

火山石/火山灰次轻掺料混凝土性能正交试验研究

刘雨舟, 石邦宇, 陈 帅, 杨学纯, 骆梦贺, 张杰明, 刘梓萌, 雷 真*

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年6月12日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年7月15日

摘 要

以云南腾冲火山石和火山灰为原材料, 基于正交试验研究了火山石掺量、火山灰掺量和水胶比对次轻掺料混凝土的影响, 并通过扫描电子显微镜(SEM)进行了微观表征分析。结果表明: 火山石掺量在15%以下时混凝土28 d抗压强度和软化系数下降幅度较小; 火山灰最佳掺量介于20%到30%之间; 当因素水平组合为: 火山石掺量5% + 火山灰掺量20% + 水胶比0.45时, 所得的混凝土综合性能最佳; 在微观层面最佳试验组混凝土比普通混凝土水化产物数量更多, 形状更大, 分布更紧密, 彼此交错, 形成了复杂稳定的三维结构。

关键词

次轻混凝土, 矿物掺合料, 火山石, 正交试验

Orthogonal Experimental Study on Volcanic Stone and Pozzolan Specified Density Admixture Concrete

Yuzhou Liu, Bangyu Shi, Shuai Chen, Xuechun Yang, Menghe Luo, Jieming Zhang, Zimeng Liu, Zhen Lei*

School of Architecture and Urban Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 12th, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

Using volcanic stone and pozzolan from Tengchong, Yunnan as materials, the effects of volcanic

*通讯作者。

文章引用: 刘雨舟, 石邦宇, 陈帅, 杨学纯, 骆梦贺, 张杰明, 刘梓萌, 雷真. 火山石/火山灰次轻掺料混凝土性能正交试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(7): 1143-1151. DOI: 10.12677/hjce.2024.137123

stone content, pozzolan content and water-binder ratio on specified density admixture concrete were studied based on orthogonal experiments, and the microstructures were analyzed by scanning electron microscope (SEM). The results show that when the content of volcanic stone is below 15%, the 28 d compressive strength and softening coefficient of the specified density admixture concrete decrease slightly; the optimal content of pozzolan is between 20% and 30%; when the factor level combination is: volcanic stone content (5%) + pozzolan content (20%) + water-binder ratio (0.45), compared with other test groups, the obtained concrete has the best overall performance; at the microscopic level, the concrete hydration products of the optimal experimental group are more numerous, larger in shape, more closely distributed than those of ordinary concrete, interlaced with each other, forming a complex and stable three-dimensional structure.

Keywords

Specified Density Concrete, Mineral Admixture, Volcanic Stone, Orthogonal Test

Copyright © 2024 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

次轻混凝土, 又称特定密度混凝土, 由轻骨料、普通粗骨料、细骨料和胶凝材料等制备而成, 是普通混凝土到轻集料混凝土的过渡。次轻混凝土由于添加轻骨料, 相较于普通混凝土密度较小, 比强度大, 自收缩小; 相比于轻骨料混凝土弹性模量高, 预应力损失小, 强度大。其具有强度高, 自重小, 体积稳定性良好等优点, 在高层建筑、桥梁等大跨度结构工程应用中有巨大的经济优势和非常广阔的使用前景[1] [2]。目前制备混凝土所使用的轻骨料包括天然轻骨料和人工轻骨料。火山石作为一种地域性的天然轻骨料, 用做次轻混凝土的粗骨料不仅制备成本低, 而且可以减少混凝土对传统石料的需求, 对于保护生态环境有重要意义。矿物掺合料作为现代混凝土不可缺少的组分, 具有改善混凝土工作性能、延缓水化放热速度、减少开裂、提高耐久性的作用[3] [4]。火山石破碎研磨而得的火山石粉末作为掺合料用于混凝土, 能发挥火山灰反应效应、微集料填充效应、颗粒形态效应, 具有与粉煤灰等人工火山灰质材料类似的作用[5]-[7]。

