

花岗岩石粉复合矿粉、粉煤灰对混凝土性能的影响

Effect of Granite-stone Powder Compound Mineral Powder and Fly Ash on Concrete Properties

李崇智¹, 王琬怡¹, 梁志勇², 谈 珽², 彭家蔓¹, 王 坤¹, 任强伟¹

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 广西宝添环保材料有限公司, 南宁 530001)

摘要: 为加强对花岗岩石粉高效利用和环境可持续发展的重视, 研究花岗岩石粉对矿粉-粉煤灰复合水泥浆体及其制备的 C30 与 C50 混凝土性能的影响。结果表明, 将花岗岩石粉内掺到 1:1 矿粉和粉煤灰中, 内掺 10% 时水泥浆体流动度最大, 内掺超过 30% 时浆体的流动度急剧下降; 对 28 d 水泥胶砂抗压强度的影响在内掺 30% 时达到最优, 对抗折强度影响相对较小; 内掺 15% 的花岗岩石粉复合掺合料应用于 C30 和 C50 混凝土, 新拌混凝土工作性能良好, 无离析泌水现象, 混凝土表面平整, 28 d 抗压强度分别提升至 36.7 和 56.8 MPa; 碳化深度试验表明, 适量的花岗岩石粉能够有效提升混凝土的抗碳化性能。

关键词: 花岗岩石粉; 复合掺合料; 混凝土

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0024-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.005

LI Chongzhi¹, WANG Wanyi¹, LIANG Zhiyong², TAN Ting², PENG Jiaman¹, WANG Kun¹, REN Qiangwei¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Guangxi Baotian Environmental Protection Materials Co., Ltd., Nanning 530001, China)

Abstract: To enhance the emphasis on the efficient utilization of granite powder and sustainable environmental development, the study explores the impact of granite powder on the properties of composite cement slurry consisting of mineral powder and fly ash, as well as the performance of the resulting C30 and C50 concrete. The results show that when the granite powder is mixed into 1:1 mineral powder and fly ash, the fluidity of cement slurry reaches the maximum when the granite powder is mixed with 10%, and the fluidity of slurry decreases rapidly when the granite powder is mixed with more than 30%. The influence on compressive strength of 28 day cement mortar is the largest when 30% is added, and the influence on flexural strength is relatively small. When the composite admixture of 15% granite powder is applied to C30 and C50 concrete, the newly mixed concrete has good workability, no segregation and bleeding problem, the appearance of concrete is smooth, and the 28 day compressive strength increased to 36.7 MPa and 56.8 MPa. The carbonation depth test shows that an appropriate amount of granite powder can effectively improve the carbonation resistance of concrete.

Key words: granite powder; compound admixture; concrete

作者简介: 李崇智 (1969—), 男, 博士, 教授、硕导, 研究方向: 混凝土外加剂和矿物掺合料的研制与应用。

通信作者: 王琬怡 (1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 固废基胶凝材料道路混凝土和镁水泥固化土。

收稿日期: 2023-09-09

0 引言

花岗岩作为一种常见的建筑材料，花岗岩石材经打磨、抛光等工艺处理时产生大量废弃石粉，这些花岗岩石粉若未能得到及时有效的处理与利用，可能堆积成山，占用土地资源，污染环境^[1]。花岗岩石粉仅少量用于人造石材，存量一直在增加，如何加速花岗岩石粉固废资源的综合利用具有现实意义^[2]。因此，探索花岗岩石粉的高值化利用途径，实现其从“废物”到“资源”的转变，具有显著的环保效益和社会经济意义。

目前，矿物掺合料在混凝土领域的应用已颇为广泛，其中矿粉与粉煤灰的双掺体系尤为突出，能够显著减少水泥用量，从而降低生产成本并提升混凝土的性能^[3]。然而，面对日益增长的高性能混凝土需求，现有的矿物掺合料资源显得愈发紧张^[4]。在此背景下，研究将花岗岩石粉作为新型掺合料，部分替代矿粉和粉煤灰，不仅能够促进花岗岩石粉固废的资源化利用，还能有效缓解高性能混凝土矿物掺合料资源短缺的问题^[5]。

