DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.007 文章编号:1671-2579(2025)02-0065-08

保水轻骨料对超高性能混凝土强度和自收缩的影响

方驰[1],杨伟浩[1],任康[1],张靖航[2],吕毅刚[2],黄敦文[2],彭晖[2*]

(1.达濠市政建设有限公司,广东 汕头 515041;2.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:针对常温养护超高性能混凝土(UHPC)自收缩较大的问题,该文研究了保水轻骨料与粗骨料混合掺入对UHPC抗压强度和自收缩性能的影响,并采用响应面法(RSM)优化了两类骨料的混合比例。研究结果表明:适量玄武岩和饱水火山石能够有效降低UHPC的收缩,其中,刚性的玄武岩发挥了约束基体收缩的作用,而饱水火山石通过缓慢释放水分,缓解了自干燥效应,从而减小了收缩。但玄武岩和火山石掺量一旦过量,会导致UHPC抗压强度下降。这是因为粗骨料增加了基体-粗骨料界面过渡区域,引发了纤维结团,而火山石自身强度较低,难以弥补界面过渡区带来的劣化效果。

关键词:超高性能混凝土;饱水火山石;玄武岩;自收缩;响应面法

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Effect of Lightweight Aggregate with Water-Holding Capacity on Strength and Autogenous Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete

FANG Chi[1], YANG Weihao[1], REN Kang[1], ZHANG Jinghang[2], LYU Yigang[2], HUANG Dunwen[2], PENG Hui[2*]

(1. Da Hao Municipal Construction Co., Ltd., Shantou, Guangdong 515041, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha , Hunan 410114, China)

Abstract: In response to the significant autogenous shrinkage issue of ultra-high performance concrete (UHPC) under normal temperature curing, the influence of lightweight aggregates with water-holding capacity mixed with coarse aggregates on the compressive strength and autogenous shrinkage performance of UHPC was investigated. The mixing proportions of the two types of aggregates were optimized using the response surface method (RSM). The results show that adequate amounts of basalt and volcanic rocks with water-holding capacity effectively reduce the shrinkage of UHPC. The rigid basalt restrains the shrinkage of the matrix, while volcanic rocks with water-holding capacity release moisture slowly, alleviating the autogenous drying effect and thus reducing shrinkage. However, an excessive amount of basalt and volcanic rocks leads to a decrease in the compressive strength of UHPC. This is because the coarse aggregates increase the transition zone between the matrix and coarse aggregates, resulting in fiber clustering, and the low strength of volcanic rocks makes it difficult to compensate for the degradation effect brought about by the transition zone.

Keywords: ultra-high performance concrete; volcanic rock with water-holding capacity; basalt; autogenous shrinkage; response surface method

收稿日期:2025-01-04(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178186, 52008036);湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ5017);湖南省教育厅优秀青年项目(编号:22B0344);交通基础设施安全风险管理交通运输行业重点实验室(长沙)开放基金资助项目(编号:22KF02)

作者简介:方驰,男,工程师.E-mail: 985182749@qq.com

*通信作者:彭晖,男,博士,教授.E-mail: huipeng@csust.edu.cn

0 引言

超高性能混凝土(UHPC)具有高强性、耐久性和高韧性的特点[1-3],在建筑、桥梁等领域具有广泛的应用前景[4-7]。然而,UHPC早期自收缩较大,常温养护下易开裂,影响了结构耐久性[8-12]。Wang等[13]测试发现UHPC自收缩高达800×10^{-6},而普通混凝土自收缩一般不超过100×10^{-6}。为了更好地推动UHPC在实际工程中的应用,控制早期自收缩已成为关键问题。

水泥浆体硬化后持续的水化反应会消耗毛细孔的水分,从而引发混凝土的自收缩变形[14-16]。常使用高吸水性聚合物(SAP)、膨胀剂、减缩剂等物质以减少混凝土体积收缩[17-19]。SAP和多孔骨料在水化过程中逐渐释放游离水来维持混凝土内部的相对湿度,从而减缓浆体由于干燥引起的收缩,但SAP放水后的体积收缩会在SAP与基体的过渡区域产生额外空隙,进而影响UHPC的力学性能和耐久性[20-22]。膨胀剂虽能通过生成膨胀性物质来补偿混凝土的收缩变形,但若控制不当导致过度膨胀,反而导致膨胀裂缝的产生[23-25]。减缩剂能显著降低混凝土失去水分时形成的毛细孔张力,但减缩剂同时减缓了水泥水化速率,且对UHPC的抗冻性产生负面影响[26]。因此,有学者尝试在UHPC内掺入粗骨料,通过刚性骨料约束浆体体积收缩[27]。李聪等[28]通过试验发现:UHPC的自收缩随着粗骨料掺量的增大而不断减小,最多可降低近20%;黄维蓉等[29]研究表明:粗骨料掺量超过400 kg/m^{3}后,UHPC的力学性能下降明显。