黎蔚诗[8]通过改变不同粒级火山石相对体积比和砂率、混凝土的制备工艺研究了混凝土的物理力学性能。张泽男[9]对比轻集料混凝土剪力墙和普通混凝土剪力墙的轴心受压破坏并利用有限元软件对火山石混凝土剪力墙与钢框架结构进行协同工作模拟。刘原[10]运用正交试验法研究了火山石掺量、预湿对混凝土工作性能及早期抗碳化能力的影响。除了受火山石掺量影响外, 张立霞[11]研究表明随着粉煤灰加入, 火山石混凝土的力学性能出现先上升后下降的变化规律。

火山灰的组成成分及含量与常用人工矿物掺合料接近, 火山灰质掺合料加水能与石灰反应生成水硬性产物, 研究人员把火山灰作为混凝土矿物掺合料以及用做生产火山灰质硅酸盐水泥的原材料, 并产生了不错的效果。王刚[12]通过改变火山岩粉细度、添加化学试剂、高温煅烧研磨三个方面对新疆和田地区天然火山岩粉活性提升展开研究, 研究发现细化火山岩粉可以一定程度提升火山岩粉的活性。毕亚丽等[13]对比研究了粉煤灰和天然火山灰作为矿物掺合料对胶砂性能的影响。刘畅等[14]为探究玄武岩石粉的火山灰活性, 研究了掺量在 0%~40% 范围内、细度在 160~600 m²/kg 范围内的两种玄武岩石粉对水泥胶砂强度的影响。Mansour 等[7]在自密实混凝土中引入阿尔及利亚西部的花岗岩和珍珠岩等天然火山岩粉作为水泥替代品, 通过压弯试验和超声波回弹仪研究其工作性能和力学性能。

本研究采用云南腾冲火山石和火山灰制备次轻掺料混凝土，运用正交试验法，研究了分别考量坍落度、28 d 抗压强度、吸水率和软化系数此四项指标时，火山石掺量、火山灰掺量、水胶比此三个因素的最佳水平组合，同时分析了各因素对各指标的影响显著性，最后从微观层面分析，通过对比微观形貌图，探究次轻掺料混凝土和普通混凝土的微观差异，从微观层面解释火山灰作为掺合料对混凝土的影响。

2. 试验材料与方法

2.1. 原材料

水泥：普通硅酸盐 PO 42.5 水泥；火山灰：产自云南腾冲的江腾火山灰(由火山石破碎细磨而得)，火山灰化学成分含量见表 1，火山灰技术指标见表 2；火山石：产自云南腾冲的江腾天然火山石，粒径为 5~20 mm，连续级配，火山石物理性能指标见表 3，火山石颗粒级配见表 4；砂：河砂，细度模数 2.5，II 区中砂；碎石：粒径为 5~20 mm，连续级配；减水剂：山东优索牌萘系减水剂。

Table 1. Chemical composition content of pozzolan/%

表 1. 火山灰化学成分含量/%

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
含量	55.90	17.76	7.90	6.76	3.73	0.29	2.26	2.70	1.54

Table 2. Technical specifications of pozzolan materials

表 2. 火山灰材料技术指标

项目	细度(45 μm 方孔筛筛余) /%	流动度比 /%	28 d 活性指数 /%	烧失量 /%	三氧化硫 /%	氯离子含量 /%	含水量 /%
火山灰	5.0	98	76	1.54	0.29	0.04	0.8
JG/T315-2011	≤20	≤85	≤65	≤8.0	≤3.5	≤0.06	≤1.0

Table 3. Physical properties of volcanic stone

表 3. 火山石物理性能指标

堆积密度/(Kg/m ³)	表观密度/(Kg/m ³)	筒压强度/MPa	1h 吸水率/%	石粉含量/%
1150	2032	4.9	5.3	3.2

Table 4. Grain gradation of volcanic stone

表 4. 火山石颗粒级配

各号筛的累计质量筛余/%						
方孔筛孔径	2.36	4.75	9.50	16.0	19.0	26.5
火山石	100	100	86	39	23	0
GB/T 17431.1 连续粒级 5~20	95~100	90~100	40~80	—	0~10	—