近年来，关于花岗岩石粉在混凝土中应用的研究逐步深入，多项研究成果表明，将花岗岩石粉作为辅助胶凝材料掺到混凝土中，可以提高胶材的抗渗性能以及抗干缩性能，但掺量过大会降低混凝土力学性能^[6]；通过优化掺量与粉磨时间参数，可以有效地调控砂浆的自收缩性能^[7]。花岗岩石粉应用于再生混凝土，能显著改善再生混凝土的抗裂、抗压、抗拉性能，同时增强了抗冻耐久性^[8]。复掺花岗岩石粉和沸石粉机制砂混凝土，可以保持新拌混凝土坍落度不变，黏聚性和保水性提高，且劈裂抗拉强度提升最为显著^[9]；花岗岩石粉与硅粉、玻璃微粉等可以改善混凝土的抗渗性和吸水性^[10]，掺花岗岩石粉与粉煤灰混合配制的自密实混凝土，具有优越的抗硫酸盐侵蚀性能^[11]。

聚焦于矿粉与粉煤灰质量比为 1:1 的背景下，探究花岗岩石粉取代部分矿粉与粉煤灰对复合胶凝体系流动度、胶砂抗压及抗折强度的影响规律。以及用掺入花岗岩石粉的复合掺合料替代 45% 的水泥，制备 C30 与 C50 强度等级的混凝土，测试了其工作性、强度及抗碳化性能，为推动花岗岩石粉这一固

废资源的高值化利用提供了新思路。

1 试验

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其物理性能见表 1，水泥基材料的化学成分见表 2；S95 矿粉密度为 2 860 kg/m³，比表面积为 433 m²/kg，28 d 活性指数 95%；Ⅱ级粉煤灰密度为 2 250 kg/m³，比表面积为 410 m²/kg，28 d 活性指数 84%；花岗岩石粉密度为 2 750 kg/m³，比表面积为 589 m²/kg，28 d 活性指数 65%；砂为河砂，中砂，表观密度 2 680 kg/m³；所用石子为 5~20 mm 的玄武岩碎石，表观密度为 2 750 kg/m³；减水剂为粉体聚羧酸减水剂，减水率 30%；水为自来水。

表 1 水泥的物理性能指标

安定性	比表面积/ (m ² /kg)	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
合格	354	165	240	5.0	7.5	27.1	48.3

表 2 原材料主要化学成分

材料名称	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	其他
水泥	5.28	19.83	64.95	2.15	2.96	4.83
矿粉	18.59	20.46	36.38	8.43	4.32	11.82
粉煤灰	34.86	42.53	5.15	3.05	7.76	6.65
花岗岩石粉	12.42	61.22	6.69	4.12	5.34	10.21

1.2 试验设计与测试方法

1.2.1 水泥浆体流动度测试

固定水胶比 0.29，水泥 50%、花岗岩石粉整体替代矿粉-粉煤灰，试验配比见表 3，按照 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》测试浆体流动度。

表 3 水泥净浆试验

编号	花岗岩石粉/%	原材料/g					减水剂
		水泥	矿粉	粉煤灰	花岗岩石粉	水	
C	—	300	—	—	—	87	0.6
CF00	—	150	75.0	75.0	—	87	0.6
CF10	10	150	67.5	67.5	15	87	0.6
CF20	20	150	60.0	60.0	30	87	0.6
CF30	30	150	52.5	52.5	45	87	0.6
CF40	40	150	45.0	45.0	60	87	0.6

1.2.2 水泥胶砂强度测试

设计水胶比 0.5，胶砂比 1:3，具体试验配比见

材料科学

表4。参照标准 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》中规定的方法测试水泥胶砂抗压强度与抗折强度。

