

• 化学工程与材料工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201801394

废玻璃粉混凝土力学性能研究

李 松¹, 焦楚杰^{1*}, 甘元初²

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:为实现城市固体垃圾废玻璃资源化, 以不同掺量废玻璃粉取代水泥, 按标准试验方法研究了 C30 与 C50 两种强度等级的废玻璃粉混凝土 (waste glass powder concrete, WGPC) 各类强度变形指标。试验发现: C30WGPC 在废玻璃粉掺量在 25%~30% 之间时, 抗压强度同比降低幅度最大, 达到了 21.7%, C30WGPC 替代水泥掺量可在 0~25% 以内, C50WGPC 最佳掺量可大于 25%; 废玻璃粉的掺入改善了混凝土的脆性性能, 随着试配强度等级的提高脆性会有所增大, C50WGPC 轴压强度与抗压强度关系式可以近似地进行普通混凝土两者关系的换算; 另外, WGPC 弹性模量公式适用于计算普通混凝土的弹性模量, WGPC 泊松比与普通混凝土泊松比相差不大。试验结果表明废玻璃粉可较大掺量试配强度等级较高的混凝土, 并为 WGPC 的工程应用提供基础参数。

关键词:废玻璃粉混凝土; 抗压强度; 劈拉强度; 弹性模量; 泊松比

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2019)05-0199-07

Study on Mechanical Properties of Waste Glass Powder Concrete

LI Song¹, JIAO Chujie^{1*}, GAN Yuanchu²

(1. School of Civil Eng., Guangzhou Univ., Guangzhou 510006, China; 2. School of Civil Eng., Univ. of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to realize the recycling of municipal solid waste glass, the various strengths and deformation indexes of C30 and C50 strength grades waste glass powder concrete (WGPC) were studied according to the standard test method by replacing cement with waste glass powder in different dosages. It showed that when the amount of waste glass powder was between 25%~30%, the decrease in compressive strength of C30WGPC was the largest, reaching 21.7%. The replacement of cement by C30 WGPC could be within 0~25% and the optimal blending amount of C50 WGPC could be greater than 25%. The waste glass powder incorporation improved the concrete brittleness and the concrete brittleness would increase with the strength grade increasing. The relationship between axial compression strength and cubic compressive strength of C50WGPC could be used to approximately calculate by the conversion of ordinary concrete. In addition, the WGPC elastic modulus formula was suitable for calculating the ordinary concrete elastic modulus and the Poisson ratio of WGPC was not much different from the ordinary concrete. The test results show that the waste glass powder can be used to test the concrete with higher strength grade and provide the basic parameters for the WGPC engineering application.

Key words: WGPC; compressive strength; splitting tensile strength; elastic modulus; Poisson ratio

改革开放40年以来, 中国在建筑行业取得了巨大的成就, 而水泥是建筑行业的重要建材之一, 根据发改委建材行业信息, 仅2018年上半年全国水泥产量就有 9.9708×10^8 t。水泥的生产需要消耗大量的黏土和石灰石, 并在生产过程中排放大量的工业废气和废料, 既对环境造成污染, 又对经济造成重大损失。

废玻璃在城市固体垃圾中随处可见, 其主要是建筑物与汽车的门窗、玻璃容器等。根据联合国调查统计, 废弃玻璃的量占固体废垃圾总量的7%^[1], 但仅少部分被回收利用而大部分都被填埋。欧盟国家的玻璃回收率较高平均为73%, 远远高于美国的34% (欧盟玻璃包装研究所统计, 2016)、新加坡的20%

收稿日期: 2018-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778158; 51478128; 51278135); 广东省水利科技创新重点项目 (2017-32); 住房与城乡建设部科研开发项目 (2010-K3-27; 2010-K4-18); 广州大学研究生创新能力培养资助计划 (2018GDJC-D08)

作者简介: 李 松 (1989—), 男, 博士生, 工程师。研究方向: 高强与高性能混凝土。E-mail: 1111716006@e.gzhu.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: jiaochujie@sina.com

网络出版时间: 2019-08-19 17:07:57

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190819.0917.008.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

(新加坡国家环境局统计, 2017)^[2]。中国城市固体垃圾中3%~5%为废玻璃^[3], 其回收利用率仅占再生资源的3.4%^[4]。

将废玻璃磨成粉末替代水泥形成废玻璃粉混凝土(WGPC)是处理废玻璃的重要手段之一, 具有火山灰活性、吸水率低、耐久性好、流动性佳等诸多优势。在经济方面, 玻璃粉取代水泥每10⁴ t可以节省电力1.93×10⁴ kW·h和少用标准煤800 t, 每年少向空气排放CO₂ 1.11×10⁴ t、SO₂ 7.8 t、NO_x 15.1 t^[5]。目前对于废玻璃粉替代水泥的研究大致分为3块: 1) 研究废玻璃粉活性机理从微观方面解释替代水泥的可行性^[6-9]; 2) 针对砂浆试块与立方体试块, 以抗压强度为力学指标研究最优配合比与最佳取代率等问题^[10-12]; 3) 研究WGPC构件的抗弯、抗剪与抗冲击等性能^[13-16]。其中, 对C30较低强度等级的砂浆与混凝土研究较多, 并得出了系列研究成果。但对于C50较高强度等级混凝土的研究较少, 对于WGPC力学性能系统的研究也较匮乏。