2.2. 试验方法

试验用搅拌机选择强制式混凝土搅拌机；参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T50080-2016 测试混凝土坍落度；混凝土试块成型为 100 mm × 100mm × 100 mm 的立方体；试块脱模后在标准养护室养护至龄期 28 d，参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T50081-2019 测试其抗压强度；取龄期为 28 d 的试块参照《轻骨料混凝土技术规程》JGJ51-2002 测试其吸水率和软化系数。

2.3. 正交试验

采用正交试验方法,研究火山石掺量、火山灰掺量、水胶比等因素对混凝土坍落度、28 d 抗压强度、吸水率和软化系数等指标的影响规律,正交试验方案见表 5。以上三因素每个因素取三个不同水平按照 L9(3⁴)正交表设计三因素三水平正交试验,并分别以坍落度、28 d 抗压强度、吸水率和软化系数为考量指标对试验结果进行极差分析和方差分析,讨论各因素对于试验结果影响的大小和主次,分析各因素对于试验结果影响的显著程度。

Table 5. Orthogonal test scheme and results
表 5. 正交试验方案及结果

因素				指标			
编号	火山石掺量/%	火山灰掺量/%	水胶比	坍落度/mm	28 d 抗压强度/MPa	吸水率/%	软化系数
ZJ-1	5(1)	10(1)	0.40(1)	145	40.3	6.2	0.731
ZJ-2	5(1)	20(2)	0.45(2)	167	42.4	1.6	0.763
ZJ-3	5(1)	30(3)	0.50(3)	173	35.6	4.9	0.751
ZJ-4	10(2)	10(1)	0.45(2)	145	37.4	5.4	0.673
ZJ-5	10(2)	20(2)	0.50(3)	185	36.7	4.5	0.744
ZJ-6	10(2)	30(3)	0.40(1)	103	38.8	7.6	0.710
ZJ-7	15(3)	10(1)	0.50(3)	162	31.5	11.3	0.632
ZJ-8	15(3)	20(2)	0.40(1)	136	37.8	10.1	0.661
ZJ-9	15(3)	30(3)	0.45(2)	112	35.2	6.8	0.641

3. 试验结果

参考相应规范测试混凝土的坍落度、28 d 抗压强度、吸水率和软化系数,混凝土正交试验结果见表 5。从表 5 可以看出 ZJ-5 组坍落度最大,ZJ-2 组 28 d 抗压强度最大,ZJ-2 组吸水率最小,ZJ-2 组软化系数最大。

3.1. 极差分析

极差分析可以直观地反映因素对试验指标的影响程度大小,突出各因素的最优水平,得到各因素的最优水平组合。对试验结果进行极差分析,极差分析结果见表 6,表中 $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$ 表示各因素取水平 1、水平 2、水平 3 时对应试验结果的平均值,R 表示极差。坍落度、28 d 抗压强度、吸水率和软化系数等指标随各因素水平的变化趋势见图 1~4。

Table 6. Range analysis table
表 6. 极差分析表

指标	坍落度/mm				28 d 抗压强度/MPa				吸水率/%				软化系数			
	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	R	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	R	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	R	$\bar{K}_1$	$\bar{K}_2$	$\bar{K}_3$	R
A	162	144	137	25	39.4	37.6	34.8	4.6	4.2	5.8	9.4	5.2	0.748	0.709	0.645	0.104
B	151	163	129	33	36.4	39.0	36.5	2.6	7.6	5.4	6.4	2.2	0.679	0.723	0.701	0.044
C	128	141	173	45	39.0	38.3	34.6	4.4	8.0	4.6	6.9	3.4	0.701	0.692	0.709	0.017
D	147	144	151	7	37.4	37.6	36.9	0.6	5.8	6.8	6.8	1.0	0.705	0.702	0.695	0.010

