

石粉 - 纤维海水海砂混凝土力学性能研究

余宗毓¹, 詹春涛^{1*}, 柳亚男², 兰 聪¹, 何炳泽¹

¹辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

²辽宁工业大学后勤基建处, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年2月6日; 录用日期: 2026年2月25日; 发布日期: 2026年3月6日

摘 要

为探究石粉、玄武岩纤维对海水海砂力学性能影响, 从立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和轴心抗压强度三个方面进行试验。研究表明, SSC-D₀B₂组较基准组立方体抗压强度提升约12.8%; SSC-D₁B₃组劈裂抗拉强度较基准组提高约71.2%; SSC-D₁B₂组轴心抗压强度较基准组提高约23.5%。说明石粉、玄武岩纤维对海水海砂混凝土力学性能有显著提升效果。

关键词

海水海砂混凝土, 石粉, 玄武岩纤维, 力学性能

Study on the Mechanical Properties of Stone Powder-Fiber Seawater-Sea Sand Concrete

Zhongyu Yu¹, Chuntao Zhan^{1*}, Yanan Liu², Cong Lan¹, Bingzhe He¹

¹College of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Logistics and Infrastructure Department, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: February 6, 2026; accepted: February 25, 2026; published: March 6, 2026

Abstract

To investigate the effects of stone powder and basalt fiber on the mechanical properties of concrete made with seawater and sea sand, experiments were conducted in three aspects: cube compressive

*通讯作者。

文章引用: 余宗毓, 詹春涛, 柳亚男, 兰聪, 何炳泽. 石粉-纤维海水海砂混凝土力学性能研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(3): 297-303. DOI: 10.12677/aep.2026.163030

strength, splitting tensile strength, and axial compressive strength. The research results indicate that the cube compressive strength of the SSC-D₀B₂ group increased by about 12.8% compared to the reference group; The SSC-D₁B₃ group's splitting tensile strength increased by approximately 71.2% compared to the reference group. The axial compressive strength of the SSC-D₁B₂ group increased by about 23.5% compared to the reference group. It indicates that mica powder and basalt fiber have a significant enhancing effect on the mechanical properties of seawater-sea sand concrete.

Keywords

Seawater and Seawater Sand Concrete, Stone Powder, Basalt Fiber, Mechanical Performance

Copyright © 2026 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

砂石骨料作为工程建设中用量最大、不可或缺的基础建材，其供应稳定性直接支撑我国基础设施建设的规模化推进。2024年全国砂石骨料需求量已攀升至136.89亿吨，市场需求的刚性增长与资源供给的矛盾日益凸显[1]。

对于沿海地区跨海大桥、沿岸港口、滨海新区基础设施等大型海工项目而言，传统混凝土制备依赖内陆河砂与淡水，存在两大核心瓶颈：一是河砂资源储量有限，成为制约工程建设的重要因素[2]；二是内陆河砂与淡水向沿海地区远距离运输，需承担高额运输成本，还易因运输延误影响施工工期，降低工程建设效率[3]。相比之下，沿海地区海水、海砂可实现就地取材，既能有效破解河砂资源短缺与运输不便的难题，还能降低工程建设成本，是适配沿海大型基建项目的优质建材资源[4]。

海砂中含有的大量氯离子及可溶性盐类，会对混凝土结构及内部钢筋造成严重腐蚀破坏，成为制约海水海砂规模化应用于海工混凝土的关键技术瓶颈[5]。氯离子易穿透混凝土保护层，破坏钢筋表面钝化膜，加速钢筋锈蚀进程，锈蚀产生的体积膨胀会导致混凝土开裂、剥落，显著降低混凝土结构的强度、抗渗性及耐久性，严重威胁建筑物在恶劣海洋环境中的服役安全与使用寿命[6]。因此，研发适配海水海砂的耐蚀改性技术，提升海工混凝土的抗腐蚀性能，成为推动沿海基建高质量发展的迫切需求。

石粉作为砂石加工过程中产生的副产物，储量丰富、成本低廉，作为混凝土掺合料具有良好的应用潜力，其可通过填充混凝土内部孔隙、优化浆体微观结构、降低孔隙率及孔隙连通性，提升混凝土的致密性与抗渗抗蚀能力，同时改善海水海砂混凝土的工作性能与力学性能[7]。玄武岩纤维作为一种新型绿色高性能纤维材料，具有强度高、耐腐蚀性优、与混凝土界面黏结性好等特点，将其掺入海水海砂混凝土中，可有效抑制混凝土裂缝的萌生与扩展，增强混凝土的抗拉、抗裂及抗冲击性能，同时能协同延缓氯离子渗透及钢筋锈蚀速率[8][9]。基于此，采用石粉与玄武岩纤维复合改性方案，可充分发挥二者协同增效作用，针对性解决海水海砂混凝土的腐蚀难题，提升其在海洋环境中的服役性能。

