

文章编号:1673-2049(2015)06-0058-08

掺稻壳灰活性粉末混凝土配合比试验

朱 鹏,李宗阳,屈文俊,毛文婷

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:通过试验研究了掺稻壳灰的活性粉末混凝土(RPC)的配合比,根据最大密实度理论对掺稻壳灰的RPC进行了基本配合比设计;试验比较了石英砂和天然砂2种细集料对RPC性能的影响;对不同水胶比的RPC进行试验,推荐了适宜水胶比;以稻壳灰替代硅灰,试验研究不同稻壳灰替代率对RPC的流动性、强度及耐久性的影响。结果表明:采用天然砂替代石英砂作为细骨料对RPC抗折强度、抗压强度及流动度影响不大;掺稻壳灰的RPC的适宜水胶比为0.20~0.22;随着稻壳灰替代硅灰掺量的增加,其收缩率降低且随龄期增长变化减缓,同时其抗氯离子渗透性能有所下降;建议根据不同使用性能要求选择稻壳灰部分或完全替代硅灰的RPC。

关键词:稻壳灰;活性粉末混凝土;强度;流动性;收缩;抗氯离子渗透性能;水胶比

中图分类号:TU528.2 **文献标志码:**A

Experiment on Mix Proportion of Reactive Powder Concrete with Rice Husk Ash

ZHU Peng, LI Zong-yang, QU Wen-jun, MAO Wen-ting

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The mix proportion of reactive powder concrete (RPC) with rice husk ash was investigated through experiment. On the basis of maximum density theory, the primary mix proportion of RPC with rice husk ash was designed. Influences of two kinds of fine aggregate, such as quartz sand and natural sand, on the property of RPC were investigated. Experiments on RPC with different water binder ratios were done, and a range for water binder ratio was suggested. The rice husk ash was used to replace the silica fume in RPC, and the influences of the replacement ratio on flowability, strength and durability were investigated. The results show that there is little influence on flexural strength, compressive strength and fluidity by taking natural sand as fine aggregate replacing quartz sand. The appropriate water binder ratio of RPC with rice husk ash is 0.20-0.22. With the increasing of amount of rice husk ash replacing silica fume, the shrinkage rate reduces and change slowly with ages, and the chloride-penetration resistance reduces. It is suggested that the silica fume in RPC can be replaced by rice husk ash partially or completely according to different application requirements

Key words: rice husk ash; reactive powder concrete; strength; flowability; shrinkage; chloride-penetration resistance; water binder ratio

收稿日期:2015-07-09

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51208373);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120072120008)

作者简介:朱 鹏(1981-),男,河南新乡人,讲师,工学博士,E-mail:pzhu@tongji.edu.cn。

0 引 言

活性粉末混凝土(RPC)是通过提高材料组分的细度与活性,减小材料内部的缺陷(孔隙与微裂缝)来获得高强度、高韧性、高耐久性的新型水泥基复合材料^[1-2]。RPC 原材料包括活性组分、高效减水剂和短细钢纤维等,其中活性组分通常由优质水泥、硅灰、细石英砂(粒径小于 1 mm)等构成^[3]。

RPC 中水泥用量比较高(600~900 kg·m⁻³),造成了较大的资源和能源消耗。同时,RPC 中硅灰作为主要的活性掺和料,掺量(质量分数)为 20%(水泥掺量)以上,且价格昂贵,资源较为匮乏,石英粉等细集料的使用也增加了 RPC 的成本,都使其在工程中的推广应用受到限制^[4-5]。另外,较高的水泥用量不仅增加了生产水泥所需的资源和能源消耗,还造成了不利的环境影响,如粉尘和烟尘污染、温室效应等。因此,为了降低 RPC 的成本,节约资源,减少能耗和保护环境,发展有良好经济环保性能的绿色活性粉末混凝土具有重大意义。

遵循绿色活性粉末混凝土的发展方向,在常规的水泥-硅灰二元胶凝体系基础上,有关学者合理利用工业废渣,在 RPC 中复合掺入粉煤灰、矿渣等活性掺和料,形成了水泥-硅灰-矿渣(粉煤灰)三元或水泥-硅灰-粉煤灰-矿渣四元胶凝材料体系,在减少硅灰或水泥用量的同时,进一步提高 RPC 的性能(如耐久性)^[6-8]。