注:A——火山石掺量;B——火山灰掺量;C——水胶比;D——空白列。

从表 6 可知各因素对于坍落度的影响程度次序为：水胶比 > 火山灰掺量 > 火山石掺量。从图 1 可见随着火山石掺量的提高混凝土的坍落度逐渐降低，降幅为 15.4%，原因是随着火山石掺量的提高混凝土重度降低，坍落度随之降低；随着火山灰掺量的提高混凝土的坍落度先上升 7.9% 后下降 22.5%，原因是火山灰具有微集料效应但其颗粒微观形貌呈多边形且颗粒表面较粗糙[15][16]，前者使其填充混凝土孔隙释放水分增大坍落度，后者使其吸附混凝土中的水分降低坍落度，当火山灰掺量为水平 2 时微集料效应更强，当火山灰掺量为水平 3 时颗粒表面吸水作用更强。

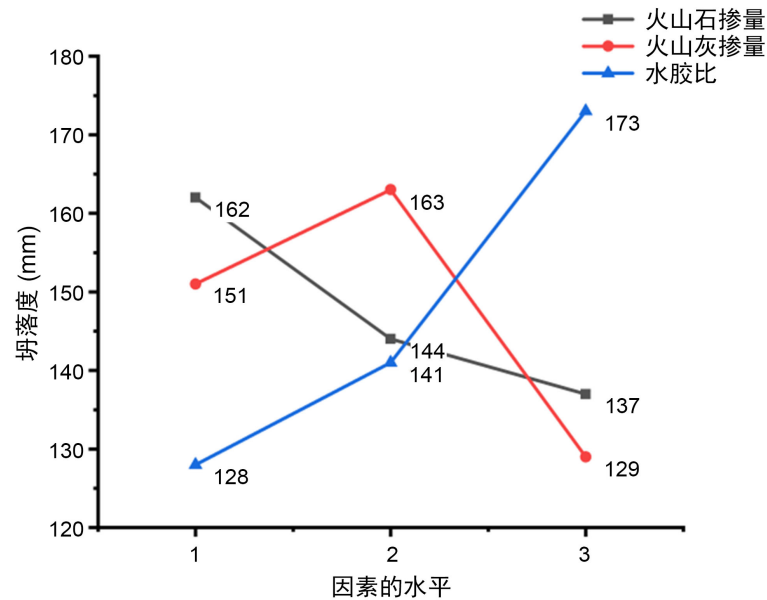


Figure 1. The influence trend of each factor level on slump

图 1. 各因素水平对坍落度的影响趋势