目前，国内外关于单一掺合料或纤维对海水海砂混凝土性能的影响已有部分研究，但针对石粉与玄武岩纤维复合改性海水海砂混凝土的系统性研究仍存在不足，二者协同作用机制及对混凝土长期耐蚀性能的影响尚未明确[10]。本文立足沿海工程建设实际需求，聚焦石粉与玄武岩纤维复合改性海水海砂混凝土的制备技术，探究二者对海水海砂混凝土力学性能及抗腐蚀性能的调控作用，明确协同改性机制，弥补该领域研究空白，为海水海砂在海工工程中的规模化、安全化应用提供理论支撑与技术参考。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验材料

试验采用海砂作为细骨料，海砂采用锦州市笔架山附近海域收集的海砂，海砂的物理性能指标为：细度模数为 2.45、含泥量率 2.28%，检测后氯离子含量为 0.026%。粗骨料采用锦州本地的碎石，粒径 5~20 mm。水泥选用渤海牌普通硅酸盐水泥 42.5。海水取至辽宁省锦州市笔架山风景区的海域。BF (玄武岩纤维)和白云石粉作为掺合料，纤维长度 12 mm，生产商家为浙江省海宁安捷复合材料有限公司；白云石粉来自河北省灵寿县盛峰矿产品加工厂。

2.2. 试验配合比设计

配合比设计按照《普通混凝土配合比设计规程》进行设计，混凝土强度等级设为 C40，水胶比为 0.46，砂率为 0.35。试验设置不同的 BF 和白云石粉掺量。白云石粉掺量分别为 0 kg/m³、47.5 kg/m³、95 kg/m³、142.5 kg/m³，替代水泥率分别为 0、10%、20%、30%；BF 掺量(按 1 m³ 混凝土体积)分别为 0%、0.1%、0.2%、0.3%。以不掺 BF 和白云石粉的 SSC 组作为对照组，具体配合比见表 1。

Table 1. Mix ratio
表 1. 配合比

组别	编号	海水(kg/m ³)	海砂(kg/m ³)	粗骨料(kg/m ³)	水泥(kg/m ³)	白云石粉(kg/m ³)	BF (%)
1	SSC	218.5	607.78	1128.73	475	0	0
2	SSC-D ₁ B ₀	218.5	607.78	1128.73	427.5	47.5	0
3	SSC-D ₂ B ₀	218.5	607.78	1128.73	380	95	0
4	SSC-D ₃ B ₀	218.5	607.78	1128.73	332.5	142.5	0
5	SSC-D ₀ B ₁	218.5	607.78	1128.73	475	0	0.1
6	SSC-D ₀ B ₂	218.5	607.78	1128.73	475	0	0.2
7	SSC-D ₀ B ₃	218.5	607.78	1128.73	475	0	0.3
8	SSC-D ₁ B ₁	218.5	607.78	1128.73	427.5	47.5	0.1
9	SSC-D ₁ B ₂	218.5	607.78	1128.73	427.5	47.5	0.2
10	SSC-D ₁ B ₃	218.5	607.78	1128.73	427.5	47.5	0.3
11	SSC-D ₂ B ₁	218.5	607.78	1128.73	380	95	0.1
12	SSC-D ₂ B ₂	218.5	607.78	1128.73	380	95	0.2
13	SSC-D ₂ B ₃	218.5	607.78	1128.73	380	95	0.3
14	SSC-D ₃ B ₁	218.5	607.78	1128.73	332.5	142.5	0.1
15	SSC-D ₃ B ₂	218.5	607.78	1128.73	332.5	142.5	0.2
16	SSC-D ₃ B ₃	218.5	607.78	1128.73	332.5	142.5	0.3

2.3. 试验方法

按照标准试验方法制备混凝土试件，试件尺寸满足立方体抗压强度、劈拉强度和轴压强度测试要求。养护至规定龄期(28 天)后，采用压力试验机测定立方体抗压强度、劈拉强度和轴心抗压强度，如图 1 所示。



