

废玻璃粉对水泥基材料流动性能的影响

熊志文, 柯国军, 陶望, 邹品玉

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要:为探究废玻璃粉对水泥胶砂和混凝土2种水泥基材料流动性能的影响,测试在不同废玻璃粉粒径和质量分数条件下水泥胶砂的流动度和屈服应力,研究在不同水胶比条件下废玻璃粉的质量分数对混凝土坍落度的影响。结果表明:随着废玻璃粉粒径和质量分数的增大,水泥胶砂流动度和流动速率皆呈现减小的趋势,而屈服应力逐渐增大;废玻璃粉质量分数为10%时,粒径范围为38~53 μm 对水泥胶砂流动度的增强效果最好;碎石、卵石混凝土坍落度随着废玻璃粉质量分数的增大而减小,随着水胶比的增大而增大,碎石混凝土的坍落度总体要好于卵石混凝土的;废玻璃粉质量分数为10%、水胶比范围为0.40~0.50时,2种混凝土坍落度达到较优状态。

关键词:废玻璃粉;水泥胶砂;混凝土;流动度;屈服应力;坍落度

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Influence of waste glass powder on fluidity of cement-based materials

XIONG Zhiwen, KE Guojun, TAO Wang, ZOU Pinyu

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to explore the influence of waste glass powder on the flow properties of two cement-based materials named as cement mortar and concrete, the fluidity and yield stress of cement mortar under different waste glass powder particle sizes and dosage conditions were tested. The influence of mass concentration of waste glass powder on the slump of concrete under the condition of water-binder ratio was studied. The results show that as the particle size and dosage of waste glass powder increase, the fluidity and flow rate of cement mortar show a decreasing trend, while the yield stress gradually increases. When mass concentration of waste glass powder is 10%, the particle size diameter range of 38–53 μm has the best effect on enhancing the fluidity of cement mortar. The slump of crushed stone and pebble concrete not only decreases with the increase of powder mass concentration of waste glass but also increases with the increase of the water-binder ratio. Besides, the slump of the gravel concrete is better than that of the gravel concrete. When powder mass concentration of waste glass is 10% and the water-binder ratio ranges 0.40–0.50, the slump of the two types of concrete reaches a better state.

Keywords: waste glass powder; cement mortar; concrete; fluidity; yield stress; slump

废玻璃粉(渣)呈无规则鳞片状,表面光滑,吸水率为零^[1]。将磨成一定细度的废玻璃粉替代粗、细骨料制备水泥基材料,对水泥基材料的诸多性能具有显著的影响^[2-5]。

流动性是水泥基材料的重要性能指标,影响其施工性能和硬化性能。为了促进废玻璃粉在水泥基材料中的应用,废玻璃粉对混凝土以及水泥砂浆流动性的影响受到了广泛关注。Wang等^[6]发现混凝土坍落度随废玻璃粉的掺量(即质量分数)增大而降低。Metwally^[7]将研磨到一定细度的废玻璃粉替代部分水泥拌制混凝土,发现随着废玻璃粉掺量的增加混凝土的和易性明显降低。Topcu等^[8]认为使用废玻璃渣作为粗骨料对混凝土的和易性没有明显的影响。Limbachiya^[9]等用废玻璃渣代替天然砂拌制混凝土的掺量超过20%时,混凝土的和易性和稳定性降低。郝文秀^[10]认为废玻璃粉掺量为20%时,废玻

收稿日期:2020-06-19,修回日期:2020-09-23。

基金项目:湖南省自然科学基金项目,编号:2019JJ60003。

第一作者简介:熊志文(1995—),男,硕士研究生,研究方向为高性能混凝土及固体废渣利用。E-mail:1716336530@qq.com。

通信作者简介:柯国军(1964—),男,硕士,教授,硕士生导师,研究方向为高性能混凝土及固体废渣利用。E-mail:kegj320@sina.com。

璃混凝土与普通混凝土具有相似的性能。Soliman 等^[11]发现掺入适量的废玻璃粉可以有效改善混凝土的流动性和耐久性,同时可以减少水泥的水化热,有利于混凝土的施工。

本文中将磨成一定细度的废玻璃粉作为辅助胶凝材料替代部分水泥,研究废玻璃粉的粒径和掺量对水泥胶砂的流动性的影响,以及水胶比和掺量对混凝土坍落度的影响,为废玻璃粉广泛应用于水泥基材料提供参考数据。