该文拟采用多孔保水骨料替代部分刚性骨料,从内养护的角度降低UHPC的自收缩,分析混合骨料对UHPC的工作性能、早期自收缩和抗压强度的影响,以期开发出能常温养护的低收缩UHPC,实现UHPC的现浇作业需求。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

水泥选用P·O 52.5级普通硅酸盐水泥,掺合料采用SBT®-HDC(Ⅴ)UHPC掺合料。钢纤维采用平直型镀铜钢纤维,纤维直径为0.2 mm,长度为13 mm。细骨料为石英砂,粗骨料为湖南地区的玄武岩碎石和火山石,粒径范围为5~8 mm。其中,玄武岩碎石的表观密度为2 870 kg/m^3,饱和吸水率为0.9%,而火山石的表观密度为1 800 kg/m^3,饱和吸水率为7.97%。无骨料的UHPC基准配合比如表1所示。

表1 UHPC基准配合比

Table 1 UHPC base fit ratio

水泥/(kg·m^{-3})	掺合料/(kg·m^{-3})	石英砂/(kg·m^{-3})	水胶比	钢纤维体积掺量/%
900	600	800	0.16	2

拟采用响应面法分析玄武岩掺量A和火山石掺量B对UHPC早期自收缩的影响,根据中心复合设计方法,对不同玄武岩掺量、火山石掺量开展13次试验,具体试验设计如表2所示。

表2 中心复合设计方法和试验响应

Table 2 Central composite design method and test response

组号	玄武岩A/%	火山石B/%
1	8	6
2	32	6
3	8	18
4	32	18
5	3	12
6	37	12
7	20	4
8	20	21
9	20	12
10	20	12
11	20	12
12	20	12
13	20	12

注:%表示粗骨料替代整个拌和物的体积百分数。

1.2 试验方法

1.2.1 工作性能测定

UHPC工作性能采用扩展度指标进行评定,依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)[30]进行扩展度试验,采用两个相互垂直的扩散直径的平均值评价UHPC的工作性能。

1.2.2 初凝时间测定

为了测量自收缩的起点,根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016),将横截面为100 mm^{2}的测针在(10±2) s内迅速贯入浆体内部(25±2) mm,记录最大贯入力值,并计算单位面积贯入阻力。每30 min进行一次测试,当单位面积贯入阻力等于3.5 MPa时,确定初凝时间。

1.2.3　抗压强度测试

制备100 mm×100 mm×100 mm的UHPC试件，脱模后在标准养护室养护7 d，依据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)[31]进行抗压强度测试。

1.2.4　自收缩

采用波纹管法测试UHPC自收缩，如图1所示。波纹管长度为(420±5) mm，直径为78 mm。波纹管的波纹端部为尖角状，具有足够的刚度，在试验过程中不受管内混凝土自重的影响因而产生压变形。测试支架由3根表面光滑的金属材质的支撑杆和两块金属材质的支架端板组成。一端端板将波纹管一端固定，另一端端板固定百分表。

图1　自收缩试验

Figure 1　Autogenous shrinkage test

试验在(20±2) ℃的恒温环境中进行，并同时在该条件下测定混凝土试样的初凝时间。其步骤如下：① 测量前，先用标准杆校正仪表的零点；② 测试支架的支撑杆表面涂一薄层矿物油，待试件制作完成后将其水平放置于测试支架的支撑杆上；③ 波纹管试件的一端固定在测试支架上，另一端连接百分表；④ 当混凝土初凝时，开始测读试件长度的初始读数，此后每24 h读取一次百分表上的读数。在整个测试过程中，试件在测试支架上放置的位置、方向均固定不变。