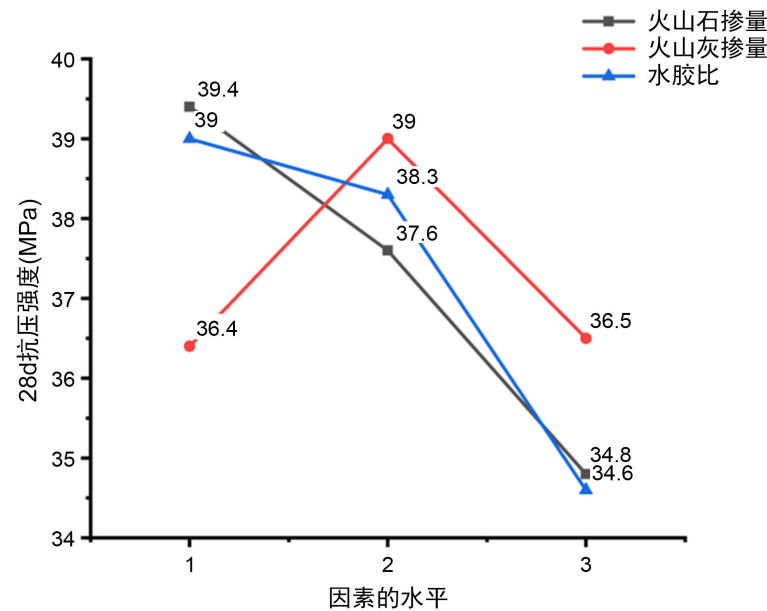


Figure 2. Influence trend of each factor level on 28 d compressive strength

图 2. 各因素水平对 28 d 抗压强度的影响趋势

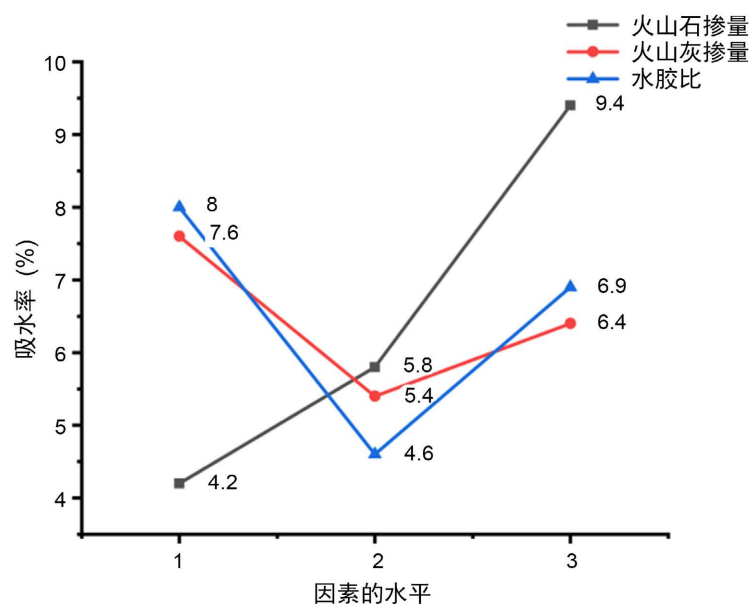


Figure 3. The influence trend of each factor level on the water absorption rate
图 3. 各因素水平对吸水率的影响趋势

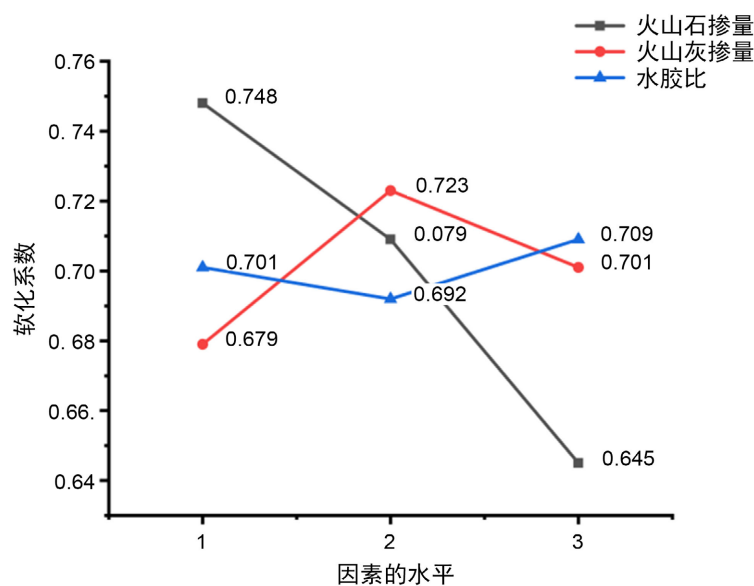


Figure 4. The influence trend of each factor level on the softening coefficient
图 4. 各因素水平对软化系数的影响趋势