1 实验

1.1 原材料

水泥:P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,水泥的化学组分如表 1 所示。

表 1 水泥的化学组分

Tab. 1 Chemical composition of cement

组分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO
质量分数/%	64.43	21.14	5.78	3.59	2.35	1.52

骨料:水泥胶砂实验用砂为标准砂,表观密度为 2 670 kg/m³。混凝土坍落度实验用砂为河砂,表观密度为 2 580 kg/m³。卵石最大粒径为 40 mm,表观密度为 2 650 kg/m³。碎石最大粒径为 30 mm,表观密度为 2 710 kg/m³。

废玻璃粉:将废玻璃瓶放入 SM-500 型碾磨机进行碾磨。采用筛分实验将废玻璃粉筛分为 0~38、>38~53、>53~75、>75~150、>150~300 μm 这 5 种粒径范围,实验前将其烘干,在干燥条件下保存。粗骨料粒度分布曲线如图 1 所示。图 2 为废玻璃粉的 SEM 图像,可以看出,废玻璃粉颗粒呈现不规则状,表面比较光滑。表 2 为用 X 射线荧光法(XRF)测定的废玻璃粉的化学组分。

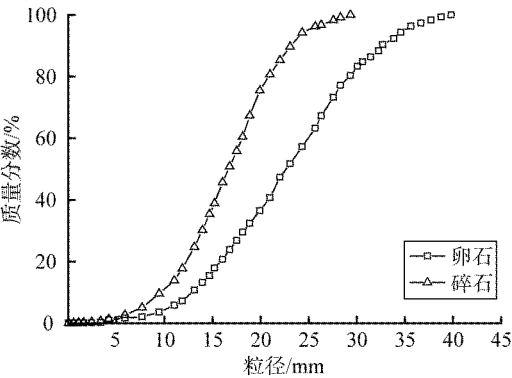


图 1 粗骨料粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of coarse aggregate

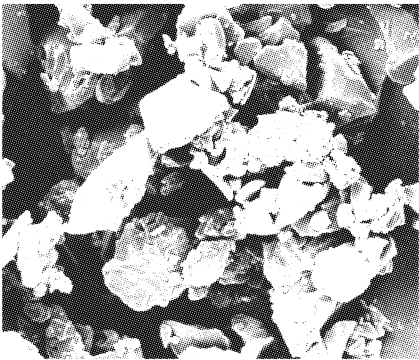


图 2 废玻璃粉的 SEM 图像

Fig. 2 SEM image of waste glass powder

表 2 废玻璃粉的化学组分

Tab. 2 Chemical composition of waste glass powder

组分	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃
质量分数/%	10.14	65.35	6.78	3.59	5.42	1.51	1.48	1.62	0.05

1.2 样品

1.2.1 水泥胶砂样品制备

为研究废玻璃粉不同粒径和掺量对水泥胶砂拌合物流动性能的影响,根据 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》中的有关规定,称取水泥 450 g、水 225 g、标准砂 1 350 g。

分别用 0~38、>38~53、>53~75、>75~150、>150~300 μm 5 种不同粒径范围的废玻璃粉按质量分数取代率取代水泥,即废玻璃粉的掺量分别取为 0、10%、15%、20% 时拌制水泥胶砂,每种废玻璃粉

粒径条件下水泥胶砂组分如表3所示。

表3 水泥胶砂组分

Tab.3 Component of cement mortar

组分	废玻璃粉掺量			
	0	10%	15%	20%
水	225	225	225	225
砂	1 350	1 350	1 350	1 350
废玻璃粉	0	45	68	90
水泥	450	405	382	360

1.2.2 混凝土样品制备

混凝土的设计坍落度为55~70 mm,根据JGJ 55—2000《普通混凝土配合比设计规程》确定混凝土的用水量。

混凝土拌合物中碎石的最大粒径为30 mm,卵石的最大粒径为40 mm,砂率为33%,选取水胶比分别为0.40、0.45、0.50、0.55、0.60。选用水泥胶砂实验中所确定的废玻璃粉最佳粒径范围(即38~53 μm),废玻璃粉掺量分别设为0、10%、15%、20%^[12]。废玻璃粉最佳粒径条件下的2种类型混凝土组分如表4所示。