2　结果与讨论

2.1　工作性能和初凝时间

图2为不同玄武岩骨料、火山石骨料掺量下的UHPC工作性能和初凝时间。从图2可以看出：添加粗骨料会降低UHPC的工作性能。第1组、第7组和第9组(粗骨料掺量分别为14%、24%和32%)的流动扩展度分别下降至515 mm、400 mm和340 mm，而粗骨料掺量为0(基准组)的流动扩展度为580 mm。这是因为粗骨料本身会占据一定的浆体空间，导致基体内浆体体积减小。随着粗骨料用量的增加，需要更多的浆体量来包裹粗骨料，最终导致基体中的自由流动的浆体减少。此外，粗骨料用量的增加，加大了钢纤维与粗骨料之间的互锁效应，使得钢纤维在与粗骨料碰撞摩擦过程中更容易结团，进一步限制了浆体的流动，从而导致UHPC的工作性能下降。然而，当粗骨料掺量一定时，火山石不同掺量的加入(如第1组和第5组，粗骨料掺量分别为14%和15%，火山石占比分别为43%和80%)表现出不同的效果。尽管第5组的粗骨料掺量相比第1组略微增多，但是其工作性能更好，流动扩展度达到530 mm。这是因为饱水火山石会缓慢释放水分，使得更多的水被带入UHPC内，从而提高了UHPC的工作性能。

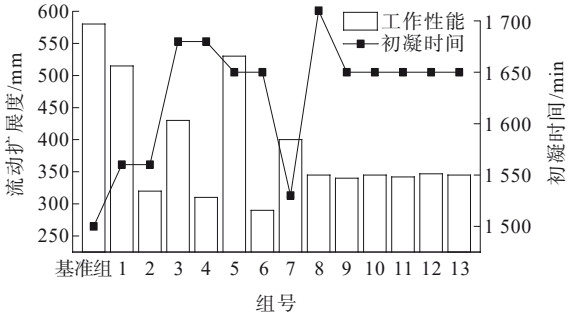


图2　基准组与设计组的工作性能和初凝时间

Figure 2　Working performance and initial setting time of reference group and design group

玄武岩和火山石的掺量对UHPC的初凝时间影响较小。具体表现为：火山石掺量较多的试件，其初凝时间略微增加。这是因为饱水火山石会缓慢释放水分，从而在一定程度上增加了水胶比，导致初凝时间的增加。

2.2　自收缩

玄武岩和火山石的掺量对UHPC自收缩的影响规律如图3、4所示。图3为不同设计组下的自收缩情况。图4为当一种骨料的掺量一定时，增加另一组骨料掺量对自收缩的影响情况。

从图3可以看出：UHPC的自收缩在前两天急剧增加，之后趋于稳定，这与现有文献中报道的结果相符[32]。值得注意的是，相较于基准组，添加粗骨料显著降低了UHPC的自收缩。这是因为粗骨料在UHPC内部构建了坚实骨架，有效限制了收缩的扩展。而且，随着粗骨料掺量的增加，自收缩程度逐渐减小。如图4(a)所示，相同火山石掺量下，增加玄武岩掺量，可以降低UHPC的自收缩。同时，如图4(b)所示，相同玄武岩掺量下，增加火山石掺量，可以降

低UHPC的自收缩。第1组、第7组和第9组(粗骨料掺量分别为14%、24%和32%)的最大自收缩分别为-175.86×10^{-6}、-149.13×10^{-6}和-130.01×10^{-6},而对比组的最大自收缩为-257.32×10^{-6}。

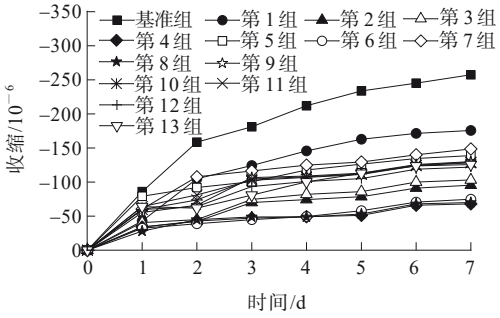
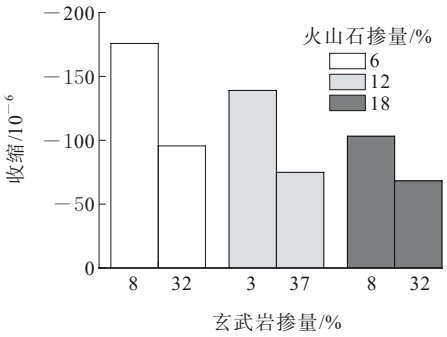
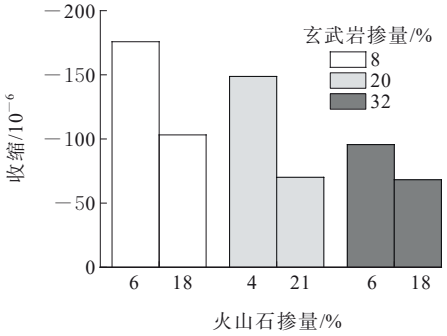