研究发现,优质的稻壳灰(Rice Husk Ash,

RHA)富含 90%以上的无定形 SiO₂,具有巨大比表面积和高火山灰活性^[9-10],可作为一种理想的混凝土活性矿物掺料。各国已有一些学者对稻壳灰混凝土各方面的性能进行了相关研究,包括工作性能^[11-12]、孔隙特性^[13-14]、强度^[15-16]及耐久性能^[15,17],稻壳灰不仅可以提高混凝土的强度,还可以改善混凝土的耐久性。此外,稻壳灰来源广泛,对其进行合理利用具有良好的经济环保效益^[18]。因此可将稻壳灰作为一种绿色环保的新型活性掺料应用于混凝土中。本文的主要研究内容是稻壳灰对 RPC 的强度、工作性能以及耐久性能的影响。

1 原材料

水泥采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,其化学成分见表 1,物理性能见表 2^[19];硅灰由上海某公司生产,其平均粒径为 0.26 μm,比表面积大于 20 m²·g⁻¹,化学成分见表 3;石英砂粒径为 200~650 μm,平均粒径为 280 μm;筛分后天然砂粒径为 150~8 000 μm,平均粒径约为 300 μm;高效减水剂为上海建筑科学研究院研制生产的 TF-8101B 聚羧酸高性能减水剂,固含量(质量分数,下文同)为 41%,减水率为 31.8%。

表 1 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥的化学成分

Tab. 1 Chemical Composition of P. O 42.5 Common Portland Cement

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
含量/%	23.250	7.790	2.410	46.780	0.459	0.1160	0.574	4.100

注:各化学成分含量为质量分数,下文同。

表 2 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥的物理性能

Tab. 2 Physical Performance of P. O 42.5 Common Portland Cement

性能参数	细度/%	密度/(g·cm ⁻³)	凝结时间/min		体积安定性	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
试验水泥	5.7	3.13	150	490	合格	5.5	7.6	24.6	44.3
标准值	≤10		≥45	≤600	合格	≥3.5	≥6.5	≥17.0	≥42.5

表 3 硅灰的化学成分

Tab. 3 Chemical Composition of Silica Fume

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
含量/%	94.510	0.870	0.100	1.560	0.430	0.330	0.082

2 试件制备和试验方法

2.1 试件制备

本文试件的制作养护方法参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)^[20],为控制流动度,设计如下搅拌制度:①将称量好的各种胶凝材料干拌 1 min;②加入 70%水和 70%的减水剂,搅拌 3

min;③加入砂子,搅拌 1 min;④加入剩余 30%水和 30%减水剂,搅拌 5 min。搅拌完成后,将拌和物浇注于试模中,在振动台(频率为 50 Hz)上振动 3~4 min,振捣密实后成型。

采用标准养护方法:试件成型后在标准养护箱中养护 24 h 后拆模,然后放置于混凝土标准养护室中养护至试验龄期,温度为(20±2)℃,湿度为 90%以上。

2.2 试验方法

根据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[21]进行流动度试验,根据《水泥胶砂强

度检验方法》(GB/T 17671—1999)进行抗压强度及抗折强度试验。

3 稻壳灰性能试验

稻壳灰尚处于试验研究阶段,没有标准化生产,不同地区和不同生产条件下的稻壳灰存在较大的差异,因此需要对试验采用的稻壳灰进行相关的物理化学检测。本文试验采用的稻壳灰为江西某厂自主生产的无碳稻壳灰,并在试验前将本次使用的稻壳灰用球磨机进行 30 min 的球磨处理,以增加稻壳灰的细度。

3.1 化学成分与密度

采用 X 射线荧光光谱仪测定稻壳灰的化学成分,结果如表 4 所示。

表 4 稻壳灰的化学成分

Tab. 4 Chemical Composition of Rice Husk Ash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
含量/%	80.08	1.30	1.21	0.45	0.40	0.17	2.34

采用李氏瓶法测定稻壳灰的密度,测定结果为 2.28 g·cm⁻³。

3.2 粒径分布

采用激光粒度仪测定稻壳灰的粒径分布,测定结果如图 1 所示。稻壳灰的平均粒径为 37.4 μm。

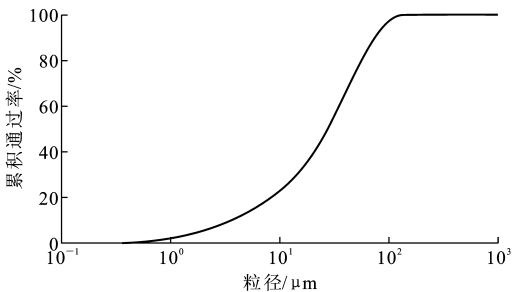


图 1 稻壳灰粒径分布

Fig. 1 Particle Size Distribution of Rice Husk Ash

3.3 需水量比

参照《高强高性能混凝土用矿物外加剂》(GB/T 18736—2002)^[22]设计基准组配合比和稻壳灰组配合比,由于稻壳灰与粉煤灰的活性以及粒径分布较为接近,试验中稻壳灰用量参照磨细粉煤灰。其