以6种废玻璃粉掺量为变化参数, 对比研究了C30与C50两类强度等级的WGPC的力学性能与变形性能, 包括抗压强度、劈拉强度、轴压强度、弹性模量与泊松比, 并探讨了各指标在掺量变化下的影响作用机理及相关换算关系和普通混凝土的差异, 为WGPC进一步的研究运用提供了基础数据。

1 试验原材料及配合比

1.1 试验原材料

试验水泥采用湖南雁城韶峰水泥有限公司产的

P.O42.5普通硅酸盐水泥。砂子采用湘江河砂, 细度模数为2.81, 表观密度为2 630 kg/m³, 石子为湘江卵石, 表观密度2 650 kg/m³, 最大粒径为20 mm。废玻璃粉是从废品站回收的无色透明平板玻璃, 经洗净、干燥碾磨所得, 主要化学成分见图1, 废玻璃粉中所含SiO₂与Al₂O₃具备“火山灰效应”, 会加剧混凝土的碱骨料反应^[17], 但对于粒径达到150 μm以下的废玻璃粉, 其碱骨料反应几乎不存在^[18], 试验选用的废玻璃粉均筛分至38~150 μm的粒径。

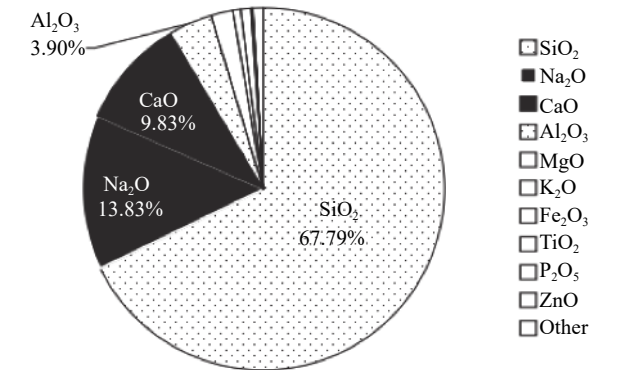


图 1 玻璃粉化学成分

Fig. 1 Chemical composition of glass powder

1.2 试验用配合比

研究设计6种废玻璃粉取代率(0、10%、15%、20%、25%、30%), 试配强度等级以C30与C50为研究对象, 对于每种强度等级配合比, 严格保持水胶比, 砂子、粗骨料的总量不变, 用于各种力学试验的试件均采用多次水泥包裹法搅拌成型, 试验配合比如表1所示。

表 1 WGPC配合比

Tab. 1 Proportion of WGPC

混凝土等级	试验组编号	废玻璃粉掺量/%	废玻璃粉/kg	水泥/kg	砂子/kg	石子/kg	水/kg
C30	S00	0	0	31.23	64.33	118.64	16.49
	S10	10	3.12	28.11	64.33	118.64	16.49
	S15	15	4.68	26.55	64.33	118.64	16.49
	S20	20	6.25	24.98	64.33	118.64	16.49
	S25	25	7.81	23.42	64.33	118.64	16.49
	S30	30	9.37	21.86	64.33	118.64	16.49
C50	SS00	0	0	48.58	50.80	117.53	16.63
	SS10	10	4.86	43.72	50.80	117.53	16.63
	SS15	15	7.29	41.29	50.80	117.53	16.63
	SS20	20	9.72	38.86	50.80	117.53	16.63
	SS25	25	12.15	36.43	50.80	117.53	16.63
	SS30	30	14.57	34.01	50.80	117.53	16.63

注: S10中的S代表混凝土强度等级为C30, 00代表废玻璃粉掺量为0; SS10中的SS代表混凝土强度等级为C50, 10代表废玻璃粉掺量为10%, 其他试件编号以此类推。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度

2.1.1 废玻璃粉掺量对抗压强度的影响变化

抗压强度试验采用150 mm×150 mm×150 mm立方体试块,共进行12组,每组3块,按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)执行,试验结果见表2。分析表2中抗压强度可知,C30WG-

