

掺合建筑垃圾微粉混凝土的性能研究

朱鹤云, 张晶磊, 唐凤, 王尧, 周志云

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 针对建筑垃圾微粉的资源化处理, 将粒径小于 0.16mm 的建筑垃圾微粉作为混凝土的掺合料, 按照 0%、5%、10%、15%、20% 的比例取代水泥制作混凝土, 对其进行抗压强度、抗折强度、抗渗性、淡水冻融循环、人工海水冻融循环试验来对其作为掺合料的对混凝土性能影响进行研究。研究表明: 随着微粉掺加比例的增加, 混凝土强度降低; 在 5 组微粉掺量不同的试验组中, 掺加比例为 5% 时的混凝土抗折、抗渗、抗冻性能较优; 减水剂的加入有效改善了掺量较大时混凝土性能下降的问题; 将建筑垃圾微粉作为混凝土掺合料具有环保和经济意义。

关键词: 建筑垃圾微粉; 掺和料; 混凝土; 冻融

中图分类号: TV423

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)01-0183-06

Study on properties of concrete with admixture of construction waste powder performance

ZHU Heyun, ZHANG Jinglei, TANG Feng, WANG Yao, ZHOU Zhiyun

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to carry out resource treatment for construction waste powder, the paper took construction waste micro whose particle size is less than 0.16 mm as admixture of concrete, according to powder ratio of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, the cement is replaced by the powder so as to make concrete. In order to explore the effects of the construction waste powder as concrete admixture, it tested ompressive strength, flexural strength, permeability resistance, freeze-thaw cycle both in fresh water and artificial seawater. The result indicated that with the increase of powder mixing proportion, the strength of concrete decreases; the flexural performance, anti-permeability and frost-resistance capability of concrete is optimal when adding proportion of powder is 5% in the five groups of test; water reducer can improve the problem of reducing performance of concrete with large powder adding amount; the utilization of construction waste powder as concrete admixture has environmental protection and economic significance.

Key words: construction waste powder; admixture; concrete; freeze-thaw

随着城市化建设进程的加快, 建筑行业也同时经历着快速发展。一方面, 由于城市建筑的更新和市政动迁规模的不断扩大而产生的废弃混凝土量急剧攀升, 据统计建筑垃圾的数量已占到中国城市垃圾总量的 1/3 以上, 每年新产生的建筑垃圾将超过 3 亿 t, 其中废弃混凝土块所占比例高达 34% 以上^[1]; 另一方面, 因我国对混凝土材料的需求量急剧增加, 从而对混凝土拌合材料各组分的需求量也明显加大, 由此引发的环境问题十分突出^[2]。因此, 合理利用废弃混凝土这类建筑垃圾将会带来显

著的社会效益、经济效益和环保效益, 更对我国的可持续发展具有战略意义^[3]。

然而, 截止目前, 相对成熟的废弃混凝土再生利用研究也主要局限在利用废弃混凝土得到再生骨料进而制备再生混凝土等方面, 而对于在再生骨料的生产过程中产生的占原料质量 15% 左右的废弃混凝土微粉再生利用的研究进展并不大, 对此依然存在许多问题, 仍无法实现对废弃混凝土的完全再生利用^[4-5]。

通过对 5 种不同比例取代水泥量的建筑垃圾微粉作为掺合料的混凝土进行材性试验和冻融试验,

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2014-08-21

基金项目: 上海大学生创新创业训练计划(SH2012095)

作者简介: 朱鹤云(1991-), 女, 山西长治人, 本科, 从事混凝土结构耐久性方面的研究工作。

通讯作者: 张晶磊(1989-), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事混凝土结构低温耐久性方面的研究工作。

研究其对混凝土性能的影响以及作为混凝土掺合料的潜力,为今后将建筑垃圾微粉作为混凝土掺合料的应用提供试验依据。

1 试验简介

1.1 建筑垃圾微粉

建筑垃圾微粉通常在对废弃混凝土构筑物进行重新利用的破碎、整形过程中产生,其微粒径不大于 0.16 mm。研究结果显示^[6],此类废弃混凝土微粉的主要成分含量依次是 SiO₂、C-S-H 物质和 CaCO₃。其中 SiO₂ 含量较大,微粉中含有的 CaCO₃ 拥有形成水化碳铝酸钙或水化碳硅酸钙的能力,含有的水泥凝胶则有作为水泥水化晶胚的可能,含有的未水化完全的水泥颗粒则具有继续水化形成凝胶产物的能力,具有一定的活性,而该微粉中未水化的胶凝材料的比例决定了其活性程度。