中标准砂符合《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)^[20]要求。基准组和稻壳灰组配合比如表 5 所示,其需水量比(质量比)分别由 3 个试件结果取平均值获得。

表 5 稻壳灰需水量比试验结果

Tab. 5 Test Results of Water Demand Ratio of Rice Husk Ash

组别	各材料用量/g				稻壳灰替代率/%	需水量比/%
	水泥	稻壳灰	标准砂	水		
基准组	450	0	1 350	225.0	0	100
稻壳灰组	315	135	1 350	240.8	30	107

由表 5 可知,稻壳灰的需水性比水泥大,水泥基材料中掺入稻壳灰可能会在一定程度上降低拌和物的流动性。

3.4 活性指数

参照《高强高性能混凝土用矿物外加剂》(GB/T 18736—2002)^[22]以及《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)^[20]测试稻壳灰活性指数,其中标准砂符合规范^[20]要求。掺稻壳灰配合比及 28 d 抗压强度和抗折强度如表 6 所示,强度结果均为 3 个试件测试结果的平均值。

由试验结果可知,本文试验所采用的稻壳灰的抗压强度比为 82.8%,大于 62%,说明稻壳灰具有火山灰活性^[23]。表 7 为稻壳灰火山灰效应分析结果。

根据抗压强度比得到的活性指数只能反映掺和料是否有火山灰活性,而不能反映掺和料火山灰活性的高低。蒲心诚^[24]提出以“火山灰活性效应强度贡献率”来反映掺和料的火山灰活性高低,计算得到稻壳灰活性指数为 0.58,反映了其火山灰活性与水泥火山灰活性的比值,说明基本达到活性掺和料要求。

4 配合比设计

本文采用稻壳灰作为活性粉末混凝土中的掺和料,与硅灰、水泥一起形成三元胶凝材料混合体系。根据基于 Dinger-Funk 方程^[25]最紧密堆积模型的配合比设计方法^[26],进行活性粉末混凝土的配合比

表 6 稻壳灰活性指数试验结果

Tab. 6 Test Results of Activity Index of Rice Husk Ash

组别	各材料用量/g				稻壳灰替代率/%	28 d 抗压	28 d 抗压	28 d 抗折	28 d 抗折
	水泥	稻壳灰	标准砂	水		强度/MPa	强度比/%	强度/MPa	强度比/%
基准组	450	0	1 350	225	0	44.3	100.0	7.3	100.0
稻壳灰组	315	135	1 350	225	30	36.7	82.8	6.2	84.9

表 7 稻壳灰火山灰效应分析结果
Tab. 7 Analysis Results of Pozzolanic
Effect of Rice Husk Ash

基准组比强度/MPa	0.443
含掺和料组比强度/MPa	0.524
火山灰效应比强度/MPa	0.091
火山灰效应强度贡献率/%	17.4
活性指数	0.58

设计。

首先测得各固体原材料的粒径分布,如图 2 所示。然后确定目标函数、调节函数以及相关限制条件。按基于 Dinger-Funk 方程的配合比设计方法求解,结果见图 2 及表 8。

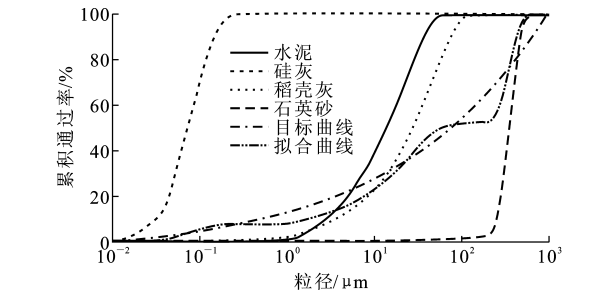


图 2 RPC 组分粒径分布曲线
Fig. 2 Particle Size Distribution Curves of RPC Components

表 8 配合比设计求解结果

原材料	水泥	硅灰	稻壳灰	石英砂	水
体积/m ³	0.234 2	0.062 3	0.040 9	0.372 8	0.249 8
质量/kg	726.0	137.1	93.3	987.9	249.8
质量比	0.759	0.143	0.098	1.032	0.260

由图 2 及表 8 可知,对于掺有稻壳灰的活性粉末混凝土,当各固体原材料如水泥、硅灰、稻壳灰、石英砂的配合比为 1 : 0.18 : 0.13 : 1.03 时,体系可接近最密实堆积状态,由此选定最佳配合比,如表 9 所示。