1.2.3 混凝土性能测试

制备掺花岗岩石粉复合掺合料 C30 与 C50 混凝土,配合比见表5,参照 CB/T 50080—2011《普通混凝土拌合物性能试验方法》测定混凝土坍落度,按照 GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》测试混凝土抗压强度,根据 SL/T 352—2020

《水工混凝土试验规程》测试混凝土的抗碳化性能。

表4 水泥胶砂试验配比
Table 4 Cement mortar test ratio

编号	花岗岩石粉/%	原材料/g					
		水泥	矿粉	粉煤灰	花岗岩石粉	标准砂	水
C	—	450	—	—	—	1 350	225
G10	10	225	101.25	101.25	22.50	1 350	225
G20	20	225	90.00	90.00	45.00	1 350	225
G30	30	225	78.75	78.75	67.50	1 350	225
G40	40	225	67.50	67.50	90.00	1 350	225

表5 混凝土配合比
Table 5 Mix proportion of concrete

编号	水胶比	原材料/(kg/m ³)							
		水泥	矿粉	粉煤灰	花岗岩石粉	水	砂	石	减水剂
C50-F00	0.36	247.5	101.25	101.25	—	160	698	1 092	7.65
C50-F15	0.36	247.5	86.10	86.10	30.3	160	698	1 092	7.65
C50-F30	0.36	247.5	70.90	70.90	60.7	160	698	1 092	7.65
C30-F00	0.45	220.0	90.00	90.00	—	180	801	1 019	6.80
C30-F15	0.45	220.0	76.50	76.50	27.0	180	801	1 019	6.80
C30-F30	0.45	220.0	63.00	63.00	54.0	180	801	1 019	6.80

2 结果与分析

2.1 浆体流动度

研究水泥50%,矿粉与粉煤灰掺量比为1:1时,花岗岩石粉掺量对浆体的流动性影响试验结果如图1所示。复合浆体的流动度随着花岗岩石粉掺量的增加呈先增加后减小趋势。当花岗岩石粉内掺10%时,与未掺CF00组相比,浆体流动度从210 mm增加到220 mm,增加了4.8%。一方面由于球状粉煤灰包裹在水泥颗粒间起润滑作用,另一方面矿粉填充颗粒间释放出更多的自由水,浆体流动度提高。花岗岩石粉内掺超过30%时,浆体流动度显著降低。这是因为花岗岩石粉中含有层状的云母矿物,减水剂的侧链会进入层间,增强了花岗岩石粉对减水剂的吸附能力,从而降低了减水剂的作用效果^[12];花岗

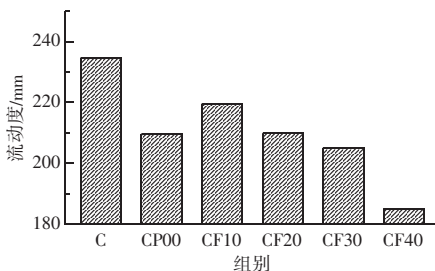


图1 花岗岩石粉对浆体流动度的影响

Fig.1 Effect of granite powder on slurry fluidity

石粉、矿粉以及粉煤灰的细度均比水泥小,细小颗粒填充后可以嵌入水泥颗粒间,减小浆体内部颗粒的距离,增大了絮凝结构的量,浆体的黏聚性得到提高;同时粉煤灰的掺量随花岗岩石粉的替代量增加而降低,滚珠作用效果减弱,导致流动度减小。

