

[文章编号] 1003—4684(2021)04-0079-06

玻璃粉细骨料混凝土力学性能研究

黄炎林, 周 安

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为探讨玻璃粉替代河沙对混凝土力学性能的影响, 设计了 90 个试件, 通过混凝土基本力学试验, 研究玻璃粉替代率从 0 增加到 50% 时, 玻璃粉细骨料混凝土坍落度、细度模数、抗压强度、劈裂拉伸强度和静压弹性模量的变化趋势, 并分析玻璃粉细骨料混凝土应力-应变本构方程和基于主成份分析法的综合性能。结果表明: 随着玻璃粉替代率的增加, 玻璃粉细骨料混凝土的细度模数和坍落度不断降低, 当替代率为 30% 时, 坍落度为 13.7 cm; 立方体抗压强度、轴心抗压强度和劈裂拉伸强度呈先上升后下降再增加的趋势; 弹性模量呈先上升后下降的趋势; 玻璃粉细骨料混凝土的应力-应变全过程曲线和普通混凝土类似, 其本构方程计算结果和试验数据基本吻合; 玻璃粉替代率为 30% 时, 主成份分析的综合得分高于普通混凝土, 玻璃粉细骨料混凝土的抗压性能和抗拉性能较佳, 具有实际应用价值。

[关键词] 玻璃粉细骨料; 力学性能; 本构方程; 主成份分析

[中图分类号] TU528 [文献标识码] A

废弃玻璃因其回收再加工成本较高, 常被做为生活垃圾丢弃^[1]。中国每年废弃玻璃产量在 1 亿 t 左右, 综合利用率只有 25%~30%, 远低于 70% 的国际水平^[2-3]。玻璃粉是由废弃玻璃研磨制成, 主要成分为 SiO_2 , 具有较高的火山灰活性^[4-6]。为了提高废弃玻璃的利用率, 国内外学者对废玻璃细骨料混凝土做了一些研究。例如, Lee 等^[7] 研究指出 20% 的玻璃粉等质量替代水泥, 混凝土 90 t 的抗压强度有较大提高。杨震等^[8] 研究表明 30% 的河沙被玻璃粉替代时, 混凝土的 28 d 抗压强度达到最大, 为 28 MPa 左右。赫文秀和 Wang 等^[9-10] 研究发现当废玻璃替代 20% 的天然河沙, 废玻璃细骨料混凝土的流动性和抗压强度最佳。Limbachiya 等^[11] 的研究结果表明废玻璃替代 0~20% 的河沙时, 废玻璃细骨料混凝土的抗压强度未有明显变化, 当替代量超过 20% 时, 抗压强度呈下降趋势。H. Ez-zaki 等^[12] 通过研究不同体积替代量的玻璃粉对砂浆耐久性的影响, 发现当 40% 的河沙被玻璃粉替代时, 砂浆的抗氯离子腐蚀性能较优异。

当前, 废玻璃细骨料混凝土的研究主要集中在混凝土流动性、立方体抗压强度和混凝土抗氯离子性能等方面。关于玻璃粉细骨料混凝土 (Concrete of Glass Powder as Fine Aggregate 简称 GFAC) 细度模数、本构方程和基于主成份分析法

的混凝土性能评价等方面研究较少。考虑以上因素, 本论文用玻璃粉替代部分天然河沙, 分析了玻璃粉细骨料混凝土的轴心抗压应力-应变本构关系。并采用主成份分析法, 研究了抗压强度和劈拉强度对混凝土性能的影响, 得出最佳玻璃粉替代率, 为促进玻璃粉在建筑领域的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

水泥采用华新生产了 P.O42.5 普通硅酸盐水泥; 粗骨料采用连续级配碎石, 粒径范围是 5~25 mm; 细骨料为天然河沙, 含水率为 2.51%, 细度模数为 2.92; 搅拌和养护用水均是当地饮用水。玻璃粉全部来源于中国灵寿县恒聚加工厂, 表观密度为 $2150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 直径在 0.15 mm 以下。

1.2 试验试件和方法

试验以玻璃粉等体积替代率为自变量, 分别设计 0、10%、20%、30%、40% 和 50% 六个替代等级。共制作了 90 个试件, 分为 6 组, 每组试件包括 6 个 $100 \times 100 \times 100$ 立方体试件 (3 个做劈裂拉伸强度试验, 3 个做立方体抗压试验) 和 9 个 $100 \times 100 \times 300$ 棱柱体试件 (3 个测量混凝土应力、应变, 3 个做轴心抗压试验, 3 个做静压弹性模量试验), 试件的详细配合比见表 1。

[收稿日期] 2020—10—29

[第一作者] 黄炎林 (1992—), 男, 河南信阳人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方为新材料力学性能