从表 6 可知各因素对于 28 d 抗压强度的影响程度次序为：火山石掺量 > 水胶比 > 火山灰掺量。从图 2 可见随着火山石掺量的提高混凝土的 28 d 抗压强度逐渐降低，降幅为 11.7%，原因是火山石内部多孔的特性在降低自重的同时也导致火山石相较于传统石料承受应力的能力降低。随着火山灰掺量的提高混凝土的 28 d 抗压强度先上升 7.1% 后下降 6.8%，强度先上升是因为火山灰的二次水化作用弥补了水泥被部分替代导致的水泥水化产物减少，同时火山灰的微集料效应使得混凝土中胶砂结构更加密实[17][18]，以上两个效应共同作用下混凝土强度提高；随着火山灰掺量的进一步提高，混凝土 28 d 抗压强度出现下降是因为较大量的使用矿物掺合料使得水泥水化产物较大程度减少进而导致强度降低[19]。

从表 6 可知各因素对于吸水率的影响程度次序为：火山石掺量 > 水胶比 > 火山灰掺量。从图 3 可见随着火山石掺量的提高混凝土的吸水率逐渐增大，增幅为 123.8%，原因是火山石内部多孔结构为水分子扩散提供了通道和储存空间；随着火山灰掺量的提高混凝土的吸水率先下降 28.9%后上升 13.2%，原因是低掺量使用火山灰做为矿物掺合料由于二次水化作用和微集料效应使得混凝土中胶砂结构更加紧密，不益于水分子扩散，而火山灰用量进一步增大之后由于水泥用量较大程度减少使得水泥水化产物减少，混凝土内物质分布不如低掺量时紧密，扩散至混凝土内部的水分子增多。

从表 6 可知各因素对于软化系数的影响程度次序为：火山石掺量 > 火山灰掺量 > 水胶比。从图 4 可见随着火山石掺量的提高混凝土的软化系数逐渐降低，降幅为 13.7%，原因是火山石的耐水性能比传统石料差，所以随着火山石掺量的增加混凝土的耐水性能下降；随着火山灰掺量的提高混凝土的软化系数先上升 6.5%后下降 3.2%，说明低掺量使用火山灰替代水泥能使混凝土结构更加密实，在一定程度上提高混凝土的耐水性能，而掺量超过特定值(约为 20%)之后，混凝土的耐水性能下降。

若优先考虑坍落度最大，最佳因素水平组合为：火山石掺量 10% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.50；若优先考虑 28 d 抗压强度最大，最佳因素水平组合为：火山石掺量 5% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.45；若优先考虑吸水率最小，最佳因素水平组合也为：火山石掺量 5% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.45；若优先考虑软化系数最大，最佳因素水平组合也为：火山石掺量 5% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.45。综合考虑以上指标，最佳因素水平组合为：火山石掺量 5% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.45。

3.2. 方差分析

方差分析的基本思想是：通过分析研究不同来源的变异对总变异的贡献大小，从而确定各因素对研究结果影响的显著性程度。从表 5 可知，正交试验方案的最后一列为空白列，方差分析时该空白列反映的是正交试验的组间误差，该列也称为误差列。方差分析结果见表 7。

Table 7. Variance analysis table
表 7. 方差分析表

指标	坍落度			28 d 抗压强度			吸水率			软化系数		
方差来源	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
离差平方和	984	1710	3257	32	12.6	33.8	42	7.5	17.8	0.01644	0.00292	0.00042
自由度	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
均方	492	855	1628	16	6.3	16.9	21	3.7	8.9	0.00822	0.00146	0.00021
F	12	21	40	53	21	56	22	4	9	97	17	3
显著性	*	**	**	**	**	**	**	—	*	**	*	—

注：A——火山石掺量；B——火山灰掺量；C——水胶比； $F_{0.05}(2, 2) = 19$ ； $F_{0.1}(2, 2) = 9$ ；**——非常显著；*——显著；——不显著。

由表 7 可知，火山灰掺量和水胶比对混凝土坍落度影响非常显著，同时火山石掺量对坍落度影响显著；火山石掺量、火山灰掺量、水胶比对混凝土 28 d 抗压强度均影响非常显著；火山石掺量对混凝土吸水率影响非常显著，同时水胶比对吸水率影响显著；火山石掺量对混凝土软化系数的影响非常显著，同时火山灰掺量对软化系数影响显著。