表4 2种类型混凝土组分

Tab.4 Component of two types of concrete

水胶比	组分	废玻璃粉掺量							
		碎石混凝土				卵石混凝土			
		0	10%	15%	20%	0	10%	15%	20%
0.40	水	195	195	195	195	170	170	170	170
	石	1 150	1 150	1 150	1 150	1 193	1 193	1 193	1 193
	砂	567	567	567	567	596	596	596	596
	废玻璃粉	0	49	74	98	0	43	64	85
	水泥	488	439	414	390	425	382	361	340
0.45	石	1 187	1 187	1 187	1 187	1 224	1 224	1 224	1 224
	砂	585	585	585	585	603	603	603	603
	废玻璃粉	0	44	65	87	0	38	57	76
	水泥	433	389	368	346	378	340	321	302
0.50	石	1 216	1 216	1 216	1 216	1 266	1 216	1 216	1 216
	砂	599	599	599	599	624	624	624	624
	废玻璃粉	0	39	59	78	0	34	51	68
	水泥	390	351	331	312	340	306	289	272
0.55	石	1 239	1 239	1 239	1 239	1 287	1 287	1 287	1 287
	砂	611	611	611	611	634	634	634	634
	废玻璃粉	0	36	54	71	0	31	47	62
	水泥	355	319	301	284	309	278	262	247
0.60	石	1 259	1 259	1 259	1 259	1 304	1 304	1 304	1 304
	砂	621	621	621	621	642	642	642	642
	废玻璃粉	0	33	49	65	0	29	43	57
	水泥	325	292	276	260	284	255	241	227

1.3 方法

1.3.1 水泥胶砂流动度测试

根据 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》测量水泥胶砂的扩散直径。用卡尺在胶砂底面相互垂直的方向各测量 1 次,计算平均值并取整得到胶砂流动度^[13]。流速测试参考 Okamura 等^[14]和 Fung 等^[15]所采用的方法及仪器,测试时打开装满水泥胶砂的漏斗底盖,记录水泥胶砂自由流出所需的时间,并以水泥胶砂拌合物体积除以流出时间计算流动度率。

1.3.2 水泥胶砂屈服应力测试

采用 RST-SST 软固体测试流变仪进行剪切测试^[16]。实验由 2 个剪切周期组成,第 1 个周期对水泥胶砂样品进行预剪切。第 2 个周期对试样进行实际测量并记录数据。在 75 s 内流变仪转速从 0 增加到 50 r/min,然后在 75 s 内流变仪转速下降到 0^[17]。

表 5 为水泥胶砂流动性测试和屈服应力测试的数据结果。

1.3.3 混凝土坍落度测试

根据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》进行试验。混凝土试样从搅拌机出来后分 3 层均匀地装满整个坍落度筒,然后垂直平稳地提起坍落度筒,当混凝土试样不再继续坍落时测量出筒高与坍落后混凝土的最高点之间的高度差即为混凝土坍落度值^[18-19]。

表 5 水泥胶砂的流动性和屈服应力
Tab.5 Fluidity and yield stress of cement mortar

废玻璃粉		水泥胶砂		
掺量/%	粒径范围/ μm	流动度/mm	流动速率/ $(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	屈服应力/Pa
0	0 ~ 38	235	329	5.5
	> 38 ~ 53	235	329	5.5
	> 53 ~ 75	235	329	5.5
	> 75 ~ 150	235	329	5.5
	> 150 ~ 300	235	329	5.5
10	0 ~ 38	237	318	6.4
	> 38 ~ 53	239	261	6.9
	> 53 ~ 75	231	216	7.5
	> 75 ~ 150	222	157	7.9
	> 150 ~ 300	219	88	8.1
15	0 ~ 38	228	298	7.5
	> 38 ~ 53	232	258	7.7
	> 53 ~ 75	223	195	8.1
	> 75 ~ 150	216	148	8.3
	> 150 ~ 300	199	94	8.6
20	0 ~ 38	227	290	8.0
	> 38 ~ 53	230	230	8.3
	> 53 ~ 75	219	181	8.6
	> 75 ~ 150	183	139	91
	> 50 ~ 300	185	82	9.3

2 结果与讨论

2.1 废玻璃粉对水泥胶砂流动性的影响

2.1.1 对流动度的影响

为了研究废玻璃粉对水泥胶砂流动度的影响,根据表5拟合出回归曲线,得到相应的回归方程和相关系数,表6为废玻璃粉掺量与水泥胶砂流动度的拟合方程。

通过表6可以看出,随着废玻璃粉的掺量的增大,相关系数的平方 R^2 值不断增大,最大值为0.927,表明水泥胶砂流动度受到废玻璃粉掺量的很大程度的影响。

表6 废玻璃粉掺量与水泥胶砂流动度的拟合方程

Tab.6 Fitting equation of waste glass powder dosage and fluidity of cement mortar