图3 基准组与设计组的自收缩

Figure 3 Autogenous shrinkage of reference group and design group



(a) 玄武岩掺量



(b) 火山石掺量

图4 不同粗骨料掺量下的自收缩值

Figure 4 Autogenous shrinkage values under different coarse aggregate contents

但是,在相同粗骨料掺量下,由于饱水火山石具有内养护效应,其掺量越高,UHPC的自收缩越小。如图4(a)所示,3%玄武岩掺量和12%火山石掺量试验组(第5组)比8%玄武岩掺量和6%火山石掺量试验组(第1组)的自收缩小,第5组和第1组的粗骨料掺量分别为15%和14%,火山石占比分别为80%和43%,其最大自收缩分别为-138.97×10^{-6}和-175.86×10^{-6}。这表明:在粗骨料发挥内部约束作用的同时,在内养护的协同作用下,进一步限制了UHPC的自收缩。

2.3 抗压强度

试件的7 d抗压强度如图5、6所示。图5为不同设计组下的抗压强度情况。图6为当一种骨料的掺量一定时,增加另一组骨料掺量对抗压强度的影响。

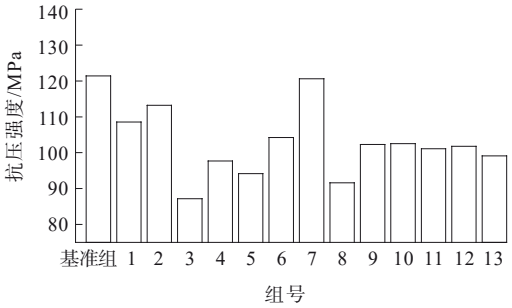
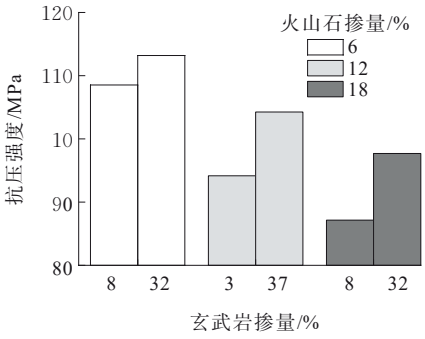
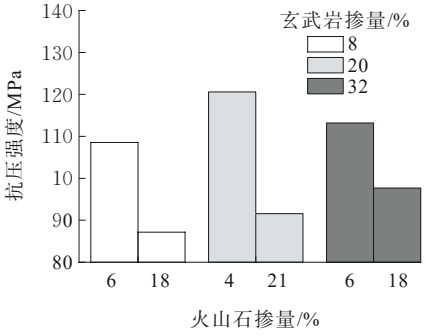


图5 基准组与设计组的抗压强度

Figure 5 Compressive strength of reference group and design group



(a) 玄武岩掺量



(b) 火山石掺量

图6 不同粗骨料掺量下的抗压强度

Figure 6 Compressive strengths under different coarse aggregate contents

由图5可知:随着粗骨料掺量的增加,抗压强度呈先增后减的趋势。第1组、第7组和第9组(粗骨料

掺量分别为14%、24%和32%）的抗压强度分别为108.54 MPa、120.60 MPa和102.30 MPa，而基准组的抗压强度121.39 MPa。这是因为粗骨料在基体内部形成良好的骨架效应，与钢纤维相互锁定，提升了基体整体性，有效阻止了裂缝扩展，从而增强了UHPC的抗压强度。然而，随着粗骨料用量的进一步增加，骨架效应的增强效果逐渐减弱，导致引入过多的基体-粗骨料界面过渡区域。同时，过多的骨料导致纤维易结团，减弱了纤维-骨料互锁效应，最终导致UHPC抗压强度下降。

当粗骨料掺量一定时，如图6(a)所示，3%玄武岩掺量和12%火山石掺量试验组（第5组）比8%玄武岩掺量和6%火山石掺量试验组（第1组）的抗压强度要小。第5组和第1组的粗骨料掺量分别为15%和14%，火山石占比分别为80%和43%。尽管第5组的粗骨料掺量略多，但是由于火山石占比更高，其抗压强度更低。这是因为饱水火山石本身的强度远低于玄武岩，不能有效弥补引入的基体-粗骨料界面过渡区域。因此，在相似的粗骨料掺量下，过多的火山石对UHPC的强度产生显著不利影响。