3.3. 微观形貌分析

微观形貌反映了混凝土内部物质的形态、结合的紧密程度等，混凝土内部的物质形态和密实度又直

接影响其力学性能和耐久性能。根据上述分析结果,当因素水平组合为:火山石掺量 5% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.45 时,试验混凝土 28 d 抗压强度最大、吸水率最小且软化系数最大。取龄期为 28 d 的 ZJ-2 组次轻掺料混凝土和普通混凝土切割制样进行 SEM 分析,分析结果见图 5 和图 6。

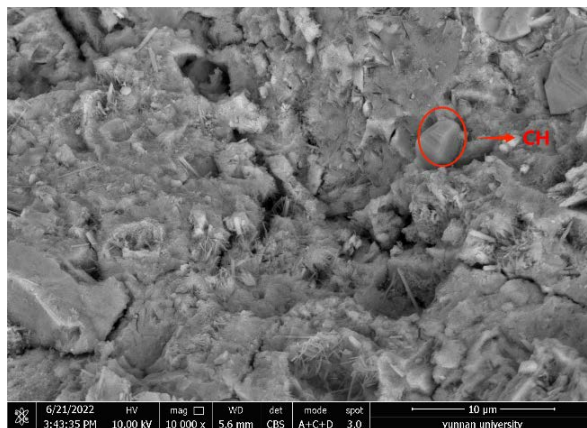


Figure 5. SEM image of ordinary concrete

图 5. 普通混凝土 SEM 图

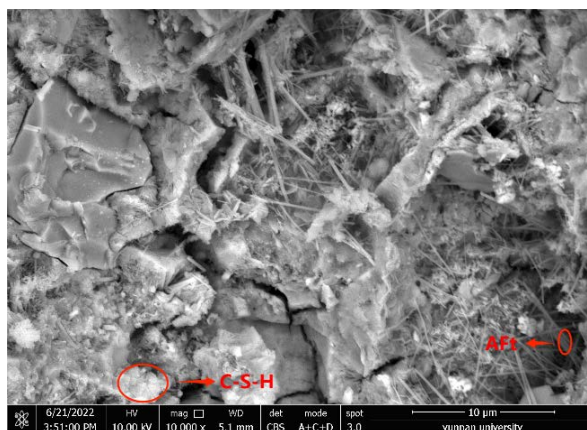


Figure 6. SEM image of group ZJ-2 specific density admixture concrete

图 6. ZJ-2 组次轻掺料混凝土 SEM 图

比较图 5 和图 6 发现,在基准组混凝土内部可见少量相对独立的未反应的块状 CH (氢氧化钙),而试验组内部基本不存在此种物质,说明加入适量火山灰后混凝土水化更加完全。基准组空隙内的柱状、簇状 C-S-H (水化硅酸钙)或 Aft (钙矾石)远少于试验组,相对而言基准组的空隙更为畅通,这会导致其耐久性能不如试验组。基准组内可以观察到不少相对独立的块状 CH,而试验组混凝土的微观结构分布紧密,同时可以观察到不少片状、柱状的 C-S-H 紧密分布、彼此交错,形成复杂的三维结构,这从微观层面解释了试验组混凝土的力学性能和耐久性能优于基准组混凝土的原理。

4. 结论

本研究基于正交试验进行了火山石掺量、火山灰掺量、水胶比对混凝土性能的影响研究,得出以下结论:

- 1) 各组混凝土坍落度介于 100~200 mm, 具有较好的流动性和可泵性;混凝土 28 d 抗压强度最低为

31.5 MPa, 软化系数最小为 0.632, 具有较高的抗压强度和较强的耐水性能。

2) 火山石掺量的提高对混凝土的影响主要表现为降低 28 d 抗压强度、提高吸水率、降低软化系数, 变化幅度分别为 11.7%、123.8%、13.7%。吸水率增幅虽大但吸水率本身仍极小, 火山石掺量的提高对于混凝土性能的不利影响较小。火山灰掺量的提高对混凝土性能影响较为显著的指标为坍落度和 28 d 抗压强度, 影响趋势均是先上升后下降。水胶比的提高对次轻掺料混凝土坍落度和 28 d 抗压强度的影响趋势和传统混凝土一致, 对软化系数影响不显著。