表 1 混凝土试件配合比

微粉掺量/%	水泥/(kg·m ⁻³)	微粉/(kg·m ⁻³)	砂(中)/(kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	减水剂/(kg·m ⁻³)	试验项目
0	350.0	0	656.0	1219	175	0	C,F,P,FT
5	332.5	17.5	653.9	1219	175	0	C,F,P,FT
10	315.0	35.0	651.8	1219	175	0	C,F,P,FT
15	297.5	52.5	649.8	1219	175	0	C,F,P,FT
20	280.0	70.0	647.7	1219	175	0	C,F,P
20	280.0	70.0	647.7	1219	175	2.24	FT

表 2 冻融环境溶液配比

g/L

纯水	人工海水
	NaCl 浓度为 27.0
	MgCL ₂ 浓度为 3.20
实验室自来水	MgSO ₄ 浓度为 2.20
	CaSO ₄ 浓度为 1.30

2 试验结果及分析

2.1 力学试验结果及分析

本部分试验按照表 1 的混凝土配合比在不添加减水剂的情况下制作混凝土试件,并在浙江省衢州市开化江松商品混凝土有限责任公司实验室完成指定试验项目。5 种比例的建筑垃圾作掺合料的混凝土 7d、28d 抗压强度试验(C)值,28d 抗折强度试验(F)值,28d 抗渗性试验(P)的渗水高度值结果见表 3。

试验结果具有以下特点:

(1)不同掺加比例的建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土试件成型后的外观以及破坏形态没有明显差异。

(2)各比例的建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土

经分析,试验所用建筑垃圾微粉的主要成分为废弃混凝土微粉,废弃水泥微粉占到 95% 以上。

1.2 试验设计

本试验将收集的粒径小于 0.16 mm 的建筑垃圾微粉作为混凝土的掺合料,按照 0%、5%、10%、15%、20% 的比例取代水泥进行掺加,抗冻融循环试验部分的 20% 微粉掺量抗冻试块需加入少量减水剂(0.8%)。实验按照《混凝土强度检验评定标准》(GB/T 50107-2010)^[7]、《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)^[8]、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)^[9]对成型的混凝土试件进行抗压强度、抗折强度、抗渗性、淡水冻融循环、人工海水冻融循环试验。

将试验项目进行编号:抗压强度试验(C)、抗折强度试验(F)、抗渗性试验(P)、冻融循环试验(FT)。各组试件配合比见表 1,冻融环境液配比见表 2。

早期强度差别不大;当掺量不超过 5% 时,混凝土 28 d 强度等级仍处在同一级别,并且不超过 10% 的情况下混凝土仍处在较高强度状态。

(3)掺加比例为 5% 的混凝土抗折强度最高,掺量为 0% 和 10% 的混凝土抗折强度相当。

(4)掺量为 5% 和 10% 的混凝土渗水高度最低,0% 的混凝土次之。

表 3 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土试验结果

水泥取代量/%	7d 抗压强度/MPa	28d 抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	渗水高度/mm
0	36.5	49.3	5.04	58.0
5	35	45	5.20	52
10	33.3	43.5	4.78	52.0
15	32.6	40.4	4.56	70.0
20	29.3	35.7	4.32	95.0

由试验结果可知:建筑垃圾微粉作为掺合料的混凝土早期强度较高,但是由于水泥比例的下降,导致

混凝土的 28d 抗压强度随着建筑垃圾微粉的掺量提高而减小;由于建筑垃圾微粉作为掺合料具有一定的改善混凝土内部结构的活性,提高了混凝土的粘结性,因此在掺加比例为 5% 时提高了混凝土的抗折性能;同时,微粉的填充作用以及微集料性质,在其比例不超过 10% 时,提高了混凝土的抗渗性能。

2.2 冻融循环试验结果及分析

本部分试验在上海理工大学环境与建筑学院结构工程专业试验室完成。试验利用快冻法对 5 种不同比例的建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土进行淡水、人工海水冻融循环试验(FT)^[10],冻融前后的外观见图 4~9。