2.4　回归模型建立及显著性检验

为进一步探究最优的玄武岩掺量和火山石掺量配比，利用Design-Expert软件对试验结果进行回归拟合分析，得到自收缩和抗压强度的响应面拟合方程：

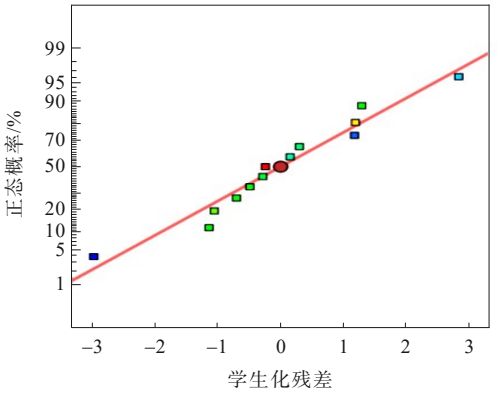
$$Y_1 = -127.14 + 25.73A + 26.39B - 11.30AB + 9.47A^2 + 8.23B^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = -101.17 + 3.68A - 9.74B + 1.47AB - 1.23A^2 + 2.21B^2 \quad (2)$$

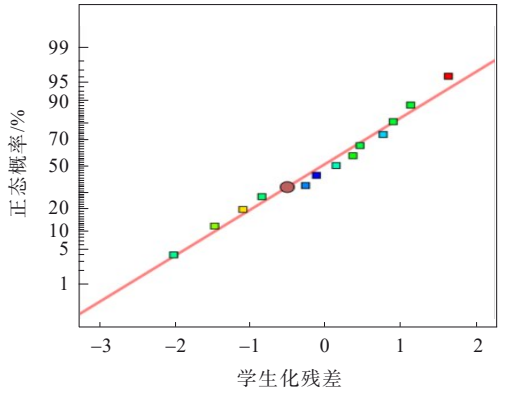
根据式(1)、(2)可知，在一定范围内，UHPC的自收缩和抗压强度与玄武岩掺量和火山石掺量存在二次方关系，模型在预测自收缩值的R^2=0.988 4，而预测抗压强度的R^2=0.986 0。自收缩和抗压强度的学生化残差关系如图7所示。

从图7可以看出：所得的残差几乎呈随机分布。这表明：试验残差处于正态分布的正常范围内，该模型可以较好地拟合试验数据。自收缩和抗压强度的实际值和预测值如图8所示，各数据点基本沿直线$y=x$均匀分布，模拟的预测值与实际值接近，说明模型能够有效预测试验结果。

图9显示了UHPC自收缩值的3D响应面图和等高线图。在各种因素水平内，随着玄武岩掺量和火山石掺量的增大，自收缩值均呈增大趋势。粗骨料在UHPC内起骨架作用，可以限制收缩的发展，且掺量越大，自收缩越小，饱水火山石在发挥内部约束的同时，也能缓慢释放水分，发挥内养护作用，从而降低UHPC的自收缩。