PC随废玻璃粉掺量的增加,相邻掺量的抗压强度同比减少4.1%、6.5%、6.7%、4.6%、21.7%,C50WGPC相邻掺量抗压强度同比减少3.1%、7.0%、6.4%、8.2%、3.5%,当掺量在25%~30%范围内时,C30WGPC抗压强度降低程度最大,达到了21.7%。图2为抗压强度随废玻璃粉掺量*k*的变化曲线。由图2可知,抗压强度*f_{cu}*随废玻璃粉掺量*k*单调减小,当*k*大于25%时,C30WGPC抗压强度下降的幅度明显大于C50WGPC。

表 2 WGPC *f_{cu}/f_{cu,00}* 的计算值与实测值

Tab. 2 Calculated values and measured values of *f_{cu}/f_{cu,00}* of WGPC

编号	<i>f_{cu}</i> /MPa	<i>f_{cu}·f_{cu,00}⁻¹</i>	<i>f_{cu}'·f_{cu,00}⁻¹</i>	<i>f_{cu}'</i> /MPa	<i>F_c</i>	<i>f_{pl}</i> /MPa	<i>f_{pl}'·f_{cu}⁻¹</i>	<i>f_c</i> /MPa	<i>f_c·f_{cu}⁻¹</i>	<i>v</i>	<i>E_c</i> /MPa
S00	32.00	1.00	1.00	32.00	1.00	3.03	1/10.5	24.64	0.770	2 232	27 980
S10	30.70	0.96	0.95	30.39	1.01	2.98	1/10.3	21.95	0.715	2 179	27 525
S15	28.69	0.90	0.90	28.69	1.00	2.98	1/9.63	20.94	0.730	2 157	26 876
S20	26.77	0.84	0.85	27.04	0.99	2.95	1/9.07	18.74	0.700	2 169	26 538
S25	25.54	0.80	0.77	24.56	1.04	2.92	1/8.75	19.03	0.745	2 108	26 020
S30	20.00	0.63	0.69	21.98	0.91	2.83	1/7.09	14.26	0.713	2 096	24 519
SS00	48.13	1.00	1.00	48.13	1.00	5.15	1/9.34	37.35	0.776	2 096	34 471
SS10	46.63	0.97	0.95	45.72	1.02	5.12	1/9.11	36.84	0.790	2 091	33 980
SS15	43.37	0.90	0.90	43.37	1.00	5.03	1/8.62	33.74	0.778	1 906	33 593
SS20	40.60	0.84	0.85	41.01	0.99	4.89	1/8.30	31.26	0.770	1 805	33 066
SS25	37.28	0.77	0.77	37.28	1.00	4.84	1/7.70	29.45	0.790	1 906	32 894
SS30	35.97	0.75	0.69	33.00	1.09	4.82	1/7.46	28.13	0.782	2 012	32 484

注: *f_{cu}*表示抗压强度, *f_{cu}·f_{cu,00}⁻¹*表示抗压强度与基准抗压强度的比值, *f_{cu}'*表示计算抗压强度, *f_{cu}'·f_{cu,00}⁻¹*表示计算抗压强度与基准抗压强度的比值, *F_c*表示*f_{cu}/f_{cu,00}*与*f_{cu}'/f_{cu,00}*的比值, *f_{pl}*表示劈拉强度, *f_{pl}'·f_{cu}⁻¹*表示拉压比, *f_c*表示轴压强度, *f_c·f_{cu}⁻¹*表示轴压强度与抗压强度的比值, *v*表示泊松比, *E_c*表示弹性模量。

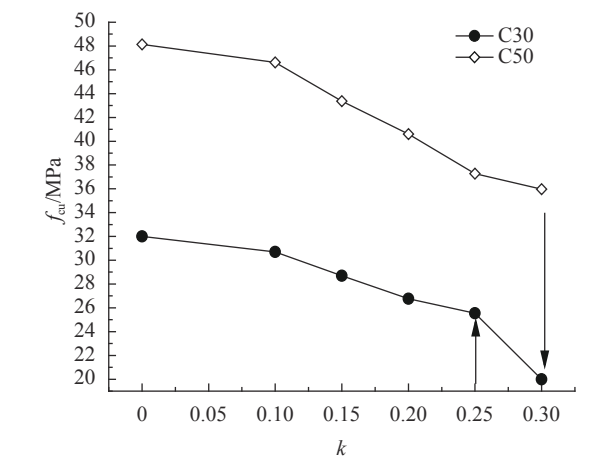
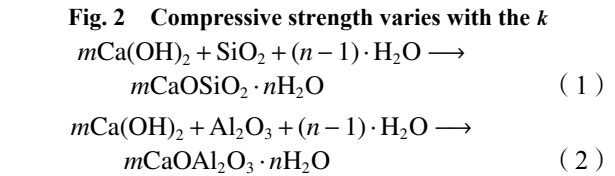