表 9 设计最佳配合比

组别	胶凝材料比例			石英砂
	水泥	硅灰	稻壳灰	
基准组	1	0.25	0.0	1.0
稻壳灰组	1	0.15	0.1	1.0

5 细集料对比试验

试验研究石英砂和天然砂 2 种细集料对 RPC 性能的影响。进行流动度、抗压强度及抗折强度试验,不同细集料试验配合比如表 10 所示,测试结果

表 10 不同细集料的 RPC 试验配合比
Tab. 10 Test Mix Proportion of RPC with
Different Kinds of Fine Aggregate

试件 编号	水胶比	胶凝材料比例			砂子 种类	砂胶比	减水剂 质量分数
		水泥	硅灰	稻壳灰			
RQ	0.20	1	0.15	0.1	石英砂	1.0	0.025
RN	0.20	1	0.15	0.1	天然砂	1.0	0.025

见表 11,其中每个数据由 3 个试件结果取平均值。

表 11 不同细集料的 RPC 试验结果

试件编号	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		流动度/mm
	7 d	28 d	7 d	28 d	
	7 d	28 d	7 d	28 d	
RQ	12.0	13.7	65.4	96.7	165
RN	13.6	14.3	59.6	90.4	170

由表 11 可知:对于掺有稻壳灰的活性粉末混凝土,采用经过筛分的天然砂作为细骨料,其流动度比掺石英砂的 RPC 略高;其抗折强度与掺石英砂的 RPC 相近,抗压强度略低于掺石英砂的 RPC。

天然砂的级配较石英砂更为连续,分布更均匀,如图 3 所示,能与其他固体原材料颗粒形成更为紧密的堆积状态。基于 Dinger-Funk 方程的配合比设计结果(图 3)也表明,采用天然砂的 RPC 配合比计算曲线与目标曲线拟合程度略优于石英砂。由于石英砂具有优良的质地,其 SiO₂ 含量高,莫氏硬度高,且颗粒圆整光洁,杂质少,而天然砂成分复杂,杂质含量较多,因此,掺天然砂的 RPC 强度略低于掺石英砂的 RPC 强度。

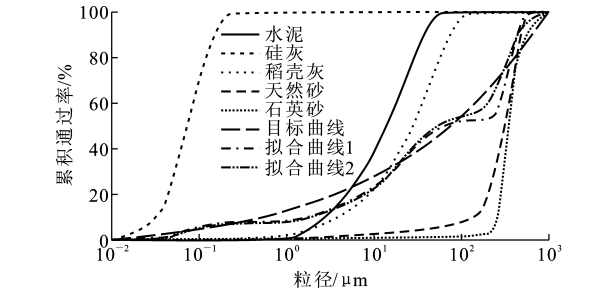


图 3 天然砂和石英砂的粒径分布及拟合曲线
Fig. 3 Particle Size Distribution and Fitting
Curves for Natural Sand and Quartz Sand

采用天然砂替代石英砂作为细骨料对 RPC 强度及流动度的影响不大。以下试验均采用天然砂作为 RPC 的细骨料。

6 水胶比试验

在以上得出的设计最佳配合比基础上进行水胶比试验,试验所用减水剂采用其厂家推荐用量,即胶

凝材料质量的 2%。表 12 为稻壳灰活性粉末混凝土水胶比试验配合比。根据相关文献[27],[28],活性粉末混凝土水胶比范围为 0.16~0.24,试验以 0.02 为差值进行掺有稻壳灰活性粉末混凝土在不同水胶比下的强度及流动度试验,每种配合比的抗压强度、抗折强度以及流动度分别由 3 个试件取平均值获得,试验结果如表 13 所示。

表 12 稻壳灰活性粉末混凝土水胶比试验配合比

Tab. 12 Test Mix Proportion of RPC with Rice Husk Ash Under Different Water Binder Ratios

试件编号	水胶比	胶凝材料比例			砂胶比	减水剂 质量分数
		水泥	硅灰	稻壳灰		
WB-1	0.16	1	0.15	0.1	1.0	0.025
WB-2	0.18	1	0.15	0.1	1.0	0.025
WB-3	0.20	1	0.15	0.1	1.0	0.025
WB-4	0.22	1	0.15	0.1	1.0	0.025
WB-5	0.24	1	0.15	0.1	1.0	0.025

表 13 不同水胶比的稻壳灰活性粉末混凝土强度及流动度

Tab. 13 Strength and Fluidity of RPC with Rice Husk Ash Under Different Water Binder Ratios