废玻璃粉掺量/%	拟合方程	R^2
10	$y_{10} = 217.45 + 34e^{-0.012x}$	0.885
15	$y_{15} = 232.95 - 0.113x$	0.927
20	$y_{20} = 316.68x^{-0.087}$	0.897

根据表5和表6绘制出不同掺量条件下废玻璃粉粒径与水泥胶砂流动度的关系曲线,如图3所示。

由图3可看出,废玻璃粉掺量为10%、粒径范围小于53 μm 时,废玻璃粉对水泥胶砂的流动度具有增大作用;不同废玻璃粉掺量的水泥胶砂流动度值随着废玻璃粉粒径范围的增大皆呈现减小趋势;3种废玻璃粉掺量下的流动度值一开始减小的趋势较为明显,但粒径大于150 μm 后,掺量为10%和20%的水泥胶砂流动度值减小的趋势变缓,而掺量为15%的水泥胶砂流动度仍保持同样的下降趋势。

为研究废玻璃粉粒径对水泥胶砂流动度的影响,根据表5拟合得到回归曲线方程: $y = 235 - be^{cx}$,表7为推导出的废玻璃粉粒径与水泥胶砂流动度的拟合方程。

表7 废玻璃粉粒径与水泥胶砂流动度的拟合方程

Tab.7 Fitting equation between particle size of waste glass powder and fluidity of cement mortar

废玻璃粉粒径范围/ μm	方程参数		R^2
	b	c	
0 ~ 38	0.001	0.439	0.441
> 38 ~ 53	0.034	0.251	0.528
> 53 ~ 75	0.407	0.185	0.762
> 75 ~ 150	0.057	0.341	0.850
> 150 ~ 300	4.760	0.122	0.901

由表7可以看出,随着废玻璃粉粒径的增大, R^2 值不断增大,最大值为0.901,表明较大粒径的废玻

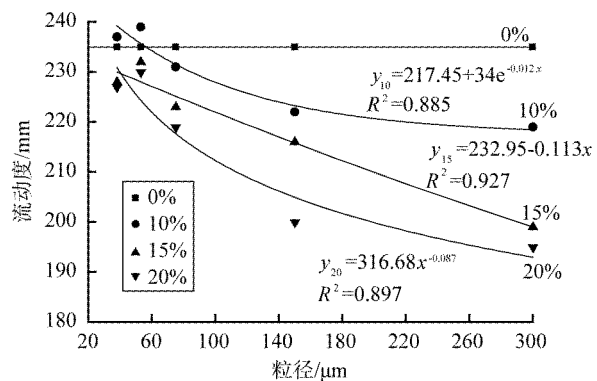


图3 不同掺量条件下废玻璃粉粒径与水泥胶砂流动度的关系曲线

Fig.3 Relationship curve between particle size of waste glass powder and fluidity of cement mortar under different dosage conditions

璃粉掺入水泥胶砂后严重的影响到了流动度的变化。

根据表 5 和表 7 绘制出不同粒径范围条件下废玻璃粉掺量与水泥胶砂流动度的关系曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着废玻璃粉掺量的增大,水泥胶砂流动度值减小;废玻璃粉粒径在 0 ~ 75 μm 范围内时下降速度较为平缓,在 > 75 ~ 300 μm 范围内时流动度值下降速度最快;废玻璃粉掺量为 10% 时,粒径范围为 0 ~ 38、> 38 ~ 53 μm 时,废玻璃粉的添加增大了水泥胶砂流动度,粒径范围为 > 38 ~ 53 μm 时水泥胶砂流动性的增强效果更好。

2.1.2 对流动速率的影响

为了研究废玻璃粉对水泥胶砂流动速率度的影响,根据表 5 拟合废玻璃粉与水泥胶砂流动速率的关系曲线,得到相应的回归方程: $y = ax^b$ 。表 8 为推导出的废玻璃粉与水泥胶砂流动速率的拟合方程。

表 8 废玻璃粉与水泥胶砂流动速率的拟合方程			
Tab. 8 Fitting equation of flow rate of waste glass powder and cement mortar			
废玻璃粉掺量/%	方程参数		R^2
	a	b	
10	2 521.2	-0.569	0.990
15	2 210.5	-0.549	0.987
20	2 403.5	-0.587	0.985