图 2 抗压强度随*k*变化



分析认为平板玻璃中活性SiO₂、Al₂O₃占比较大(图1)能同水反应生成低碱度水化硅酸钙(C-S-H),消耗Ca(OH)₂的同时,又生成了部分水化铝酸钙(C-

A-H)^[19],进而弥补由于水泥含量的减少导致水化物减少的量,故在0~25%掺量过程中抗压强度缓慢下降。当废玻璃粉掺量>25%时,随着水泥含量的减少,水化硅酸钙等产物的量越来越少,废玻璃粉与水泥产物反应所增加的(C-S-H)与(C-A-H)也就不足以弥补水泥量减少而造成的水化产物减少的量,因此表现出强度有下降较大的跳跃。但当提高试配强度等级至C50时,则会迟缓废玻璃粉掺量的作用。

这与文献[19,20]分析水解产生Ca²⁺形成水化层包裹玻璃粉阻止进一步反应,后由于废玻璃粉掺量的增加,导致Ca²⁺扩散消耗大部分能量导致其穿透能力受阻原因相吻合。另外由于废玻璃粉颗粒的组成成分与颗粒表面粗糙度的差异,导致其强度与颗粒间黏结力不一致,进而使其最佳掺量存在一定差异。文献[10]建议的C30WGPC废玻璃粉掺量可在0~20%之间,试验对于C30配比下废玻璃粉替代水泥掺量建议可在0~25%范围以内,C50配比下废玻璃粉最佳掺量值为大于25%的某一掺量值。

2.1.2 废玻璃粉掺量与抗压强度关系

以各个强度配比中00编号组的抗压强度为基准

强度 $f_{cu,00}$,其他掺量下强度与基准强度的比值 $f_{cu}/f_{cu,00}$ 为相对强度,如图3所示。统一C30WGPC与C50WG-PC,通过对 k 与 $f_{cu}/f_{cu,00}$ 回归分析有:

$$f_{cu}/f_{cu,00} = -2.76k^2 - 0.22k + 1.00, 0 \leq k \leq 0.3 \quad (3)$$

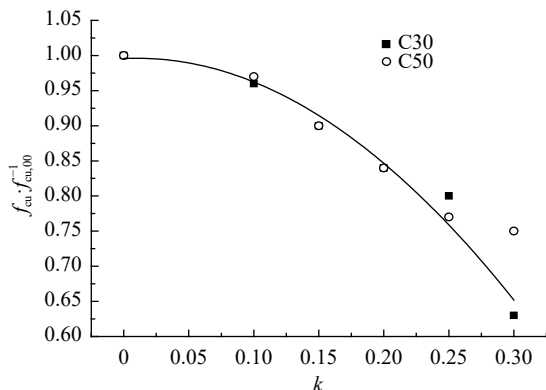


图 3 $f_{cu}/f_{cu,00}$ 随 k 变化

Fig. 3 $f_{cu}/f_{cu,00}$ varies with the k

分析式(3)并计算,结果列于表2,根据表2中的组内各废玻璃粉掺量下抗压强度与组内00编号抗压强度比值的计算值和实测值可知,二者吻合度较好,C30配比下实测值与计算值比值的平均值为0.99,方差为0.001 5,变异系数为0.039;C50配比下平均值为1.01,方差为0.001 2,变异系数为0.034,由此可知式(3)的计算效果较好。

2.2 劈拉强度

劈拉强度试验采用150 mm×150 mm×150 mm立方体试块,试验方法按《水工混凝土试验规程》(SL352—2006)执行,试验结果见表2。混凝土劈拉强度与抗压强度的比值为拉压比,是表征混凝土脆性的指标,混凝土的强度越高,脆性越大。由于抗拉强度不能同步增长,所以拉压比会降低^[21]。分析表2可知:

1) C30WGPC的拉压比在1:10.30~1:7.09之间,C50WGPC则介于1:9.11~1:7.46之间,比普通混凝土拉压比(约为1:10)要高,表明废玻璃粉的掺入改善了混凝土的脆性;

2) 同一强度配比下WGPC的拉压比均随着废玻璃粉掺量的增加而增大,表明增加废玻璃粉掺量,抗压强度降低幅度大于抗拉强度的降低;

3) 对比两类强度等级同等废玻璃粉掺量下的拉压比,可知随着强度等级配比的提高,WGPC的脆性有所增大,这与普通混凝土变化规律相类似。

分析认为废玻璃粉粒度具有多棱角特性,可提高与骨料之间的黏结效果,从而在力的互相作用下提高了两者机械咬合力,故在水化作用起主要强度作用来源的同时,一定程度延缓了抗拉强度的降低。当为C50配比强度时,水化作用会更加充分,因而其