图 1 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土抗压试块



图 2 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土抗折试块

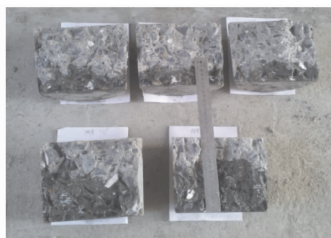


图 3 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土抗渗劈裂试块



图 4 未经冻融前



图 5 经 25 次淡水冻融循环



图 6 经 50 次淡水冻融循环

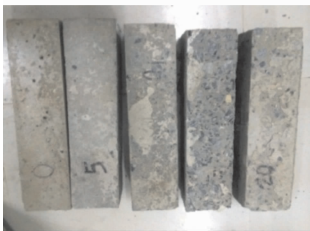


图 7 经 75 次淡水冻融循环



图 8 经人工海水冻融循环 25 次



图 9 经人工海水冻融循环 50 次

在淡水和人工海水环境下冻融循环过程中,试件的外观呈现:

(1)冻融未开始时,各个掺量的建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土外观没有明显区别。

(2)经 25 次淡水冻融循环之后各组试块出现不同程度的冻融损伤外观变化,试件边缘处先开始发生冻害剥蚀,其中掺量为 5% 的混凝土试块外观变化不明显仅在表面出现一些微小孔隙,掺量 10% 和 15% 的试块出现了一定的表面混凝土剥离,掺量 0% 和 20% 的试件出现了表面粗糙和微小洞;相比较而言,经 25 次人工海水冻融循环之后各组混凝土均有较大程度的侵蚀破坏,特别在边缘和角部破坏严重,有少量骨料暴露在外,就外观而言掺量为 15% 的试件破坏程度相对严重,其他试件外观相差

不是非常大。

(3)经 50 次淡水冻融循环之后,各组混凝土试件开始出现不同程度的剥蚀,掺量 10% 和 15% 的破坏尤为严重,能在表面看见内部粗骨料,掺量为 0% 和 20% 的试件冻害程度相当,在试件表面的混凝土已经开始纷纷剥离;经 50 次海水冻融循环之后,各组混凝土试件每个表面的混凝土都几乎溃散剥离露出骨料,掺量为 10%、15%、20% 的混凝土试件相对严重。

(4)经过 75 次淡水冻融循环之后,各组试件已经开始出现更大程度的冻融破坏,观测外观,掺量为 5% 的试件除了表面出现粗糙和不少空洞外仍保持一定的形态,掺量 0% 和 20% 的试件破坏程度仍旧相当,但是掺量为 20% 的试件除了外表孔洞数以及

剥蚀量比掺量为 0% 的试件大之外,侵蚀已经开始
看见表面内部的粗骨料,掺量 10% 的试件表面大部
分面积的混凝土已经溃散,而掺量为 15% 的试件破

坏情况更加严重,几乎表层混凝土已经全部剥离并
露出骨料。表 4~表 7 为不同微粉掺量试件在淡水
冻融循环下的试验结果。

表 4 经淡水冻融循环后试件重量及其失重率

kg, %

微粉 掺量	冻融次数及试件重量								失重率
	0	10	15	25	35	50	60	75	
0	9.812	9.804	9.803	9.803	9.802	9.797	9.787	9.717	0.968
5	9.840	9.834	9.834	9.829	9.817	9.815	9.815	9.807	0.335
10	9.826	9.802	9.800	9.792	9.791	9.753	9.732	9.717	1.109
15	9.537	9.519	9.497	9.481	9.475	9.456	9.387	9.280	2.695
20	9.953	9.943	9.940	9.931	9.929	9.928	9.897	9.887	0.663

表 5 经淡水冻融循环后试件的动弹性模量及其损失率

GPa, %

微粉 掺量	冻融次数及试件弹性模量								损失率
	0	10	15	25	35	50	60	75	
0	36.841	35.963	34.500	33.660	32.976	29.930	29.621	25.575	30.58
5	36.786	36.114	35.772	33.749	31.984	31.086	30.935	27.216	25.90
10	34.526	33.324	31.010	30.868	30.432	29.903	27.440	26.455	23.38
15	32.056	30.864	29.910	27.802	27.313	19.601	17.222	16.676	47.98
20	37.788	34.686	30.930	30.724	30.495	29.611	26.972	24.355	35.55