Figure 1. Mechanical properties measurement
图 1. 力学性能测定

3. 试验结果与分析

各项力学性能试验数据见表 2。

Table 2. Mechanical properties data
表 2. 力学性能数据表

试件 组别	BF 掺量(%)	白云石粉 掺量(kg/m ³)	抗压强度 (MPa)	劈拉强度 (MPa)	轴压强度 (MPa)
SSC	0	0	40.4	3.19	36.57
SSC-D ₁ B ₀	0	47.5	44.15	3.97	45.03
SSC-D ₂ B ₀	0	95	42.11	3.95	40.78
SSC-D ₃ B ₀	0	142.5	37.51	3.59	37.57
SSC-D ₀ B ₁	0.1	0	42.64	4.86	44.24
SSC-D ₀ B ₂	0.2	0	45.58	5.01	45.01
SSC-D ₀ B ₃	0.3	0	40.58	5.23	40.82
SSC-D ₁ B ₁	0.1	47.5	42.76	4.83	43.33
SSC-D ₁ B ₂	0.2	47.5	45.35	5.04	45.18
SSC-D ₁ B ₃	0.3	47.5	41.2	5.46	42.24
SSC-D ₂ B ₁	0.1	95	43.88	4.32	42.93
SSC-D ₂ B ₂	0.2	95	44.72	4.44	43.51
SSC-D ₂ B ₃	0.3	95	41.8	5.03	42.64
SSC-D ₃ B ₁	0.1	142.5	41.38	3.81	41.72
SSC-D ₃ B ₂	0.2	142.5	44.22	4.19	41.92
SSC-D ₃ B ₃	0.3	142.5	40.42	4.26	38.88

3.1. 立方体抗压数据分析

由图 2 可以看出, 当纤维掺量 0.2%、石粉掺量 0 时, 即 SSC-D₀B₂ 组强度最高为 45.58 Mpa, 当纤维

掺量 0、石粉掺量 30%时, 即 SSC-D₃B₀ 组强度最低为 37.51 Mpa, 且低于基准对照组; 由单石粉系列可以看出, 随着石粉掺量从 0 增加到 10%时, 抗压强度从 40.4 MPa 提升至 44.15 MPa, 随着掺量进一步增大, 强度随之减小, 掺入适量的石粉填充了混凝土内部孔隙, 使结构更加密实, 增强了混凝土的骨架作用。但当石粉掺量继续增加时, 抗压强度降低, 说明过量的石粉会干扰水泥水化反应, 降低混凝土强度。再对比石粉掺量相同情况下, 随着纤维掺量的增加, 混凝土立方体抗压强度呈现先增加后减小趋势, 当纤维掺量为 0.2%时, 对抗压强度提升效果最佳。纤维的加入也可以增加混凝土基体的密实度, 同时掺量过大可能会出现团聚现象, 使得混凝土抗压强度降低。