从表 8 可以看出,水泥胶砂流动速率与废玻璃粉掺量之间具有很强的相关性, R^2 最大值为 0.990,说明废玻璃粉的掺入对水泥胶砂的流动速率同样具有非常大的影响。

根据表 5 和表 8 绘制出废玻璃粉粒径与水泥胶砂流动速率的关系曲线,如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,随着废玻璃粉粒径的增大以及掺量的增加,水泥胶砂流动速率不断减小。当废玻璃粉掺量为 10% 时,相关系数达到最大值为 0.990。随着废玻璃粉掺量的不断增大,相关性在不断减小。这一变化表明对水泥胶砂流动性产生增强效果的废玻璃粉最佳掺量为 10%。

2.1.3 对屈服应力的影响

水泥胶砂的流动是在克服其自重、浆体内骨料之间的摩擦力以及胶凝材料之间的黏聚力下进行的,因此骨料颗粒的大小、形状以及所占比例均影响水泥胶砂的屈服应力。根据表 5 数据绘制出废玻璃粉粒径与水泥胶砂屈服应力的关系曲线,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,相比于未掺入废玻璃粉的对照实验组,掺入废玻璃粉提高了水泥胶砂屈服应力;

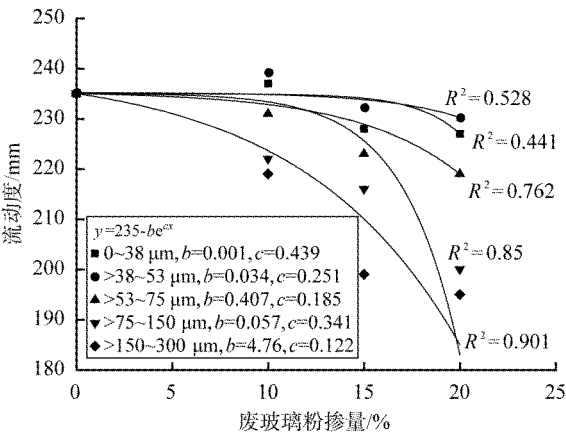


图 4 不同粒径范围条件下废玻璃粉掺量与水泥胶砂流动度的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between dosage of waste glass powder and fluidity of cement mortar under different particle size ranges

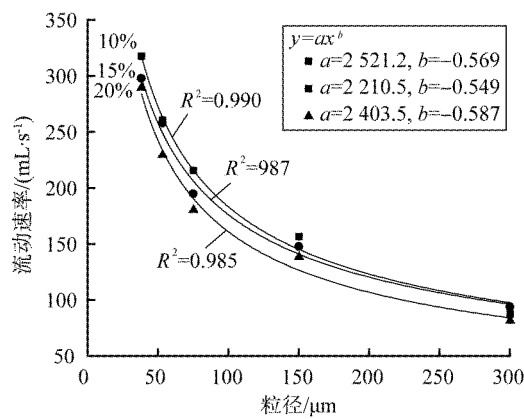


图 5 废玻璃粉粒径与水泥胶砂流动速率的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between particle size of waste glass powder and flow rate of cement mortar

废玻璃粉的掺量越大,水泥胶砂屈服应力的提高越显著;同一掺量条件下,水泥胶砂的屈服应力随着废玻璃粉粒径的增大而增大,废玻璃粉影响屈服应力的临界粒径值为 $150\ \mu\text{m}$,大于此粒径后屈服应力增大不再明显。

图7为采用回归分析得到的水泥胶砂流动度与屈服应力的拟合关系曲线。由图7中可知,相关系数 R^2 为 0.847;水泥胶砂屈服应力与流动度呈现较强的负相关性。

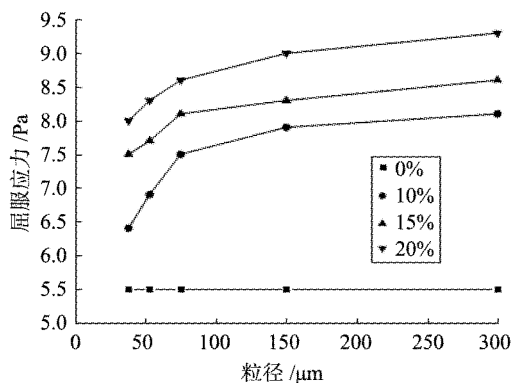


图6 废玻璃粉粒径与水泥胶砂屈服应力的关系曲线

Fig.6 Relationship curve between particle size of waste glass powder and yield stress of cement mortar