2.2 胶砂强度

内掺花岗岩石粉10%、20%、30%、40%,胶砂试验结果如图2所示。随着花岗岩石粉的掺量增加,矿粉与粉煤灰的掺量减小,胶砂抗压强度在不同的养护龄期呈先增加后减小趋势,但变化幅度不大。花岗岩石粉内掺10%和20%时,28 d抗压强度分别为38.8、39.3 MPa,活性指数分别为79.7%、80.7%;掺量为30%时抗压强度最高,7、28 d抗压强度分别为24.1、40.1 MPa,活性指数分别为75.1%、82.3%;花岗岩石粉掺40%时,28 d抗压强度为38.6 MPa,活性指数为79.3%。原因是在复合胶凝体系中,花岗岩石粉作为惰性辅助材料,与矿粉、粉煤灰共同作用填充了胶凝材料在硬化时产生的孔隙,提高了胶砂的密实性,改善了孔结构。花岗岩石粉替代矿粉、粉煤灰达到30%时,其填充效果达到最佳,同时矿粉、粉煤灰具有火山灰效应,可以促进水泥水化,减少Ca(OH)₂的含量,生成C-S-H、C-A-H和AFt提高了胶砂的强度^[13]。

而掺量超过 30% 时, 填充效果随着掺量的增加而降低, 矿粉和粉煤灰掺量逐渐减小, 水化产物数量减少, 使胶砂的强度降低。

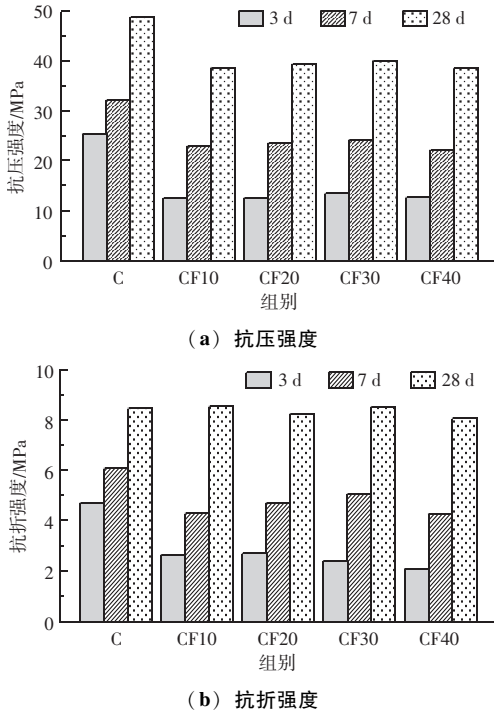


图2 花岗岩石粉对胶砂力学性能的影响
Fig. 2 Effect of granite powder content on mechanical properties of mortar

图2 (b) 为花岗岩石粉对水泥胶砂抗折强度的影响, 花岗岩石粉对胶砂的 28 d 抗折强度影响趋势平稳, 均与对照组接近。花岗岩石粉内掺 10%、20%、30%、40% 时, 28 d 抗折强度分别增加了为 1.2%、-2.4%、1.2%、-4.7%。3 d 抗折强度随花岗岩石粉掺量的增加而减小。原因是胶砂早期强度由水泥的水化产物提供, 复合浆体中仅有 50% 水泥, Ca^{2+} 含量相对较低, 水化速度慢。早期矿粉、粉煤灰的火山灰效应未能充分发挥, 花岗岩石粉火山灰效应很低, 导致 3 d 时水化产物数量少, 颗粒间的连接效果较差, 抗折强度降低。随着水化反应的进行, 花岗岩石粉的低活性、矿粉和粉煤灰的高火山灰活性促进水化, C-S-H 含量增加填充孔隙, 有利于后期强度的增长, 故 28 d 抗折强度变化不大。

2.3 工作性与强度

研究内掺花岗岩石粉 15%、30% 时 C30 和 C50 混凝土工作性、强度。由图 3 可知, 掺花岗岩石粉复合掺合料的 C30 - F15 与 C50 - F15 混凝土坍落度均