表 6 经淡水冻融后试件轴心抗压强度
及其损失率

MPa, %

微粉 掺量	冻融次数		损失率
	0	75	
0	23.2	21.8	6.0340
5	21.0	20.1	4.2860
10	19.2	18.3	4.6880
15	17.5	11.5	34.286
20	21.5	16.0	25.581

表 7 经淡水冻融循环前后试件弹性模量
及其损失率

GPa, %

微粉 掺量	冻融次数		损失率
	0	75	
0	15.789	10.348	34.461
5	14.286	10.357	27.502
10	15.000	10.933	27.113
15	13.467	5.3000	60.644
20	19.533	10.367	46.926

由表 4~表 7 可知,在淡水冻融循环下实验结果呈现以下特点:

- (1) 试件的轴心抗压强度变化规律与材性试验中抗压强度变化一致;减水剂的加入提高了掺量为 20% 的混凝土的轴心抗压强度。
- (2) 微粉掺量为 5% 的混凝土失重率、轴心抗压强度损失率以及弹性模量损失率同比最低;10% 掺量的混凝土动弹性模量损失率最低。
- (3) 掺量为 20% 并加入减水剂的混凝土在重量损失、动弹性模量及其损失、轴心抗压强度及其损失、弹性模量及其损失等方面均优于 15% 掺量的混凝土。
- 实验结果表明:由于建筑垃圾微粉的活性,改善了混凝土的内部结构,增强了其抵抗冻融循环的能力,并且在掺量为 5% 时的抗冻效果提升最为明显;减水剂的加入有效改善了因建筑垃圾微粉掺量增加而引起的混凝土性能下降的问题。
- 根据表 2 的溶液对比对 5 种不同比例的建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土进行人工海水冻融循环试验,其结果见表 8~11。
- 人工海水环境下进行冻融循环试验,试件呈现出:
- (1) 试件的重量损失率在掺量为 5% 时最小,掺量为 0 和 20% 的混凝土重量损失率相当,次之。

表 8 经人工海水冻融循环前后试件的重量及其失重率				
微粉 掺量	冻融次数			失重率 kg, %
	0	25	50	
0	9.833	9.591	8.983	8.644
5	9.852	9.627	9.322	5.380
10	9.847	9.425	8.925	9.363
15	9.642	9.142	8.352	13.38
20	9.948	9.573	9.092	8.605

表 9 经人工海水冻融循环前后试件的动弹性模量及其损失率				
微粉 掺量	冻融次数			损失率 GPa, %
	0	25	50	
0	36.920	25.264	16.934	54.133
5	36.831	28.790	19.045	48.291
10	34.600	28.606	18.563	46.350
15	32.409	20.573		
20	37.769	22.400	16.075	57.439

表 10 经人工海水冻融循环前后试件的轴心抗压强度及其损失率				
微粉 掺量	冻融次数			损失率 MPa, %
	0	50		
0	23.4	19.3		17.521
5	21.7	19.0		12.442
10	19.3	16.0		17.098
15	17.7	9.70		45.198
20	22.1	14.7		33.484

表 11 经人工海水冻融循环前后试件的弹性模量及其损失率				
微粉 掺量	冻融次数			损失率 GPa, %
	0	50		
0	15.445	9.146		40.783
5	14.568	9.232		36.628
10	14.987	8.982		40.068
15	13.238	4.217		68.145
20	19.672	9.145		53.513

- (2) 试件的动弹性模量损失率在掺量为 10% 时最低,5% 掺量的混凝土次之,不掺和 20% 掺量的混凝土损失率相当。
- (3) 在轴心抗压强度损失率和弹性模量损失率方面,5% 掺量的混凝土损失最少,不掺和 10% 掺量