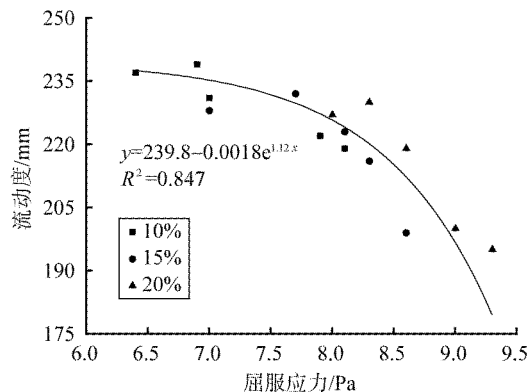


图7 水泥胶砂屈服应力与水泥胶砂流动度的关系曲线

Fig.7 Relationship curve between yield stress and fluidity of cement mortar

2.1.4 小结与机理分析

综上,随着废玻璃粉粒径和掺量的增大,水泥胶砂流动度和流动速率皆呈现减小的趋势,而屈服应力逐渐增大;废玻璃粉掺量为 10% 时,粒径范围为 $>38 \sim 53\ \mu\text{m}$ 对水泥胶砂流动度的增强效果最好。

废玻璃粉的掺入使得水泥浆体中固体颗粒的比表面积显著增加,从而降低了固体颗粒的水膜厚度^[15],浆体内部阻力增大,使拌合物的流动度减小;当废玻璃粉的掺量较少时,水泥浆体中的水几乎全部与水泥、砂结合形成连续的水膜。当水泥浆体流动时,浆体内部水膜之间互相起着润滑剂的作用,宏观上体现为流动度和流动速率都较大。随着废玻璃粉掺量的不断增多,在拌制浆体时废玻璃粉均匀分布在水泥和砂之间,微观上表现为水泥浆体内部的水膜被分割得支离破碎,互相之间无法起到润滑的作用,反而受到废玻璃粉的阻碍作用,因此流动速率和流动度都减小了。

由于废玻璃粉具有憎水性,因此与亲水性的砂之间会产生排斥的位能^[20],水泥胶砂浆体中集料相互挤压,连锁作用使得浆体内部摩擦阻力进一步增大,进而使得水泥胶砂的屈服应力持续增大。随着粒径的不断增大,废玻璃粉逐渐取代砂子在屈服应力产生中的作用^[21]。当废玻璃粉粒径大于 $150\ \mu\text{m}$ 时,接近完全取代砂子的作用,使得浆体内部趋于稳定状态,因此屈服应力逐渐不再产生变化。

2.2 废玻璃粉对混凝土坍落度的影响

在设定废玻璃粉粒径范围为 $>38 \sim 53\ \mu\text{m}$ 的前提条件下,表9所列数据反映了废玻璃粉掺量和水胶比对2种混凝土坍落度影响。

2.2.1 废玻璃粉掺量的影响

根据表9拟合出回归曲线,得到回归方程 $y = a + be^{cx}$,表10为推导出的废玻璃粉掺量与混凝土坍落度的拟合方程。

由表10可知,在废玻璃粉掺入量为 10% 时,碎石和卵石混凝土的相关系数 R^2 值分别达到最大值 0.987 和 0.885,说明废玻璃粉掺量最佳值为 10%。

2.2.2 水胶比的影响

根据表9分别绘制出水胶比与碎石和卵石混凝土坍落度的关系曲线,如图8所示。

从图8可以看出,对于不同废玻璃粉掺量,2种混凝土坍落度均随着水胶比的增大而不断增大。其中,废玻璃粉掺量为 0 和 10% 时坍落度提高效果要好,一直保持持续稳定的上升趋势。水胶比在

0.40 ~0.50 范围内时,10% 的废玻璃粉掺量对碎石混凝土坍落度提高效果要优于其余各组掺量。

表 9 废玻璃粉掺量和水胶比对混凝土坍落度的影响

Tab.9 Influence of waste glass powder content and water-binder ratio on concrete slump							
废玻璃粉掺量/%	水胶比	坍落度/mm		废玻璃粉掺量/%	水胶比	坍落度/mm	
		碎石混凝土	卵石混凝土			碎石混凝土	卵石混凝土
0	0.40	47	17	15	0.40	22	25
	0.45	51	39		0.45	40	37
	0.50	43	67		0.50	35	41
	0.55	101	41		0.55	41	20
	0.60	120	62		0.60	50	79
10	0.40	51	21	20	0.40	23	13
	0.45	56	50		0.45	36	31
	0.50	61	51		0.50	47	63
	0.55	70	47		0.55	41	33
	0.60	117	115		0.60	57	57