试件编号	水胶比	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		流动度/ mm
		7 d	28 d	7 d	28 d	
WB-1	0.16	13.4	15.7	66.9	105.7	106
WB-2	0.18	12.1	14.2	69.3	108.7	131
WB-3	0.20	10.7	13.4	68.0	99.6	163
WB-4	0.22	7.8	9.7	59.0	93.5	186
WB-5	0.24	7.1	8.6	39.5	80.8	197

由表 13 可知:对于掺有稻壳灰的活性粉末混凝土的流动性,水胶比影响较大,随水胶比的增大,拌和物的流动度增大;当水胶比在 0.20~0.24 之间时,拌和物流动性很好,很容易振捣成型;当水胶比为 0.18 时,拌和物较粘稠,但仍具有较好的流动性。

对于掺有稻壳灰的活性粉末混凝土,其抗折强度及抗压强度随着水胶比的增大总体呈逐渐减小的趋势,当水胶比从 0.22 增大到 0.24 时,抗压强度有明显下降。当水胶比从 0.16 增大到 0.18 时,抗压强度略有增大,这可能是由于在水胶比为 0.16 时,混凝土拌和物的流动性较差,在成型过程中不易振捣密实,从而影响了其抗压强度。

综合考虑强度和流动性,稻壳灰活性粉末混凝土的适宜水胶比为 0.20~0.22。

7 稻壳灰替代硅灰试验

7.1 流动度、抗压强度及抗折强度

稻壳灰以 0%,20%,40%,60%,80%,100%的

替代率替代 RPC 中的硅灰,配合比见表 14,试验研究不同替换率对 RPC 性能(抗压强度、抗折强度、流动度)的影响。每种配合比的抗压强度、抗折强度及流动度分别由 3 个试件结果取平均值获得,结果如表 15 所示。

表 14 稻壳灰替代硅灰试验配合比

Tab. 14 Test Mix Proportion of Rice Husk Ash Replacing Silica Fume

试件 编号	水胶比	胶凝材料比例			砂胶比	减水剂 质量分数
		水泥	硅灰	稻壳灰(替代率/%)		
RS-0	0.20	1	0.25	0.00(0)	1.0	0.025
RS-1	0.20	1	0.20	0.05(20)	1.0	0.025
RS-2	0.20	1	0.15	0.10(40)	1.0	0.025
RS-3	0.20	1	0.10	0.15(60)	1.0	0.025
RS-4	0.20	1	0.05	0.20(80)	1.0	0.025
RS-5	0.20	1	0.00	0.25(100)	1.0	0.025

表 15 稻壳灰替代硅灰试验结果

Tab. 15 Test Results of Rice Husk Ask Replacing Silica Fume

试件 编号	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa			流动度/ mm
	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	
RS-0	10.9	12.8	15.2	45.3	73.0	107.2	173
RS-1	10.3	11.4	13.4	46.3	71.2	101.8	169
RS-2	9.3	11.8	13.7	39.7	65.4	96.7	165
RS-3	8.4	9.6	12.6	34.5	58.8	85.5	160
RS-4	7.7	10.2	11.8	31.9	56.0	83.8	149
RS-5	6.5	8.5	10.4	25.6	49.1	78.2	128

由表 15 可知,稻壳灰替代硅灰时不同替代率对 RPC 强度及流动性能的影响为:

(1)在水泥用量不变的情况下,随着稻壳灰替代硅灰掺量的增加,RPC 的流动性逐渐下降。当稻壳灰替代硅灰掺量超过 60%时,拌和物流动性明显变差,流动度为 160 mm。

稻壳灰比表面积很大,稻壳灰微观粒子中存在大量微米尺度的蜂窝状稻壳纤维网络孔^[29],这些孔隙能够吸附混凝土浆体中的水分,具有表面吸水效应^[30],尤其在低水胶比下,这种对水分的吸附作用更为显著,从而降低了浆体中的自由水,使拌和物流动性下降。此外,减水剂的减水机理是通过吸附在胶凝材料的颗粒表面上释放出颗粒表面的包裹水,而稻壳灰粒子的表面积绝大部分为孔隙内表面,对于内表面吸附的表面水,减水剂无法使其释放出来,在有稻壳灰的情况下,减水剂的减水效果受到较大影响。因此当稻壳灰掺量增大时,拌和物的流动性逐渐减小。

(2)在水泥用量不变的情况下,随着稻壳灰替代

硅灰掺量的增大, RPC 的抗折强度和抗压强度总体呈逐渐下降的趋势。当稻壳灰替代率为 60% 时, RPC 的 7 d 抗压强度为 58.8 MPa, 28 d 抗压强度为 85.5 MPa。