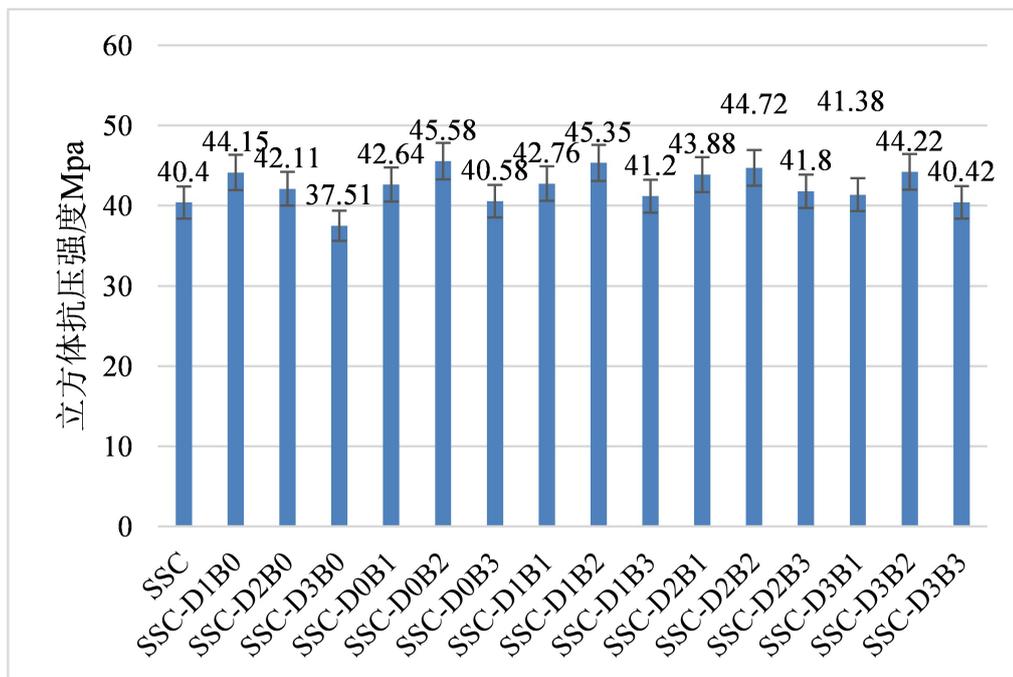


Figure 2. Compressive strength of cubes
图 2. 立方体抗压强度

3.2. 劈裂抗拉数据分析

由图 3 可以看出, 当纤维掺量 0.3%、石粉掺量 10%时, 即 SSC-D₁B₃ 组劈裂抗拉强度最高为 5.46 Mpa, 基准组 SCC 劈裂抗拉强度最低为 3.19 Mpa; 由单石粉系列可以看出, 石粉掺量从 10%增加到 30%, 试块劈裂抗拉强度 3.97 Mpa 降到 3.95 Mpa, 逐步降低, 石粉掺量与劈裂抗拉强度增长呈反比例关系, 但掺入石粉的试块劈裂抗拉强度均高于基准组, 掺入适量石粉可以增加基体密实度, 但掺入过量影响水泥水化反应使其对试块劈裂抗拉强度的提升起到负面作用。在石粉掺量相同情况下, 随着纤维掺量的增加, 混凝土立方体劈裂抗拉强度呈现上升趋势, 当纤维掺量为 0.3%时, 对劈裂抗拉强度提升效果最佳, 这是因为纤维的加入能够帮助混凝土基体承担一部分拉力, 使试块抗拉强度大大提升。

3.3. 轴心抗压数据分析

由图 4 可以看出, 当纤维掺量 0.2%、石粉掺量 10%时, 即 SSC-D₁B₂ 组轴心抗压强度最高为 45.18 Mpa, 基准组 SCC 轴心抗压强度最低为 36.57 Mpa, 由单掺石粉系列可以看出, 随着石粉掺量从 10%增加到 30%时, 轴心抗压强度从 45.03 MPa 提升至 37.57 MPa, 随着石粉掺量增大, 轴心抗压强度随之减

小,呈负相关关系,但掺入石粉后轴心抗压强度均高于基准组;说明掺入石粉可以填充混凝土内部空洞,增加密实度从而提高强度。但掺量过多由影响水泥水化反应使强度提升幅度减弱。在对比石粉掺量不变情况,随着纤维掺量的增加,试块轴心抗压强度先增加后减小,纤维掺量 0.1%轴心抗压强度略低于掺量 0.2%时,纤维掺量 0.1%时轴心抗压强度最小仅略高于基准组,纤维掺量 0.2%时达到最大值。分析原因与立方体抗压强度类似,适量纤维可以增加密实度提高强度,但掺量过大会导致纤维均匀性不好,局部成团对强度产生负面影响。