(a) 自收缩



(b) 抗压强度

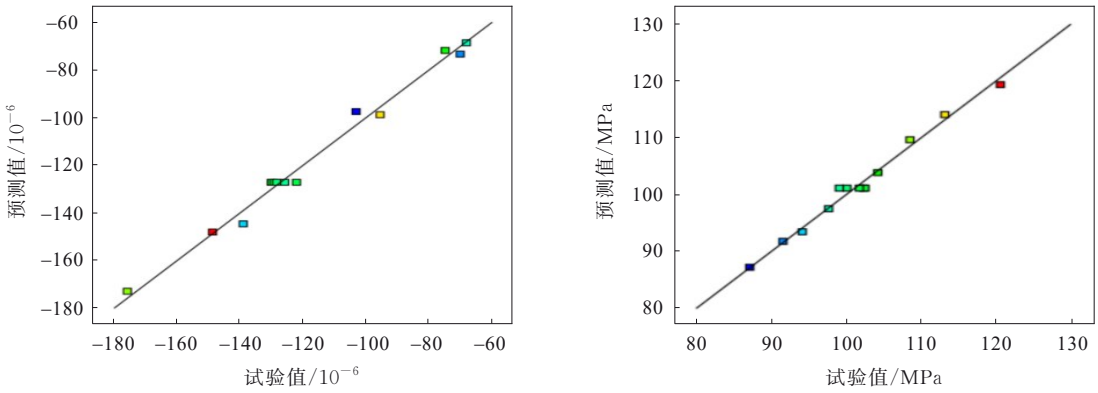
图7　不同回归模型的学生化残差

Figure 7　Studentized residual errors for different regression models

图10显示了UHPC抗压强度的3D响应面图和等高线图。

从图10可以看出：等高线密集分布在因素B（火山石掺量）坐标轴上，说明火山石掺量对抗压强度的影响显著，而玄武岩掺量对抗压强度的影响相对较小。这是因为粗骨料增加了基体-粗骨料界面过渡区域，并可能引发纤维结团[29]，但是玄武岩自身强度较高，相较于强度较低的火山石，可以弥补界面过渡区带来的劣化效果。

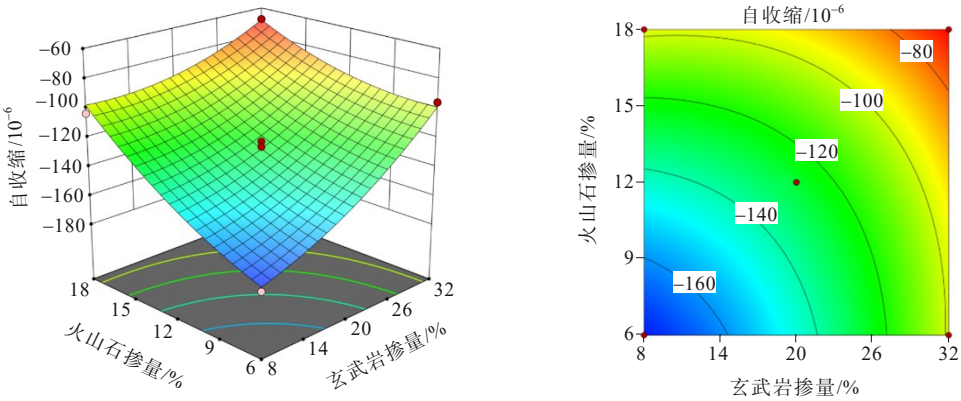
本研究基于响应面法设计试验，系统测试了不同粗骨料种类及掺量对UHPC抗压强度和自收缩的影响。结合实际工程需求，优化目标设定自收缩小于-100×10^{-6}，以确保混凝土的体积稳定性，同时追



（a）自收缩　　（b）抗压强度/MPa

图8　实际值与预测值对比

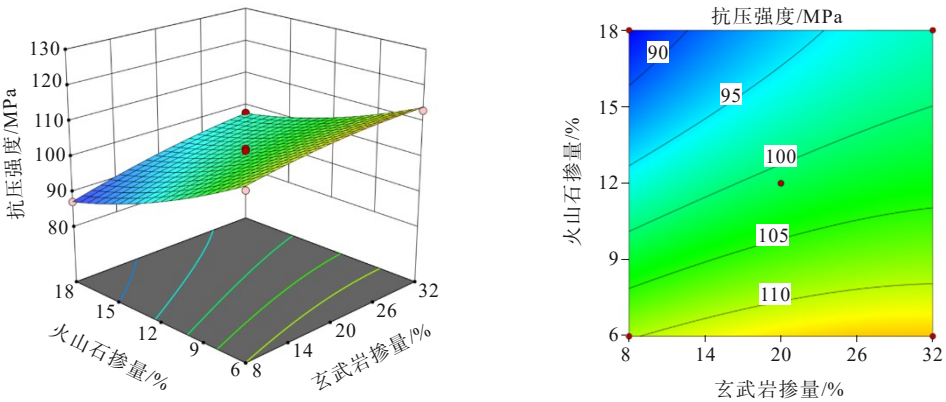
Figure 8　Comparison of actual and predicted values



（a）3D响应曲面图　　（b）等高线图

图9　UHPC自收缩三维响应曲面及等高线图

Figure 9　3D response surface and contour map related to autogenous shrinkage of UHPC



（a）3D响应曲面图　　（b）等高线图

图10　UHPC抗压强度三维响应曲面及等高线图

Figure 10　3D response surface and contour map related to compressive strength of UHPC