[通信作者] 周 安 (1983—), 男, 湖北武汉人, 理学博士, 湖北工业大学讲师, 研究方向为新材料力学性能

表 1 混凝土配合比

试件	替代率/%	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗骨料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细骨料/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
					河沙	玻璃粉	
GFAC-0	0	205	379.6	1151.31	619.94	0	1.63
GFAC-1	10	205	379.6	1151.31	619.94	52.27	1.63
GFAC-2	20	205	379.6	1151.31	619.94	104.54	1.63
GFAC-3	30	205	379.6	1151.31	619.94	156.81	1.63
GFAC-4	40	205	379.6	1151.31	619.94	209.08	1.63
GFAC-5	50	205	379.6	1151.31	619.94	261.35	1.63

GFAC-X 表示一组玻璃粉细骨料混凝土;GFAC 表示玻璃粉细骨料混凝土;X 表示玻璃粉的等体积替代率

玻璃粉细骨料混凝土采用强制式搅拌机进行搅拌,在振动台上震动 2 min,室温静置 24 h 后脱模,标准养护 28 d。然后在微控电液伺服试验机上以 0.01 mm/s 的加载速度进行力学试验,主要包括立方体抗压试验、轴心抗压试验、劈裂拉伸试验和静压弹性模量试验,并用位移计采集混凝土的变形。

2 试验结果及分析

2.1 混凝土细骨料级配

在对不同玻璃粉替代率混凝土的细骨料级配进行测量分析时,得出了混凝土细度模数随玻璃粉替代率增加的变化趋势图(图 1)。

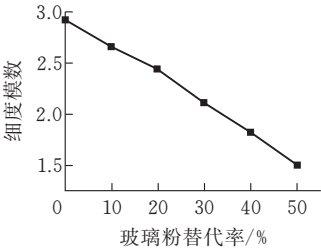


图 1 各组替代率下的细度模数

如图 1 所示,细骨料的细度模数呈直线下降的趋势,主要原因是玻璃粉为粉状物,其直径在 0.15 mm 以下。而天然河沙的直径,约 66.5% 左右处于 0.6~5.0 mm 的范围内,其细度模数是 2.92。因此,当玻璃粉的替代量增加时,0.15 mm 以下了颗粒就会增多,GFAC 的细度模数将会降低。

2.2 混凝土坍落度

通过对不同玻璃粉替代率混凝土的坍落度进行测量分析,得出了混凝土坍落度随玻璃粉替代率增加的变化趋势图(图 2)。

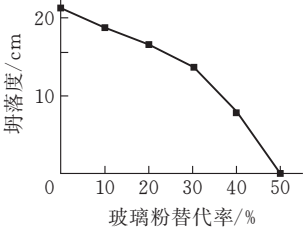


图 2 各组替代率下的坍落度

由图 2 可知,GFAC 的坍落度呈下降趋势,曲线斜率不断增大,表明坍落度下降速度不断增加。主要原因是玻璃粉为 0.15 mm 以下的粉末状颗粒,与河沙同质量的玻璃粉具有更大的总表面积,吸水量更多。同时,玻璃粉的含水率是 0.32%,约是河沙的 1/3,玻璃粉的吸水率是 18.64%,是河沙的 2.46 倍左右,玻璃粉会将大量处于自由状态的水(简称:自由水)吸收到颗粒内部。因此,当玻璃粉替代率增加时,细骨料的吸水量增加,在总用水量不变的情况下,GFAC 具有更少的自由水,导致混凝土的水灰比减小,流动性降低,混凝土的坍落度呈减小趋势。

2.3 混凝土抗压强度

通过在微控电液伺服试验机上以 0.01 mm/s 的加载速度进行抗压试验,测出了玻璃粉细骨料混凝土的立方体抗压强度和轴心抗压强度,得到了玻璃粉细骨料混凝土抗压强度随玻璃粉替代率增加的变化趋势图(图 3)。

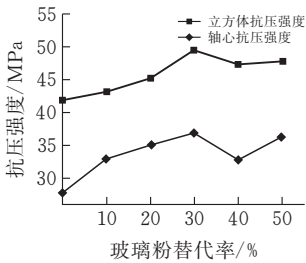


图 3 各组替代率下的抗压强度

如图 3 所示,GFAC 的立方体抗压强度和轴心抗压强度具有相同的趋势图,随玻璃粉替代率的增加呈先上升后下降再增加的趋势,且立方体抗压强度和轴心抗压强度均比普通混凝土高。当替代率由 30% 增加到 40% 时,GFAC 的抗压强度发生降低,是因为玻璃粉颗粒微细,改变的细骨料的级配,砂浆内部的平均孔径增大^[13],减小了砂浆强度,砂浆与粗骨料间的连结力降低。替代率从 40% 增加到 50% 时,GFAC 的抗压强度出现大幅增加现象,主要原因是玻璃粉的主要成分为 SiO₂,可以促进水泥的二次水化反映,产生的硅酸钙使混凝土内部更加密实。