可达到 200 mm 以上, 说明掺花岗岩石粉可以改善混凝土拌合物的工作性。内掺 15% 花岗岩石粉 C30 与 C50 混凝土坍落度分别为 230、205 mm, 是因为花岗岩石粉的填充作用使水泥颗粒间的间隙减小, 混凝土的孔隙减小, 增加了自由水的含量, 混凝土流动性表现良好。花岗岩石粉替代量增加, 混凝土的坍落度降低, C30 - F30 组比 C30 - F15 组坍落度降低 10 mm, C50 - F30 组比 C50 - F15 组坍落度降低 5 mm, 由于掺合料的比表面积均大于水泥, 花岗岩石粉掺量的增加, 结合更多孔隙间的自由水, 增大混凝土黏聚性的同时降低流动性。

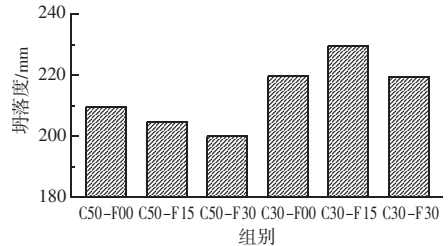


图3 坍落度
Fig. 3 Slump

图 4 为 C30 与 C50 混凝土 28 d 抗压强度对比, 花岗岩石粉可以使 C30、C50 混凝土强度发展良好, C30 - F15 混凝土 28 d 抗压强度比未掺 C30 - F00 高 0.7 MPa, 提高了 1.9%; C50 - F15 混凝土 28 d 抗压强度比 C50 - F00 高 1.4 MPa, 提高了 2.5%。主要原因是: C50 - F00 混凝土中, 矿粉、粉煤灰的高活性与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶, 提供后期强度, 花岗岩石粉的掺入增加了体系中 Si^{4+} 含量, 提供了形成水化产物的 C_2S 和 C_3S 的活性位点使 Ca/Si 降低, 促进了水泥水化, 其水化产物 C-S-H 类似于托勃莫莱石晶体, 保证了混凝土的强度发展。矿粉、粉煤灰花岗岩石粉填充了混凝土内部的孔隙, 增加了毛细孔隙的含量, 减小孔隙率, 改善混凝土的孔结构, 使无害孔与少害孔含量增加, 优化了水泥石与骨料间的界面过渡区, 结构更加致密, 提高黏结程度^[14]。C30 - F30、C50 - F30 混凝土 28 d 强度比未掺组分别降低了 4.4%、3.1%。主要原因是花岗岩石粉掺量增加, 高活性矿粉、粉煤灰含量减少, 水化产生的 C-S-H 含量降低, 故而降低强度。

材料科学

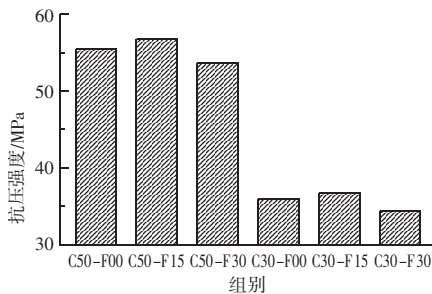


图4 28 d 抗压强度

Fig. 4 28-day compressive strength

2.4 抗碳化性能

花岗岩石粉对混凝土 28 d 碳化深度影响如图 5 所示。掺花岗岩石粉可以提高混凝土的抗碳化性能。花岗岩石粉的微集料效应填充孔隙,优化孔结构;同时花岗岩石粉低活性促进二次水化,产生的反应消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的量,使混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低,水化产物细化了混凝土中的有害连通孔道,降低 CO_2 渗入混凝土内部的速率^[15]。内掺 15% 花岗岩石粉 C30 混凝土比未掺 28 d 碳化深度由 5.4 mm 减小到 3.8 mm, C50 混凝土 28 d 碳化深度由 3.5 mm 减小到 2.1 mm,混凝土的抗碳化性能提高。内掺 30% 花岗岩石粉 C30-F30 组比内掺 15% C30-F15 组碳化深度增加 0.5 mm, C50-F30 组比 C50-F15 组碳化深度增加 0.1 mm,总体来看,增加花岗岩石粉替代量,28 d 碳化深度增加,混凝土的抗碳化性能降低,但优于未掺组。由于胶凝体系中水泥熟料含量少,内掺 30% 花岗岩石粉体系中 C-S-H 数量比掺 15% 时少,微集料作用较弱,混凝土中的有害孔、多害孔增加,为 CO_2 提供有效通道,促进了混凝土的碳化。