表 10 废玻璃粉掺量与混凝土坍落度的拟合方程

Tab.10 Fitting equation of waste glass powder dosage and concrete slump					
组别	废玻璃粉掺量/%	方程参数			R ²
		a	b	c	
碎石混凝土	0	32.40	0.11	11.26	0.731
	10	53.10	2.26 × 10 ⁻⁵	25.00	0.987
	15	57.45	-802.9	-7.81	0.875
	20	63.83	-557.9	-6.58	0.852
卵石混凝土	0	57.15	-3.74 × 10 ⁵	-22.80	0.708
	10	38.72	2.08 × 10 ⁻⁸	36.70	0.885
	15	24.75	0.25	26.90	0.608
	20	51.72	1.36 × 10 ⁵	-20.30	0.623

2.2.4 小结

尽管受到水胶比的影响,但废玻璃粉掺量仍是影响混凝土坍落度的重要参数。碎石、卵石混凝土坍落度随着废玻璃粉掺量的增大而减小,随着水胶比的增大而增大。碎石混凝土的坍落度总体要好于卵石混凝土的。废玻璃粉掺量为 10%、水胶比范围为 0.40 ~0.50 时,2 种混凝土坍落度达到较优状态。

2.2.3 混凝土种类的影响

在水胶比分别取值为 0.40、0.45、0.50 时,废玻璃粉掺量与混凝土坍落度的关系曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出,碎石混凝土的坍落度总体要好于卵石混凝土的;由图 9 c)可见,水胶比为 0.45、废玻璃粉掺量为 10% 时,卵石混凝土坍落度为50 mm,但仍低于碎石混凝土坍落度 56 mm。

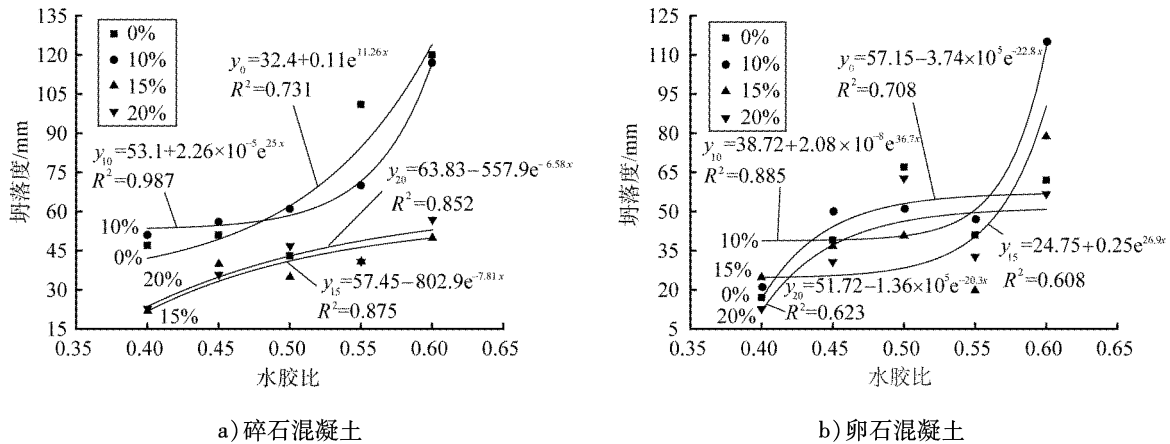


图8 水胶比与混凝土坍落度的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between water-binder ratio and concrete slump