拉压比更大。

2.3 轴压强度

轴压强度试验采用150 mm×150 mm×300 mm棱柱体试块,试验按标准GB/T50081—2002执行。普通混凝土轴压强度与抗压强度的比值在0.70~0.92之间^[22]。分析表2可知:WGPC轴压强度随着废玻璃粉掺量的增加单调减小,轴压强度与抗压强度的比值比较分散,C30配比下介于0.70~0.77,平均值为0.729,标准差为0.000 5,变异系数0.000 6,其波动性相对较大。C50配比下则介于0.78~0.79,平均值为0.781,标准差为0.000 05,变异系数为0.000 068,其波动性相对较小。图4拟合得到的C50配比下公式线性离散系数为0.99,C30配比下线性离散系数为0.953 87,其线性回归得出的WGPC轴压强度 f_c 与 f_{cu} 之间的关系为:

$$\text{C30: } f_{c,3} = 0.80f_{cu} - 1.96, \quad 20.00 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 32.00 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\text{C50: } f_{c,5} = 0.77f_{cu} + 0.29, \quad 35.97 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 48.13 \text{ MPa} \quad (5)$$

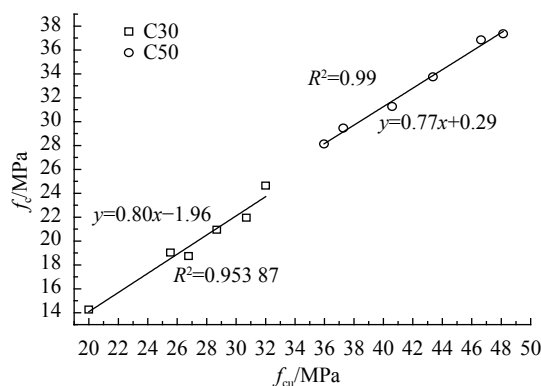


图 4 轴压强度与抗压强度关系

Fig. 4 Relationship between axial compressive strength and cubic compressive strength

文献[23]给出了3种普通混凝土轴压强度的计算式:

$$\text{德国 Graf: } f_c = (0.85 - f_{cu}/172)f_{cu} \quad (6)$$

$$\text{中国: } f_c = 0.84f_{cu} - 1.62 \quad (7)$$

$$\text{中国: } f_c = 0.8f_{cu} \quad (8)$$

将式(4)~(8)分别以C30与C50两类强度等级进行轴压强度计算值与实测值的对比分析,结果如表3和图5所示。结合表3与图5可知:式(6)的计算值与实测值误差都较大,式(7)、(8)与拟合下的式(4)线性重合度较差,式(5)与式(7)、(8)及实测值重合度较高,因此式(5)可以近似地进行普通混凝土抗压强度与轴压强度的换算。

表 3 计算值与实测值的对比

Tab. 3 Comparison of calculated values and test values

编号	f_{cu}/MPa	$f_{c,3}/\text{MPa}$	f'_c/MPa			
			式 (4)	式 (6)	式 (7)	式 (8)
S00	32.00	24.64	23.6	21.3	25.3	25.6
S10	30.70	21.95	22.6	20.6	24.2	24.5
S15	28.69	20.94	20.9	19.6	22.5	22.9
S20	26.77	18.74	19.4	18.6	20.9	21.4
S25	25.54	19.03	18.5	17.9	19.8	20.4
S30	20.00	14.26	14.0	14.7	15.2	16.0

编号	f_{cu}/MPa	$f_{c,5}/\text{MPa}$	f'_c/MPa			
			式 (5)	式 (6)	式 (7)	式 (8)
SS00	48.13	37.35	37.3	27.4	38.8	38.5
SS10	46.63	36.84	36.2	27.0	37.5	37.3
SS15	43.37	33.74	33.7	26.0	34.8	34.7
SS20	40.60	31.26	31.5	24.9	32.5	32.5
SS25	37.28	29.45	29.0	23.6	29.7	29.8
SS30	35.97	28.13	28.0	23.0	28.6	28.8

注: f'_c 表示公式计算所得轴压强度, $f_{c,3}$ 表示C30WGPC轴压强度, $f_{c,5}$ 表示C50WGPC轴压强度。

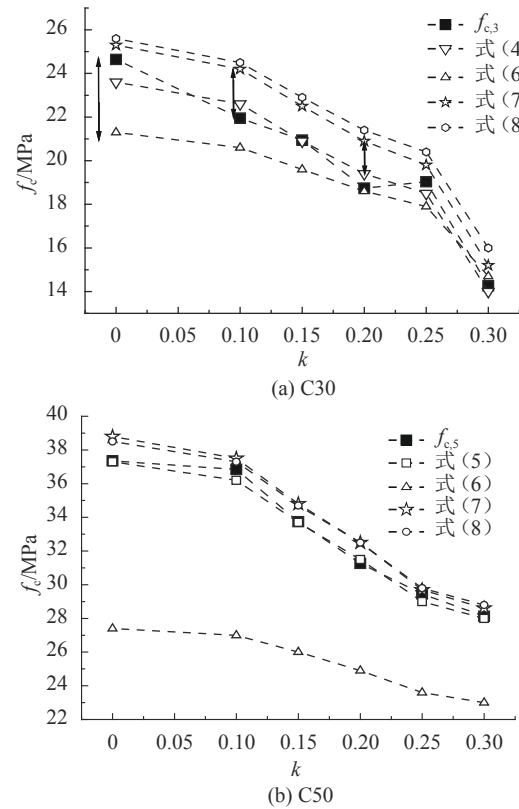


图 5 轴压强度计算值与实测值的对比

Fig. 5 Comparison between calculated values and test values of axial compressive strength