稻壳灰的化学成分中 SiO₂ 含量较高, 与硅灰相差不大, 但可能由于煅烧温度和制度的影响, 其晶体 SiO₂ 的含量偏高, 影响了稻壳灰的活性发挥, 因此稻壳灰的火山灰活性比硅灰低。随着稻壳灰替代硅灰掺量的逐渐增加, RPC 的强度逐渐降低。其次, 从矿物掺和料的物理填充效应来看, 随着稻壳灰和硅灰掺入比例的改变, 体系的密实度也产生了相应的变化。当硅灰的替代量过大时(超过 60%), 体系的堆积密实度下降^[26], 从而影响了最终的强度。此外, 随着稻壳灰掺量的增大, 拌和物的流动性下降。当稻壳灰完全替代硅灰时, 拌和物流动性较差, 试件在成型过程中不易振捣密实, 因此试件的密实度有所降低, 从而影响了其强度发展。

值得注意的是, 根据最大密实度理论, 硅灰与稻壳灰存在一个最佳比例掺量, 使体系的堆积密实度最大, 此时获得的强度应该较高, 但试验结果却显示, 随着稻壳灰替代硅灰掺量的增加, RPC 的强度呈逐渐下降的趋势。这说明 RPC 的最终强度同时受掺和料的物理填充效应和火山灰活性的影响, 且火山灰活性对 RPC 强度的影响更为显著。

(3) 根据流动度、抗折强度和抗压强度试验结果可知: 稻壳灰部分或完全替代硅灰时, 其流动度可以接受, 抗折强度和抗压强度较高; 稻壳灰完全替代硅灰时, 其流动度为 160 mm, 28 d 抗折强度为 10.4 MPa, 28 d 抗压强度为 78.2 MPa。

7.2 收缩性能

选取稻壳灰替代硅灰的替代率分别为 0%, 40%, 100% 的配合比(试件 RS-0, RS-2, RS-5)进行收缩性试验, 配合比见表 14。参照《水泥胶砂干缩试验方法》(JC/T 603—2004)^[31], 试验结果见表 16, 其中每个数值为 3 个试件结果取平均值。

由表 16 分析稻壳灰替代硅灰不同替代率对

RPC 收缩性能的影响为:

与单掺硅灰相比, 稻壳灰部分替代硅灰(替代率为 40%)和完全替代硅灰时, RPC 在各龄期的收缩率都小于单掺硅灰的 RPC, 且其收缩率随龄期增大变化较缓慢, 这是由于火山灰活性较低和粒径相对较大的稻壳灰替代硅灰的掺入减少了由于硅灰的高火山灰活性导致的自收缩效应^[32-33]。

7.3 抗氯离子渗透性能

参照 ASTM C1202-2010 规范^[34], 采用 NEL-PEU 型混凝土电通量测定仪进行 RPC 抗氯离子渗透性能的检测。稻壳灰以 0%, 40% 和 100% 替代 RPC 中的硅灰, 试验研究不同替换率对 RPC 抗氯离子渗透性能的影响, 配合比见表 14。每种配合比的电通量分别由 3 个试件取平均值获得, 试验结果见表 17。

表 17 稻壳灰掺量变化对 RPC 抗氯离子渗透性能影响试验结果

Tab. 17 Test Results of Property of Chloride-penetration Resistance by Variable Amounts of Rice Husk Ash		
试件编号	电通量/C	抗氯离子渗透性能
RS-0	60.10	可忽略
RS-2	104.30	可忽略
RS-5	187.65	极低

由表 17 可知, 随着稻壳灰替代硅灰的替代率增加, RPC 的抗氯离子渗透性能逐渐下降。相对于不掺稻壳灰的 RPC, 部分替代硅灰(40%)的 RPC 电通量上升了 73.5%, 这是由于硅灰具有更高的火山灰活性, 促进二次水化反应产生 C-S-H 凝胶, 使 RPC 结构更加致密^[35], 稻壳灰部分替代硅灰虽然抗氯离子性能下降, 但仍然很好; 当稻壳灰完全替代硅灰时, 相对于不掺稻壳灰的 RPC 电通量上升了 212.2%, 虽然稻壳灰的火山灰活性效应和微观颗粒对氯离子的物理吸附固化作用优异, 但可能由于稻壳灰对拌和物流动性的降低作用, 使得稻壳灰完全替代硅灰情况下, 掺稻壳灰 RPC 的密实度有所下降, 所以其抗氯离子渗透性能受到较大影响。