求抗压强度最大化。通过分析响应面模型，综合考虑UHPC的抗压强度和自收缩性能，确定玄武岩掺量为32%、火山石掺量为6%时，UHPC基体表现出最优性能组合。该条件下的试验结果表明：自收缩为-98.81×10^{-6}，抗压强度达到114.10 MPa，均满足优化目标并显示出优异的性能平衡性。这一优化结果为UHPC在高性能和低收缩要求下的实际应用提供了理论依据和数据支持。

3 结论

开展了玄武岩和火山石混合骨料对超高性能混凝土工作性能、力学性能以及自收缩性能的影响研究,得出以下结论:

(1)适量的玄武岩和火山石组合,在UHPC自收缩约束中发挥了约束和内养护的作用。玄武岩通过骨架作用约束了混凝土的收缩,同时饱水火山石在水化过程中释放水分缓解了浆体自干燥,有效防止了UHPC收缩引起的体积变形和开裂现象。

(2)过多的玄武岩和火山石掺量会引入基体-粗骨料界面过渡区域,进而导致纤维结团,从而降低UHPC的抗压强度。同时火山石自身强度较低,较多的火山石掺量对UHPC强度的劣化效果更加显著。

(3)玄武岩、火山石掺量分别为32%和6%时,所制备的UHPC基体具有较低的自收缩和较高的抗压强度,常温养护UHPC无表面裂纹。7 d自收缩为98.81×10^{-6},抗压强度为114.10 MPa。

参考文献:

References:

[1] DE LARRARD F,SEDRAN T.Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement and Concrete Research,1994,24(6):997-1009.

[2] 覃维祖,曹峰.一种超高性能混凝土:活性粉末混凝土[J].工业建筑,1999,29(4):16-18.
QIN Weizu, CAO Feng. A new ultra-high performance concrete:Reactive powder concrete[J].Industrial Construction, 1999,29(4):16-18.

[3] 袁明,贺文杰,颜东煌,等.超高性能混凝土配合比优化研究[J].中外公路,2019,39(6):169-173.
YUAN Ming, HE Wenjie, YAN Donghuang, et al. Investigation on optimizing mixing ratio of ultra-high performance concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(6):169-173.

[4] SHAO X D,YI D T,HUANG Z Y,et al.Basic performance of the composite deck system composed of orthotropic steel deck and ultrathin RPC layer[J]. Journal of Bridge Engineering,2013,18(5):417-428.

[5] XUE C C,YU M,XU H M,et al. Experimental study on thermal performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates at high temperature[J]. Construction and Building Materials,2022,314:125585.

[6] LU K W,XU Q Z,DU L P,et al. Fatigue performance of prefabricated coarse aggregate ultrahigh-performance concrete deck subjected to negative bending moment[J]. Engineering Structures,2023,274:115098.

[7] LIU Z, ALSOMIRI M, LI M, et al. Experimental investigation on the flexural behavior of coarse aggregate reactive powder concrete (CA-RPC) bridge deck[J]. Engineering Structures,2022,271:114951.

[8] AHMED S, AL-DAWOOD Z, ABED F, et al. Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete: A review[J]. Journal of Building Engineering, 2021,44:103238.

[9] YAZICI H,YARDIMCI M Y,AYDIN S,et al.Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J].Construction and Building Materials,2009,23(3):1223-1231.

[10] 周腾,裴炳志,黄政宇,等.钢纤维掺量对UHPC轴拉性能的影响[J].中外公路,2022,42(5):120-124.
ZHOU Teng,PEI Bingzhi,HUANG Zhengyu,et al.Effect of steel fiber content on tensile properties of UHPC[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(5):120-124.

[11] SHI C J,WU Z M,XIAO J F,et al.A review on ultra high performance concrete:Part Ⅰ:Raw materials and mixture design[J].Construction and Building Materials,2015,101: 741-751.

[12] WANG D H,SHI C J,WU Z M,et al.A review on ultra high performance concrete: Part Ⅱ: Hydration, microstructure and properties[J]. Construction and Building Materials, 2015,96:368-377.

[13] WANG J Q,LIU J P,WANG Z,et al.Cost-effective UHPC for accelerated bridge construction: Material properties, structural elements, and structural applications[J]. Journal of Bridge Engineering,2021,26(2):04020117.

[14] 陈宝春,李聪,黄伟,等.超高性能混凝土收缩综述[J].交通运输工程学报,2018,18(1):13-28.
CHEN Baochun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2018,18(1):13-28.