2.4 弹性模量

2.4.1 废玻璃粉掺量对弹性模量的影响变化

WGPC弹性模量与泊松比的测定采用电阻应变仪和引伸仪法,试验采用150 mm×150 mm×300 mm棱柱体试块,同时进行应力应变数据的采集,试验按标准GB/T50081—2002的规定,在应力为0.5 MPa~1/3 f_c 段进行。

由表2可知, WGPC的弹性模量随着掺量的增加单调减小, 如图6所示。从应力应变曲线斜率变化可知, 各个掺量变化下的C50WGPC应力应变曲线比C30WGPC的更紧凑, 表明C30WGPC弹性模量值在

各个掺量变化下跳跃性幅度大于C50WGPC弹性模量的变化幅度。

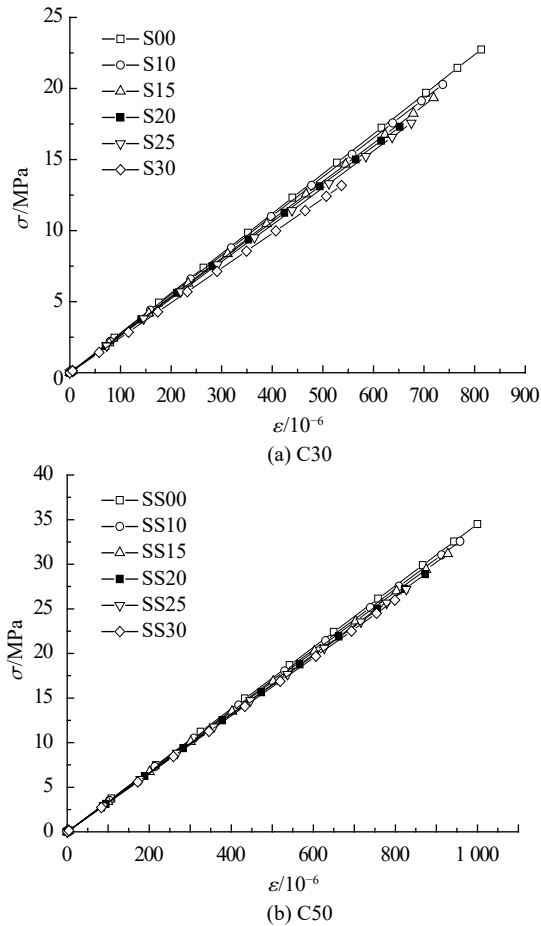


图 6 弹性模量测量时WGPC的应力应变曲线

Fig. 6 Stress strain curves of WGPC during elastic modulus measurement

这可能是因为废玻璃粉作为水泥掺合料有吸水率低的特性, 在相同水胶比设计时, WGPC的实际水灰比会增加, 在浆体与骨料界面过渡区的密实黏力受影响表现明显, 导致其强度会降低, 进而其弹性模量也会相应减小。而在提高强度配比时, 界面过渡区黏力影响效果会降低, 因而C50WGPC在各个掺量变

化下表现得更聚集紧凑。

2.4.2 WGPC弹性模量计算公式

弹性模量作为材料变形的主要指标,是进行混凝土结构分析与计算的基本依据之一,目前已建立了很多经验公式。试验所得试验结果用非线性拟合,可得出WGPC的弹性模量 E_c 和 f_{cu} 之间的关系式为:

C30: $E_{c,3} = (1.38 + 0.24 \sqrt{f_{cu}}) \times 10^4,$
 $20.00 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 32.00 \text{ MPa}$ (9)

C50: $E_{c,5} = (2.06 + 0.20 \sqrt{f_{cu}}) \times 10^4,$
 $35.97 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 48.13 \text{ MPa}$ (10)

中国《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)规定的C60以下不同强度混凝土的弹性模量计算公式为:

$E_c = \frac{1}{2.2 + 34.73/f_{cu}} \times 10^3$ (11)

美国公路运输联合会(AASHTO)规范和AIC318—77建筑规范给出的计算公式为:

$E_c = 4\,789 \sqrt{f_{cu}}$ (12)

文献[23]提到的计算公式为:

$E_c = (1.787 + 0.261 \sqrt{f_{cu}}) \times 10^4$ (13)