8 结 语

(1) 采用 X 射线荧光光谱仪测定稻壳灰的化学成分, 本文所采用的稻壳灰的主要活性成分为 SiO₂; 采用李氏瓶法测定稻壳灰的密度为 2.28 g·cm⁻³; 采用激光粒度仪测定稻壳灰的粒径分布, 平均粒径为 37.4 μm; 需水量比为 107%; 抗压强度比为 82.8, 活性指数为 0.58, 其具有一定的火山灰

表 16 稻壳灰替代硅灰 RPC 收缩试验结果							
Tab. 16 Shrinkage Test Results of Rice Hush Ask Replacing Silica Fume RPC							
试件编号	不同龄期(d)下的收缩率/10 ⁻⁶						
	1	3	7	14	28	45	60
RS-0	281	556	724	872	936	944	952
RS-2	199	320	520	598	640	662	675
RS-5	108	262	387	503	602	642	667

活性。

(2)根据最大密实度理论,选择水泥、硅灰、稻壳灰、石英砂基本配合比为 $1:0.15:0.1:1.0$ 。

(3)试验比较石英砂和天然砂 2 种不同细集料对 RPC 性能的影响,结果表明:采用天然砂替代石英砂作为细骨料对 RPC 抗折强度、抗压强度及流动度影响不大。

(4)随着水胶比的增大($0.16\sim0.24$),掺稻壳灰的 RPC 流动性增大,抗压强度和抗折强度总体呈下降趋势。综合流动度、抗压强度和抗折强度试验结果,掺稻壳灰 RPC 的适宜水胶比为 $0.20\sim0.22$ 。

(5)随着稻壳灰替代硅灰掺量的增加,RPC 的流动度下降,当替代率超过 60% 时,流动度显著变差,为 160 mm ;抗压强度和抗折强度总体呈平稳下降趋势,当替代率为 60% 时,RPC 的 7 d 抗压强度为 58.8 MPa ,28 d 抗压强度为 85.5 MPa 。

(6)随着稻壳灰替代硅灰掺量的增加,其收缩率降低且随龄期增长变化缓慢。

(7)随着稻壳灰替代硅灰掺量的增加,其抗氯离子渗透性能有所下降,稻壳灰在 100% 替代硅灰时,氯离子渗透仍极低。

(8)综合流动度、抗折强度、抗压强度及耐久性以及经济性和环保性等,建议根据不同使用性能要求选择稻壳灰部分或完全替代硅灰的 RPC。

参考文献:

References:

- [1] PAN G, SUN W, DING D, et al. Experimental Study on the Micro-aggregate Effect in High-strength and Super-high-strength Cementitious Composites[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(2): 171-176.
- [2] LANGE F, MARTEL H, RUDERT V. Dense Packing of Cement Pastes and Resulting Consequences on Mortar Properties [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(10): 1481-1488.
- [3] CHEYREZY M, MARET V, FROUIN L. Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete) [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1491-1500.
- [4] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of Reactive Powder Concretes [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [5] AHMAD S, ZUBAIR A, MASLEHUDDIN M. Effect of the Key Mixture Parameters on Shrinkage of Reactive Powder Concrete [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 1-8.
- [6] 未翠霞, 宋少民. 大掺量粉煤灰活性粉末混凝土耐久性研究[J]. 新型建筑材料, 2005(9): 27-29.
WEI Cui-xia, SONG Shao-min. Study on Durability of High Content Fly Ash Active Powder Concrete [J]. New Building Materials, 2005(9): 27-29.
- [7] 施 韬. 掺矿渣活性粉末混凝土及其高耐久性的研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
SHI Tao. Study on the Reactive Powder Concrete with Blast-furnace Slag and Its High Durabilities [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2004.
- [8] 施惠生, 施 韬, 陈宝春, 等. 掺矿渣活性粉末混凝土的抗氯离子渗透性研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 93-96.
SHI Hui-sheng, SHI Tao, CHEN Bao-chun, et al. Research of Chloride Ion Diffusivity in Reactive Powder Concrete with Blast-furnace Slag [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(1): 93-96.
- [9] 欧阳东, 陈 楷. 稻壳灰显微结构及其中纳米 SiO_2 的电镜观察[J]. 电子显微学报, 2003, 22(5): 390-394.
OUYANG Dong, CHEN Kai. SEM/TEM Study on the Microstructure of Rice Husk Ash and Nano- SiO_2 in It [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2003, 22(5): 390-394.
- [10] 欧阳东, 陈 楷. 低温焚烧稻壳灰的显微结构及其化学活性[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(11): 1121-1124.
OUYANG Dong, CHEN Kai. Microstructure and Chemical Activity of Rice Husk Ash Burned at Low Temperature [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2003, 31(11): 1121-1124.
- [11] IKPONG A A, OKPALA D C. Strength Characteristics of Medium Workability Ordinary Portland Cement-rice Husk Ash Concrete [J]. Building and Environment, 1992, 27(1): 105-111.
- [12] BUI D D, HU J, STROEVEN P. Particle Size Effect on the Strength of Rice Husk Ash Blended Gap-graded Portland Cement Concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(3): 357-366.
- [13] DE SOUZA RODRIGUES C, GHAVAMI K, STROEVEN P. Porosity and Water Permeability of Rice Husk Ash-blended Cement Composites Reinforced with Bamboo Pulp [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41(21): 6925-6937.
- [14] FENG Q G, LIN Q Y, TONG Z F, et al. Study on Preparation of Rice Husk Ash with High Specific Surface Area and Its Chemical Reactivity [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12(5): 711-715.