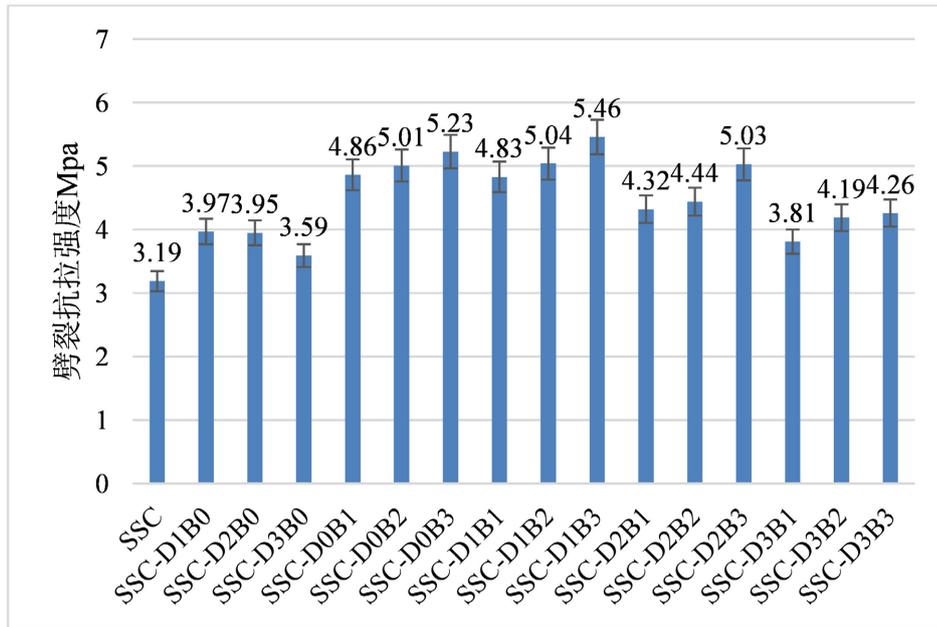


Figure 3. Splitting tensile strength
图 3. 劈裂抗压强度

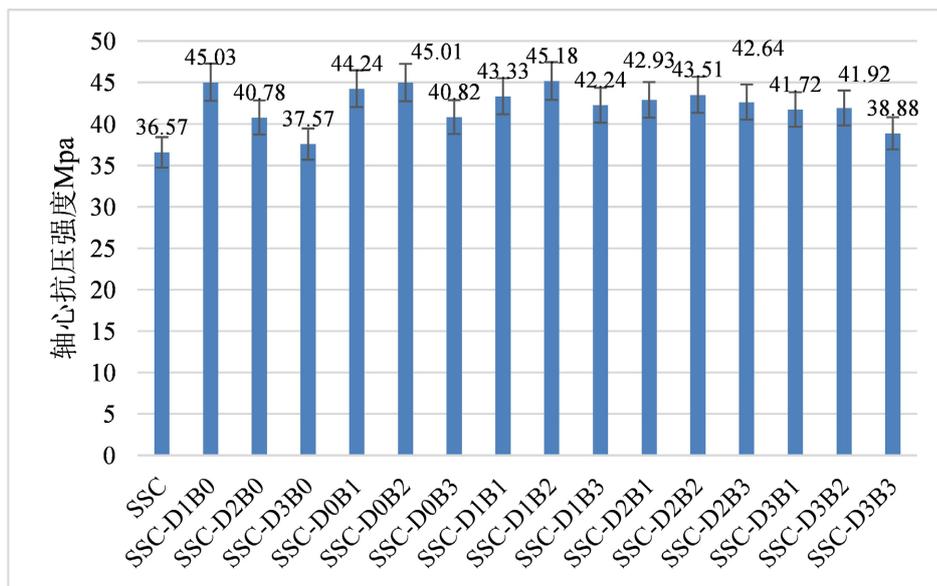


Figure 4. Axial compressive strength
图 4. 轴心抗压强度

4. 结论

(1) 单掺石粉与石粉-纤维混掺均能提高试块各项力学性能, 当纤维掺量 0.2%、石粉掺量 0 时, 即 SSC-D₀B₂ 组立方体抗压强度最高 45.58 Mpa, 较基准组 SCC 提高约 12.8%。

(2) 当纤维掺量 0.3%、石粉掺量 10%时, 即 SSC-D₁B₃ 组劈裂抗拉强度最高为 5.46 Mpa, 较基准组 SCC 提高约 71.2%。

(3) 当纤维掺量 0.2%、石粉掺量 10%时, 即 SSC-D₁B₂ 组轴心抗压强度最高为 45.18 Mpa, 较基准组 SCC 提高约 23.5%。

(4) 综合各项力学性能与经济成本考量, 纤维掺量 0.2%、石粉掺量 10%即 SSC-D₁B₂ 组为掺量最优解。

基金项目

辽宁工业大学 2024 年大学生创新创业训练项目(X202410154141)。

参考文献

- [1] 中国砂石协会. 2024 年中国砂石骨料行业分析报告[R]. 北京: 中国砂石协会, 2024.
- [2] 王秉纲, 张久鹏. 公路工程砂石资源可持续利用关键技术研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 1-12.
- [3] 李建勇, 刘敏, 张磊. 沿海地区海砂替代河砂用于混凝土工程的经济性分析[J]. 施工技术, 2023, 52(11): 89-93.
- [4] 陈正, 王丽. 海水海砂混凝土在滨海基础设施建设中的应用现状与发展趋势[J]. 海洋工程, 2021, 39(4): 145-154.
- [5] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
- [6] 张兴昌, 李鹏, 王鹏. 氯离子侵蚀下混凝土结构耐久性评估方法研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 1-10.
- [7] 刘数华, 方坤河, 陈培荣. 石粉对机制砂混凝土微观结构及力学性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(5): 34-39.
- [8] 杨彦克, 赵军, 李艳. 玄武岩纤维对海砂混凝土抗裂性能及抗氯离子渗透性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 321-327.
- [9] 崔自治, 张凯, 刘娟. 玄武岩纤维增强海砂混凝土的力学性能与耐久性研究[J]. 混凝土, 2022(8): 78-82.
- [10] 张明, 李丽, 王浩. 海砂混凝土改性技术研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(12): 1-10.