WGPC弹性模量与抗压强度关系如图7所示。

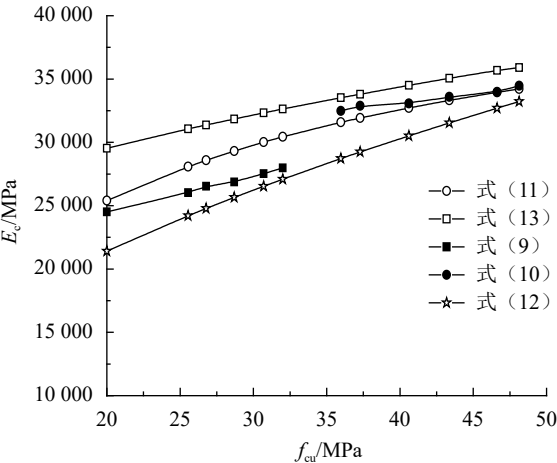


图 7 WGPC弹性模量与抗压强度关系

Fig. 7 Relationship between elastic modulus and compressive strength of WGPC

从图7可知,式(10)基本相切于式(11),对应于其上限且夹在式(11)与(13)之间。式(9)接于式(11)的下限,而与式(10)相隔于规范计算公式(11),相比之下AIC318—77标准式(12)则紧接式(9)的上限。因此C30WGPC与C50WGPC的弹性模量拟合公式可以用来近似地计算普通混凝土的弹性模量。

2.5 泊松比

泊松比是反映混凝土横向变形的重要指标。试

验中泊松比 ν 是通过测定应力在 $0.5 \text{ MPa} \sim 1/3 f_c$ 弹性稳定段的横向应变与纵向应变的比值所得,如图8所示。由表2与图8可知:废玻璃粉的掺入微弱降低了混凝土的泊松比,且变化有较明显的离散性;对于C30WGPC,其泊松比在 $0.209\,6 \sim 0.223\,2$ 范围内,平均值为 $0.215\,6$,标准差为 $0.004\,5$,变异系数为 0.021 ;对于C50WGPC,其泊松比在 $0.180\,5 \sim 0.209\,6$ 之间,平均值为 $0.196\,9$,标准差为 0.01 ,变异系数为 0.051 。两者泊松比浮动都较小,而规范GB50010—2010中混凝土泊松比要求取 0.2 ,由此可知WGPC的泊松比与普通混凝土的泊松比相比差别不大。

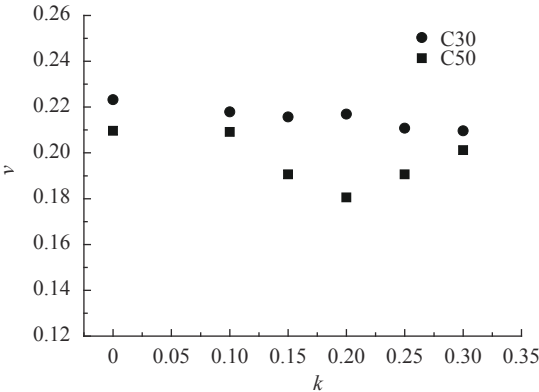


图 8 泊松比随k变化

Fig. 8 Poisson ratio varies with the k

3 结 论

进行了6种不同取代率、两类强度等级的WG-PC的抗压强度、劈拉强度、轴压强度、弹性模量与泊松比试验。根据试验结果对各指标在掺量变化下的影响作用机理及相关换算关系进行了分析,得到以下结论:

1)WGPC随掺量的增加,相邻掺量抗压强度同比减少,其中:C30WGPC抗压强度在掺量 $25\% \sim 30\%$ 范围降低幅度最大,达到了 21.7% ;C30配比下废玻璃粉替代水泥掺量可在 $0 \sim 25\%$ 范围以内,C50配比下废玻璃粉最佳掺量值为大于 25% 的某一掺量值。

2)揭示了WGPC的抗压强度与掺量的关系机理原理,其拟合公式对于C30与C50配比下的WGPC有较好的适用性。

3)C30WGPC拉压比在 $1/10.30 \sim 1/7.09$ 之间,C50WGPC拉压比在 $1/9.11 \sim 1/7.46$ 之间,两者都随着废玻璃粉掺量的增加单调增大,且都大于普通混凝土的拉压比;同时,废玻璃粉的掺入改善了混凝土的脆性,随着试配混凝土强度等级的提高,WGPC的脆性会有所提高。

4)C30WGPC轴压强度与抗压强度的比值在 $0.70 \sim 0.77$ 之间,C50WGPC在 $0.78 \sim 0.79$ 之间,

C50WGPC轴压强度与抗压强度关系式可以近似进行普通混凝土两者关系式的换算。

5) C30WGPC弹性模量随掺量增加其变化幅度比C50WGPC更大,两者各自的拟合计算公式可以近似计算普通混凝土的弹性模量。C30WGPC泊松比在0.209 6~0.223 2范围内,C50WGPC泊松比在0.180 5~0.209 6范围内,同普通混凝土泊松比相比差别不大。