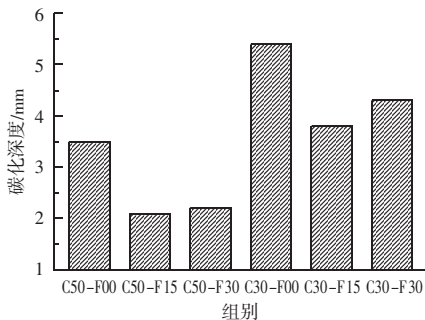


图5 28 d 碳化深度

Fig. 5 28-day carbonation depth

3 结论

(1) 浆体流动度随花岗岩石粉替代量的增加先增后减,内掺 10% 的矿粉-粉煤灰可以提高浆体的

流动度;掺量超过 30% 时流动度降低最明显。

(2) 花岗岩石粉取代矿粉-粉煤灰的胶砂强度基本持平,内掺 30% 时最高,28 d 抗压、抗折强度分别为 40.1、8.6 MPa。

(3) 掺花岗岩石粉复合掺合料可以改善混凝土拌合物的工作性能;内掺 15% 花岗岩石粉的混凝土强度略有提高,C30 混凝土 28 d 抗压强度 36.7 MPa,比未掺提高了 0.7 MPa,C50 混凝土 28 d 抗压强度为 56.8 MPa,比未掺提高 1.4 MPa;花岗岩石粉可以减小混凝土的碳化深度,提高抗碳化性能。

参 考 文 献

- [1] 刘春,陶元洪,何涛,等. 花岗岩石粉掺量对混凝土力学性能的影响[J]. 建材世界, 2020, 41 (3): 18-21, 38.
- [2] 马富财. 复掺花岗岩石粉和矿渣粉对混凝土性能的影响研究[J]. 西部交通科技, 2022 (6): 94-96, 133.
- [3] 刘超群,朱泽文,代力,等. 粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 11-15.
- [4] 赵尉廷,胡荣建,杨朝刚,等. 三元地质聚合物力学性能和微观结构研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (8): 136-141, 155.
- [5] 臧东亮. 花岗岩残积土力学性能改良试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (1): 31-35, 51.
- [6] 郝彤,田文琴,曹力强,等. 大掺量废弃花岗岩石粉对砂浆力学性能影响[J]. 混凝土, 2021 (3): 103-106, 111.
- [7] 陈梅,韩依璇,张云升,等. 掺花岗岩石粉砂浆自收缩性能演变规律研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (12): 4360-4367.
- [8] 林如涛. 花岗岩石粉对再生混凝土性能的影响研究[J]. 福建建材, 2023 (12): 27-30.
- [9] 沈玉才. 复掺花岗岩石粉和沸石粉机制砂混凝土的力学及耐久性研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2024.
- [10] JAIN K L, SANCHETI G, GUPTA L K. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119075.
- [11] JAIN A, CHAUDHARY S, CHOUDHARY S, et al. Resistance of fly ash blended self-compacting concrete incorporating granite powder against acid and sulphate environments [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15 (12): 1156.
- [12] 王将华,薛翠真,张宇,等. 花岗岩石粉对砂浆干燥收缩性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37 (22): 111-116.
- [13] 戴鹏. 花岗岩石粉复合矿物掺合料对水泥胶砂性能的影响[J]. 粉煤灰, 2016, 28 (5): 29-33.
- [14] 陈宗燕. 花岗岩石粉超高性能混凝土力学性能及微结构[J]. 公路, 2021, 66 (10): 331-339.
- [15] 范华峰,段光林,翟盛通,等. 花岗岩石粉对水工混凝土抗碳化性能的影响[J]. 中国农村水利水电, 2020 (9): 236-241, 247.