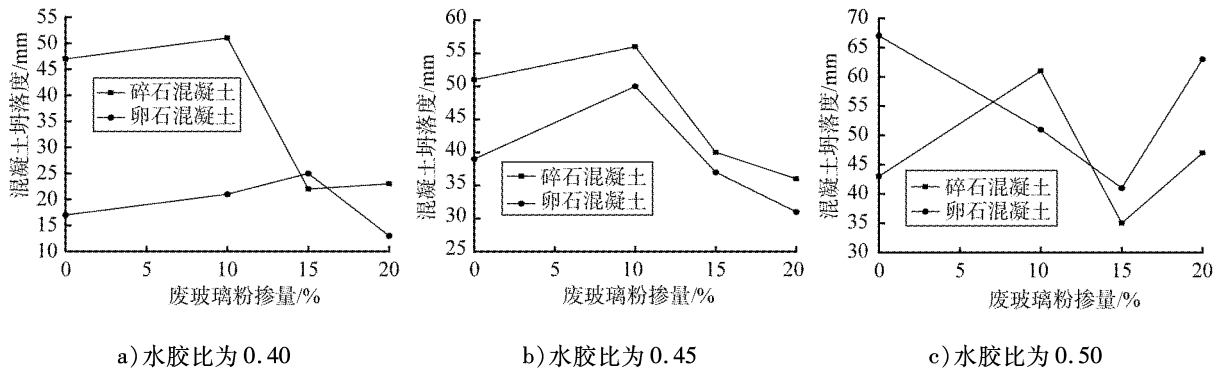


图9 不同水胶比条件下废玻璃粉掺量与混凝土坍落度的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between waste glass powder dosage and concrete slump under different water-binder ratio conditions

3 结论

- 1) 随着废玻璃粉粒径和掺量的增大,水泥胶砂流动度和流动速率皆呈现减小的趋势,而屈服应力逐渐增大。
- 2) 废玻璃粉掺量为 10% 时,粒径范围为 $>38 \sim 53 \mu\text{m}$ 对水泥胶砂流动度的增强效果最好。
- 3) 碎石、卵石混凝土坍落度随着废玻璃粉掺量的增大而减小,随着水胶比的增大而增大。碎石混凝土的坍落度总体要好于卵石混凝土的。
- 4) 废玻璃粉掺量为 10%、水胶比范围为 0.40 ~ 0.50 时,2 种混凝土坍落度达到较优状态。

参考文献 (References):

- [1] 王彦超,柯国军. 不同粒径废玻璃粉对胶砂流动性与强度的影响[J]. 混凝土, 2015(5): 93-95, 99.
- [2] 陈宣东,黄达,刘光焰,等. 废弃玻璃在混凝土中应用进展[J]. 混凝土, 2019(10): 135-139.
- [3] 杨震,李雪,高海杰,等. 废玻璃粉再生细骨料混凝土的性能研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(5): 85-86.
- [4] 刘光焰,秦荣,王晓峰. 废玻璃粗骨料混凝土的施工性能和强度试验研究[J]. 混凝土, 2011(3): 121-124.
- [5] 黄达,陈宣东,刘光焰,等. 废弃玻璃混凝土 ASR 危害的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1792-1800.
- [6] WANG H Y, CHEN T T, HSIEH C S. A study on engineering properties of self-compacting concrete containing waste LCD glass[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1672: 2009-2013.

- [7] METWALLY I M. Investigations on the performance of concrete made with blended finely milled waste glass[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2007, 10(1): 47–53.
- [8] TOPCU I B, CANBAZ M. Properties of concrete containing waste glass[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 34(2): 267–274.
- [9] LIMBACHIYA M C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 23(2): 1078–1083.
- [10] 赫文秀. 废玻璃细骨料混凝土试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(5): 1647–1651.
- [11] SOLIMAN N A, TAGNIT-HAMOU A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder towards ecofriendly concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 125: 600–612.
- [12] 李卓才, 柯国军, 宋百姓, 等. 废玻璃粉的火山灰活性[J]. *中国粉体技术*, 2014, 20(4): 74–79.
- [13] 王振, 李化建, 黄法礼, 等. 不同岩性石粉-水泥胶砂流动性和力学性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(5): 1585–1590.
- [14] OKAMURA H, OUCHI M. Self-compacting concrete[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(1): 5–15.
- [15] FUNG W W S, KWAN A K H. Role of water film thickness in rheology of CSF mortar[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(4): 255–264.
- [16] 司雯, 曹明莉, 冯嘉琪. 纤维增强水泥基复合材料的流动性与流变性研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(5): 819–825.
- [17] 许玲. 新型混杂纤维增强水泥基材料(HyFRCC)的流变性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [18] 张海涛. 盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [19] 李继全, 崔焕勇, 李长春, 等. 混凝土塌落度自动检测技术的研究与应用[J]. *现代制造技术与装备*, 2017(9): 163–165.
- [20] 曹明莉, 许玲, 李志文. 聚乙烯醇纤维及钢纤维增强水泥砂浆流变性和流动性能[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(1): 112–117.
- [21] 曹明莉, 许玲, 张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 246–252.