- 的混凝土损失率相当,次之;20% 掺量并加入减水剂的混凝土损失率小于 15% 掺量的混凝土。
- 结果显示:在海水冻融条件下,试件破坏的严重程度明显比在淡水冻融情况下大;掺量为 5% 的混凝土的抗海水冻性能最优,并且可以认为在掺量不超过 10% 时,建筑垃圾微粉作为掺合料是可以提高混凝土抗海水冻能力的;减水剂的加入提高了建筑垃圾微粉掺量较大的混凝土的抗海水冻性能。
- 综合两种环境下冻融试验的结果,可以推断由于建筑垃圾微粉作为掺合料具有一定的活性、火山集料性质等,在一定比例情况下加掺,可以提高混凝土的抗渗性能以及内部结构,在掺量为 5% 时表现出了明显优于不掺入时的抗冻性能;同时,减水剂对建筑垃圾微粉掺量较大而引起混凝土性能明显下降的改善作用巨大;并且在掺量不超过 10% 时可以认为建筑垃圾微粉是对混凝土抗冻性能起到提升作用的。
- ### 3 结 语
- (1) 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土抗压强度的结果表明,其抗压强度随着掺加比例提高而下降,超过 10% 后下降明显。
- (2) 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土抗折强度的结果表明,当微粉掺量为 5% 时的混凝土抗折性能最好,同时掺量不宜超过 10%。
- (3) 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土抗渗性试验的结果表明,微粉掺量为 5% 的混凝土抗渗性能最好,且在微粉掺量小于 10% 对其抗渗性能有所提高,超过 10% 之后性能下降明显。
- (4) 建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土淡水冻融循环、人工海水冻融循环试验的结果表明,海水环境下冻融破坏程度远远大于淡水环境下,微粉掺量小于 10% 的混凝土的抗冻性能得到提高,并且掺量为 5% 的混凝土抗冻性能最优;同时,减水剂的加入对大掺量(20%) 的建筑垃圾微粉作掺合料的混凝土的强度和抗冻性能提升显著。
- 综上所述,在不掺合混凝土添加剂的情况下,建筑垃圾微粉掺量为 5% ~ 10% 的混凝土性能较之普通混凝土性能有一定的提升。而掺合一定量减水剂对微粉掺量更大的混凝土性能的提升有积极作用。因此,建筑垃圾微粉作为混凝土掺合料切实可行,在经济和环保方面有一定潜力,但还需要更多的学者对其进行研究并建立更加完善系统的体系,使之得以应用于工程实际。

参考文献:

[1] 刘庆涛,岑国平,吴和盛,等. 机场道面再生混凝土干缩性能研究与应用[J]. 四川建筑科学研究,2013(1):174-177.

[2] 周宏敏,柴俊,柴华,等. 再生骨料混凝土技术及其研究现状[J]. 混凝土,2008(12):75-76.

[3] 何会会,李朋飞,韦少博,等. 基于循环经济的城市建筑垃圾处理策略[J]. 内江科技,2012(6):6.

[4] 马纯滔. 建筑垃圾再生微粉利用的试验研究[D]. 宁夏:宁夏大学,2009.

[5] 张大利,吕晶,陈辉,等. 混凝土再生微粉的研究和应用[J]. 建筑施工,2005(6):68-70.

[6] 钱大行,孙犁,张日华. 再生磨细掺合料的研制和应用[J]. 混凝土,2008(9):48-49.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50107-2010. 混凝土强度检验评定标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081-2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082-2009. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[10] 杨成学,杨文礼,杨露. 现场测试混凝土弹性模量的方法研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2010,23(5):504-507.



(上接第 182 页)

[3] 王华阳. 二灰土强度形成影响因素的试验与应用研究[D]. 南京:南京林业大学,2007.

[4] 中华人民共和国交通运输部. JTG E51-2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2009.

[5] 单双成,陈满. 废弃水泥混凝土道面在路面半刚性基层中再生利用的试验研究[J]. 公路工程,2013,38(3):192-195+218.

[6] 中华人民共和国交通部. JTG E42-2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2005.

[7] 李娟. 再生骨料附着砂浆对混凝土强度的影响及再生骨料二灰碎石试验研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[8] 中华人民共和国交通部. JTJ034-2000 公路路面基层施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000.

[9] 孙跃东,肖祥,庞俭,等. 再生骨料混凝土的配合比试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2009,28(1):25-29.

[10] 姚昆. 二灰碎石半刚性基层再生做刚性基层的研究[D]. 济南:山东大学,2009.

[11] 李雯霞,张雄,刘昕. 再生混凝土中再生骨料取代率、浆含量、表观密度和吸水率的关系探讨[J]. 混凝土,2009(10):60-63.