- [15] SARASWATHY V, SONG H W. Corrosion Performance of Rice Husk Ash Blended Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(8): 1779-1784.
- [16] VAN TUAN N, YE G, VAN BREUGEL K, et al. Hydration and Microstructure of Ultra High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(11): 1104-1111.
- [17] 余其俊, 赵三银, 冯庆革, 等. 活性稻壳灰对混凝土强度和耐久性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(2): 15-19.
YU Qi-jun, ZHAO San-yin, FENG Qing-ge, et al. The Effect of Highly Reactive Rice Husk Ash on the Strength and Durability of Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(2): 15-19.
- [18] 任素霞. 稻壳灰资源的综合利用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
REN Su-xia. Research on the Comprehensive Utilization of Rice Husk[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [19] GB 175—2007, 通用硅酸盐水泥[S].
GB 175—2007, Common Portland Cement[S].
- [20] GB/T 17671—1999, 水泥胶砂强度检验方法(ISO法)[S].
GB/T 17671—1999, Method of Testing Cements-determination of Strength[S].
- [21] GB/T 2419—2005, 水泥胶砂流动度测定方法[S].
GB/T 2419—2005, Test Method for Fluidity of Cement Mortar[S].
- [22] GB/T 18736—2002, 高强高性能混凝土用矿物外加剂[S].
GB/T 18736—2002, Mineral Admixtures for High Strength and High Performance Concrete[S].
- [23] 中国建筑材料科学研究院. 水泥物理检验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
China Building Materials Academy. Cement Physical Inspection[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [24] 蒲心诚. 超高强高性能混凝土[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004.
PU Xin-cheng. Super High Strength High Performance[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2004.
- [25] DINGER D R, FUNK J K. Particle Size Analysis Routines[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1989, 68(8): 1406-1408.
- [26] 彭艳周. 钢渣粉活性粉末混凝土组成、结构与性能的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
PENG Yan-zhou. Study on Composition, Structure and Properties of Reactive Powder Concrete Containing Steel Slag Powder[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [27] 覃维祖. 活性粉末混凝土的研究[J]. 石油工程建设, 2002, 28(3): 1-3.
QIN Wei-zu. Study on Reactive Powder Concrete[J]. Petroleum Engineering Construction, 2002, 28(3): 1-3.
- [28] 谢友均, 刘宝举, 龙广成. 掺超细粉煤灰活性粉末混凝土的研究[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(3): 280-284.
XIE You-jun, LIU Bao-ju, LONG Guang-cheng. Study on Reactive Powder Concrete with Ultra-pulverized Fly Ash[J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(3): 280-284.
- [29] GIVI A N, RASHID S A, AZIZ F N A, et al. Assessment of the Effects of Rice Husk Ash Particle Size on Strength, Water Permeability and Workability of Binary Blended Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11): 2145-2150.
- [30] 欧阳东. 粉煤灰及其它矿物掺合料对新拌和硬化混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(4): 14-16.
OUYANG Dong. Effects on Properties of Fresh Concrete with Fly Ash and Other Admixture[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2003(4): 14-16.
- [31] JC/T 603—2004, 水泥胶砂干缩试验方法[S].
JC/T 603—2004, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar[S].
- [32] TAM C M, TAM V W Y, NG K M. Assessing Drying Shrinkage and Water Permeability of Reactive Powder Concrete Produced in Hong Kong[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 79-89.
- [33] 刘泰松. 活性粉末混凝土的收缩理论和试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
LIU Tai-song. Shrinkage and Test of Reactive Powder Concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [34] ASTM C1202-2010, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration[S].
- [35] HONGMEI H, BAOGUO M. The Influence of Mineral Functional Materials on Chloride Ion Penetration of Concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2005, 20(1): 106-110.