[15] 李兵,杨腾宇,方昌乐,等.蒸养条件下超高性能混凝土收缩试验研究[J].中外公路,2024,44(6):90-97.
LI Bing,YANG Tengyu,FANG Changle,et al.Experimental investigation on shrinkage effect of ultra-high performance concrete under steam curing[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(6):90-97.

[16] 赵辛玮,肖汝诚,孙斌,等.常温养护型超高性能混凝土组合桥面板收缩性能研究[J].中外公路,2020,40(3): 100-108.
ZHAO Xinwei,XIAO Rucheng,SUN Bin,et al.Study on shrinkage performance of composite bridge deck with ultra-high performance concrete cured in normal temperature[J].Journal of China & Foreign Highway,2020, 40(3):100-108.

[17] SUN Y,YU R,SHUI Z H,et al.Understanding the porous aggregates carrier effect on reducing autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC) based on response surface method[J]. Construction and Building Materials,2019,222:130-141.

[18] YANG L, SHI C J, WU Z M. Mitigation techniques for

autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 178: 107456.

[19] LIU K Z, LONG Y, CHEN L Y, et al. Mechanisms of autogenous shrinkage for ultra-high performance concrete (UHPC) prepared with pre-wet porous fine aggregate (PFA)[J].Journal of Building Engineering,2022,54:104622.

[20] LIU J H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. Effects of pretreated fine lightweight aggregate on shrinkage and pore structure of ultra-high strength concrete[J]. Construction and Building Materials,2019,204:276-287.

[21] LIU K Z, YU R, SHUI Z H, et al. Influence of external water introduced by coral sand on autogenous shrinkage and microstructure development of ultra-high strength concrete (UHSC)[J].Construction and Building Materials, 2020,252:119111.

[22] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015,76:82-90.

[23] LI S K, MO L W, DENG M, et al. Mitigation on the autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete via using MgO expansive agent[J]. Construction and Building Materials,2021,312:125422.

[24] CAO F Z, MIAO M, YAN P Y. Hydration characteristics and expansive mechanism of MgO expansive agents[J]. Construction and Building Materials,2018,183:234-242.

[25] 刘路明,方志,黄政宇,等.膨胀剂与内养剂对超高性能混凝土性能的影响[J].硅酸盐学报,2020,48(11):1706-1715.
LIU Luming,FANG Zhi,HUANG Zhengyu,et al.Effects of expansive agent and super-absorbent polymer on performance of ultra-high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2020,48(11):1706-1715.

[26] 龚建清,罗鸿魁,张阳,等.减缩剂和HCSA膨胀剂对UHPC力学性能和收缩性能的影响[J].材料导报,2021, 35(8):8042-8048,8063.
GONG Jianqing,LUO Hongkui,ZHANG Yang,et al.Effect of shrinkage reducing agent and HCSA expansion agent on mechanical properties and shrinkage properties of UHPC[J].Materials Reports,2021,35(8):8042-8048,8063.

[27] 黄维蓉,杨玉柱,崔通,等.含粗骨料超高性能混凝土收缩变形性能的研究[J].混凝土,2021(8):99-103.
HUANG Weirong,YANG Yuzhu,CUI Tong,et al.Study on the workability and mechanical properties of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J]. Concrete,2021(8):99-103.

[28] 李聪,陈宝春,韦建刚.粗集料UHPC收缩与力学性能[J]. 交通运输工程学报,2019,19(5):11-20.
LI Cong, CHEN Baochun, WEI Jiangang. Shrinkage and mechanical properties of UHPC with coarse aggregate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2019,19 (5):11-20.

[29] 黄维蓉,杨玉柱,刘延杰,等.含粗骨料超高性能混凝土的力学性能[J].硅酸盐学报,2020,48(11):1747-1755.
HUANG Weirong, YANG Yuzhu, LIU Yanjie, et al. Mechanical properties of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2020,48(11):1747-1755.

[30] 中国建筑科学研究院,宿迁华夏建设(集团)工程有限公司.普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
China Academy of Building Research, Suqian Huaxia Construction Group. Standard for test method of performance on ordinary fresh concrete: GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

[31] 清华大学.活性粉末混凝土:GB/T 31387—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
Tsinghua University. Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015[S].Beijing:Standards Press of China,2015.

[32] 梁金国,马宝富.纤维素纤维对水泥砂浆湿度调控及性能影响研究[J].中外公路,2024,44(3):46-52.
LIANG Jinguo, MA Baofu. Effect of cellulose fiber on humidity control and properties of cement mortar[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(3):46-52.