参考文献:

- [1] Topcu I B, Canbaz M. Properties of concrete containing waste glass[J]. *Cement & Concrete Research*, 2004, 34(2): 267–274.
- [2] Heriyanto, Pahlevani F, Sahajwalla V. From waste glass to building materials: An innovative sustainable solution for waste glass[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191(1): 192–206.
- [3] Qu Chao, Gao Zhiyang, Liu Shuhua, et al. Application research of obsolete glass dust used in RPC[J]. *Concrete*, 2011(8): 82–84. [曲超, 高志扬, 刘数华, 等. 废弃玻璃粉在活性粉末混凝土中的应用研究[J]. *混凝土*, 2011(8): 82–84.]
- [4] Zai X. China renewable resources recycling industry development report 2017 from commerce department[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017(5): 16–25. [再协. 商务部发布《中国再生资源回收行业发展报告2017》[J]. *中国资源综合利用*, 2017(5): 16–25.]
- [5] Wang Haijuan, Zhang Yishun, Zhao Jifen, et al. Research on using waste glass powder as pulverized admixture for concrete[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Nature Science Edition)*, 2012, 31(5): 608–612. [王海娟, 张义顺, 赵继芬, 等. 利用废旧玻璃粉细掺料制备混凝土实验研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(5): 608–612.]
- [6] Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(1): 19–29.
- [7] Islam G M S, Rahman M H, Kazi N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice[J]. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2016, 6(1): 37–44.
- [8] Liu Shuhua, Wang Shu, Zhou Wei, et al. Strength and microstructure of mortar containing glass powder and/or glass aggregate[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 31(6): 126–134.
- [9] Ke Guojun, Li Wenggui, Li Ruyi, et al. Mitigation effect of waste glass powders on alkali-silica reaction (asr) expansion in cementitious composite[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, 12(1): 67–81.
- [10] Zeng Chao, Gan Yuanchu, Ke Guojun, et al. Experimental study on the mechanical property of waste glass powder concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(2): 377–381. [曾超, 甘元初, 柯国军, 等. 废玻璃粉混凝土力学性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(2): 377–381.]
- [11] Sharifi Y, Afshoon I, Firoozjaei Z, et al. Utilization of waste glass microparticles in producing self-consolidating concrete mixtures[J]. *International Journal of Concrete Structures & Materials*, 2016, 10(3): 337–353.
- [12] Tejaswi S S, Rao R C, Vidya B, et al. Experimental investigation of waste glass powder as partial replacement of cement and sand in concrete[J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2017, 8(4): 14–22.
- [13] Shayan A, Xu A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs[J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(3): 457–468.
- [14] Qiu Haoqun, Ke Guojun, Xie Yanjun. Research on the mechanical properties of waste glass concrete and fractal evaluation under impact loading[J]. *Concrete*, 2016(2): 110–113. [邱浩群, 柯国军, 谢艳军. 冲击荷载下废玻璃粉混凝土力学特性研究及分开评价[J]. *混凝土*, 2016(2): 110–113.]
- [15] Mousa M, Cuenca E, Ferrara L, et al. Tensile characterization of an “eco-friendly” uhpfr with waste glass powder and glass sand[C]//International Conference on Strain-hardening Cement-based Composites. New York: Springer, 2017, 15: 238–248.
- [16] Xiong Wei, Gan Yuanchu, Ke Guojun, et al. Experimental study on shear behavior of waste glass powder reinforced concrete beams[J]. *Concrete*, 2017(4): 65–68. [熊伟, 甘元初, 柯国军, 等. 废玻璃粉钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. *混凝土*, 2017(4): 65–68.]
- [17] Schwarz N, Neithalath N. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(4): 429–436.
- [18] Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars[J]. *Construction & Building Materials*, 2010, 24(7): 1309–1312.
- [19] Song Baixing. Active provocation test of waste glass powder[D]. Hengyang: University of South China, 2013. [宋百姓. 废玻璃粉活性激发试验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.]
- [20] Gambo H I, Mamza P A P, Gonah C M. Pozzolanic reactivity of cement with soda-lime silicate and borosilicate waste glass powder in concrete production[J]. *Journal of Science, Technology & Education*, 2018, 6(2): 262–272.
- [21] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系: 原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [22] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [23] Pu Xincheng, Wang Zhijun, Wang Chong. Mechanical properties of super high-strength and high performance concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(6): 46–55. [蒲心诚, 王志军, 王冲. 超高强高性能混凝土的力学性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2002, 23(6): 46–55.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Li Song, Jiao Chujie, Gan Yuanchu. Study on mechanical properties of waste glass powder concrete[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 199–205. [李松, 焦楚杰, 甘元初. 废玻璃粉混凝土力学性能研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 199–205.]