3) 当因素水平组合为: 火山石掺量 5% + 火山灰掺量 20% + 水胶比 0.45 时, 所得的混凝土 28 d 抗压强度最大(42.4 MPa), 吸水率最小(1.6%), 同时软化系数最大(0.763)。

基金项目

云南大学大学生创新创业训练校级项目(202307061: 轻骨料植生混凝土制备及基本力学性能研究); 省级项目“一种基于大理石废渣和大理石灰掺合料的混凝土的制备及其力学性能研究”; 国家级项目“混凝土裂缝修复菌种的筛选、提纯及修复效果评价研究”。

参考文献

- [1] 刘娜春, 黄真锋. 高强次轻混凝土的试验研究[J]. 北方建筑, 2019, 4(1): 47-51.
- [2] 张燕坤, 王玉成, 吴晓龙. 次轻混凝土的抗折性能试验研究[J]. 北方工业大学学报, 2016, 28(3): 79-84.
- [3] 左宸嘉, 李士洋, 刘延波. 矿物掺和料对混凝土抗压强度影响性研究[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(2): 15-17, 21.
- [4] 王晓波, 董芸. 不同矿物掺和料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 156-159, 175.
- [5] 赵少华, 李世雄, 崔小飞. 混凝土施工用火山灰与粉煤灰性能对比试验[J]. 四川水利, 2020, 41(4): 27-30, 33.
- [6] 夏京亮, 高波, 周永祥, 岳新兴. 非洲天然火山灰混凝土抗氯离子渗透性能改善研究[J]. 混凝土, 2017(11): 19-22, 26.
- [7] Mansour, S., Haddadou, N. and Chaid, R. (2021) Valorization of Powder of Volcanic Rocks Used as Cement Substitution in Self-Compacting Concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **26**, 5753-5772. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1916782>
- [8] 黎蔚诗. 天然火山渣轻骨料混凝土的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [9] 张泽男. 轻质火山渣混凝土剪力墙及其与钢框架协同工作研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工程学院, 2018.
- [10] 刘原. 火山渣轻骨料混凝土的性能及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [11] 张立霞. 新型火山渣混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林建筑工程学院, 2009.
- [12] 王刚. 新疆和田地区天然火山岩粉火山灰活性提升研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- [13] 毕亚丽, 刘艳, 张勇. 粉煤灰和天然火山灰对胶砂性能影响对比试验研究[J]. 西北水电, 2012(1): 70-72.
- [14] 刘畅, 夏京亮, 周永祥, 李北星. 玄武岩石粉的火山灰活性效应研究[J]. 混凝土, 2021(7): 98-102.
- [15] 李康, 谢永江, 蒋睿, 胡建伟, 何龙, 谢亮, 胡凡. 西南地区不同岩性火山岩石粉的理化特性[J]. 铁道建筑, 2022, (4): 130-134, 149.
- [16] 左俊卿. 掺火山灰碾压混凝土的耐久性研究[J]. 建筑施工, 2015, 37(11): 1316-1318.
- [17] 王怀义, 杨桂权, 李鑫, 贺传卿. 机械磨细对新疆和田地区火山岩粉活性影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 334-339.
- [18] Celik, K., Jackson, M.D., Mancio, M., Meral, C., Emwas, A.H., Mehta, P.K., et al. (2014) High-Volume Natural Volcanic Pozzolan and Limestone Powder as Partial Replacements for Portland Cement in Self-Compacting and Sustainable Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **45**, 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>
- [19] 马保国, 肖君, 汪海贵, 王凯. 矿渣微细粉对水泥基材料抗酸雨侵蚀特性研究[J]. 混凝土, 2009(1): 23-26.