%,硅灰掺量不超过 5%的情况下,有助于提高机制砂混凝土的抗冻性能。

(3) 石粉含量是机制砂混凝土抗冻性能最重要的影响因素,可以适当增加石粉含量至 9%~15%,使机制砂混凝土的抗冻性能最优。机制砂混凝土抗冻性能显著程度由强到弱排序为石粉含量、硅灰掺量、机制砂取代率、钢渣掺量。

参考文献:

References:

- [1] 刘保忠, 巩天真. 复合外掺料对机制砂混凝土性能影响的分析 [J]. 混凝土, 2023 (6): 180-182.
LIU Baozhong, GONG Tianzhen. Analysis and research on the performance of manufactured sand concrete with composite admixtures [J]. Concrete, 2023 (6): 180-182.
- [2] 张雪楠. 机制砂对混凝土性能影响研究现状 [J]. 北方建筑, 2021, 6 (4): 52-55.
ZHANG Xuenan. Research status of effect of manufactured sand on concrete performance [J]. North Building, 2021, 6 (4): 52-55.
- [3] GONÇALVES J P, TAVARES L M, TOLEDO FILHO R D, et al. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 (6): 924-932.
- [4] SELVA G M, JAGADEESH P. Assessment of usage of manufactured sand and recycled aggregate as sustainable concrete: A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 64 (2): 1029-1034.
- [5] INGALKAR R S, HARLE S M. Replacement of natural sand by crushed sand in the concrete [J]. Landscape Architecture and Regional Planning, 2017, 2 (1): 13-22.
- [6] 李惠民. C60 机制砂泵送混凝土在两河口水电站木绒大桥悬臂梁的应用研究 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (12): 109-114.
- [7] LI Huimin. Application of C60 machine-made sand pumped concrete in cantilever beam of Murong Bridge of Lianghekou hydropower station [J]. Building Structure, 2019, 49 (12): 109-114.
- [7] 余川. 机制砂在巴南高速公路中的应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
YU Chuan. Application of manufactured sand in Bazhong-Nanchong expressway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [8] WU H M, SHEN B, MA K J, et al. Assessment of mechanical properties of C80 concrete prepared with different stone powder contents by a statistical analysis [J/OL]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104754. (2022-09-15) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104754>.
- [9] DING X X, LI C Y, XU Y Y, et al. Experimental study on long-term compressive strength of concrete with manufactured sand [J]. Construction and Building Materials, 2016, 108: 67-73.
- [10] MUNDRA S, SINDHI P R, CHANDWANI V, et al. Crushed rock sand: An economical and ecological alternative to natural sand to optimize concrete mix [J]. Perspectives in Science, 2016, 8: 345-347.
- [11] 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]. Construction and Building Materials, 2016, 109: 41-46.
- [12] KUMAR K P, RAMESH P S, ARAVINDA P T. Effect of fines on strength and durability of concrete with manufactured sand [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 66: 2381-2386.
- [13] 林洪法. 石粉含量对中高强度机制砂混凝土耐久性影响 [J]. 福建交通科技, 2018, 2 (2): 44-46.
LIN Hongfa. Effect of stone powder content on the durability performance of low and medium strength mechanism sand concrete [J]. Fujian Transportation Science and Technology, 2018, 2 (2): 44-46.
- [14] 王稷良, 周明凯, 贺图升, 等. 石粉对机制砂混凝土抗渗透性和抗冻融性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2008, 36 (4): 482-486.
WANG Jiliang, ZHOU Mingkai, HE Tusheng, et al. Effects of stone dust on resistance to chloride ion permeation and resistance to freezing of manufactured sand concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36 (4): 482-486.
- [15] GENÇEL O, KARADAG O, OREN O H, et al. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A

- review [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122783. (2021-05-10) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122783>.
- [16] SUN X S, LI Y J, WEI X L, et al. High contents of steel slag in the road concrete: Hydration mechanism, mechanical property and durability performance [J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132703. (2023-10-12) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132703>.
- [17] 丁向群, 周睿彤, 王钰. 硅灰对混凝土抗冻性能及其孔结构的影响 [J]. 混凝土, 2017 (2): 53-55.
DING Xiangqun, ZHOU Ruitong, WANG Yu. Effect of silica fume on the frost resistance and pore structure of concrete [J]. Concrete, 2017 (2): 53-55.
- [18] SHEN L H, LI Q H, GE W, et al. The mechanical property and frost resistance of roller compacted concrete by mixing silica fume and limestone powder: Experimental study [J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117882. (2020-04-10) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117882>.
- [19] DHIVYA K, ANUSHA G, VINOTH S, et al. Steel slag's effect on concrete mechanical properties and durability [J/OL]. Materials Today: Proceeding (2023-05-24) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.330>.
- [20] 朱训国, 王利芬, 赵双, 等. 钢渣混凝土抗冻与抗渗性能研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45 (3): 106-109.
ZHU Xunguo, WANG Lifen, ZHAO Shuang, et al. Study on frost resistance and impermeability of steel slag concrete [J]. Sichuan Building Science, 2019, 45 (3): 106-109.
- [21] 叶穆平, 李威, 原宝盛. 硅灰透水混凝土强度性能和冻融耐久性试验研究 [J]. 西部交通科技, 2021 (8): 54-56.
YE Muping, LI Wei, YUAN Baosheng. Experimental study on strength properties and freeze-thaw durability of silica fume pervious concrete [J]. Western Transportation Science and Technology, 2021 (8): 54-56.
- [22] BRESCIA-NORAMBUENA L, GONZALEZ M, AVUDAIAPPAN S, et al. Improving concrete underground mining pavements performance through the synergic effect of silica fume, nanosilica, and polypropylene fibers [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122895. (2021-05-24) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122895>.
- [23] 李重阳, 司政, 云甲. 片麻岩石粉、硅灰对混凝土抗冻性能的影响研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (16): 85-90.
LI Chongyang, SI Zheng, YUN Jia. Study on influence of gneiss stone powder and silica fume on freezing resistance of concrete [J]. Building Structure, 2023, 53 (16): 85-90.
- [24] 赵尚传, 刘龙龙, 刘忠凯, 等. 考虑石粉含量的机制砂混凝土配合比设计方法研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (8): 37-42.
ZHAO Shangchuan, LIU Longlong, LIU Zhongkai, et al. Study on mix design method of manufactured sand concrete considering stone powder content [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (8): 37-42.