同时,玻璃粉的吸水率较大,当玻璃粉的替代量增加时,混凝土的水灰比将会减小,而适当减小水灰比可以提高混凝土的强度^[14]。

2.4 混凝土劈裂拉伸强度

玻璃粉细骨料混凝土的劈裂拉伸强度随玻璃粉替代率增加的变化趋势见图 4。

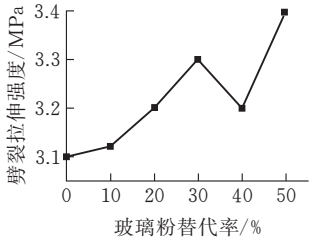


图 4 各组替代率下的劈裂拉伸强度

由图 4 可知,GFAC 的劈裂拉伸强度随玻璃粉替代率的增加呈先上升后下降再升高的趋势,当玻璃粉替代率从 0 增加到 50%时,GFAC 的劈裂拉伸强度均比普通混凝土高。当玻璃粉替代率从 30%增加到 40%时,GFAC 抗拉强度减少,主要原因和 GFAC 抗压强度类似。

2.5 混凝土相对弹性模量

在对玻璃粉细骨料混凝土弹性模量进行测量分析时,以普通混凝土(玻璃粉替代率为 0)弹性模量为基准,将各组玻璃粉细骨料混凝土的弹性模量与其对比,进行量纲统一化处理,得到了玻璃粉细骨料混凝土相对弹性模量随玻璃粉替代率增加的变化趋势图(图 5)。

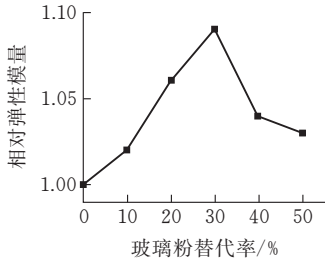


图 5 各组替代率下的弹性模量相对值

如图 5 所示,玻璃粉的替代率从 10%提升到 50%时,GFAC 的弹性模量均比普通混凝土高。主要原因是玻璃粉的主要成分为 SiO₂,可以促进水泥的二次水化反映,产生的硅酸钙使混凝土内部更加密实,导致混凝土在受到等值的压力变化时,GFAC 具有相对较小的变形。而根据弹性模量计算公式(1)可知,当(F_a-F₀)的压力值不变时,Δ_n越小,弹性模量越大。

$$E_c = (F_a - F_0)L_n / (A \times \Delta_n) \tag{1}$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量; F_a 为应力为 1/3 轴心抗压强度时的荷载; F₀ 表示应力为 0.5 MPa 时的初始荷载; L_n 为测量表距; A 为试件承压面积; Δ_n

为从 F₀ 加荷到 F_a 时试件的变形差。

3 本构方程

在对 100×100×300 的试件进行 GFAC 应力、应变测量时,主要分为三个步骤。首先,先测量混凝土压缩变量和相对压力值。然后,通过公式(2)计算混凝土的应力、应变值。最后,通过 σ/σ_c 和 ε/ε_c (σ_c 和 ε_c 分别代表 GFAC 的峰值应力与峰值应变)对玻璃粉细骨料混凝土的应力、应变进行无量纲处理^[15], 求出应力比和应变比,处理结果见图 6。

$$\sigma = F/A, \epsilon = \Delta L/L \tag{2}$$

式中: F 为轴心抗压强度, A 为混凝土受压面积, ΔL 为混凝土压缩变量, L 是试件高度。

如图 6 所示,当玻璃粉替代率从 10%提升到 50%时,GFAC 上升段的应力-应变曲线与普通混凝土较好贴合。说明在弹性和弹塑性阶段,GFAC 的变形机理与普通混凝土类似。而下降段的曲线走势较分散,主要原因是不同替代率的 GFAC,其抗压性能差距大,裂缝发展的离散性较大。当替代率为 40%和 50%时,因 GFAC 的脆性较大,裂缝发展速度快,只能测到一部分的应力、应变值。替代率为 10%和 20%时,GFAC 的曲线走势和普通混凝土基本重合,抗压破坏形式和普通混凝土类似。

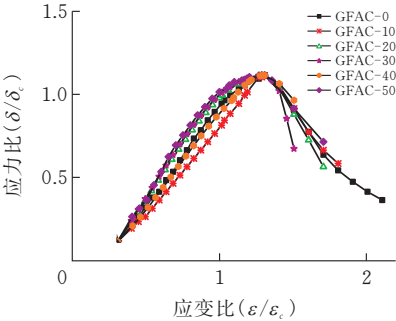


图 6 玻璃粉细骨料混凝土应力-应变全曲线

由图 6 可知,GFAC 的应力-应变全曲线趋势图与普通混凝土的类似,都经历了弹性阶段、弹塑性阶段和屈服破坏阶段^[15-16]。因此可通过 origin 的非线性拟合功能,根据普通混凝土的应力-应变全曲线方程^[16],建立 GFAC 的近似本构方程:

$$y = \alpha x + (3 - 2\alpha)x^2 + (\alpha - 2)x^3, (0 \leq x \leq 1)$$
$$y = \frac{x}{\beta(x - 1)x^2 + x}, (x \geq 1) \tag{3}$$

式中: α 为 GFAC 应力-应变全曲线方程中上升段的参数, β 是下降段的参数。利用 origin 软件对试验数据进行拟合分析,当 α=1.579、β=6.978 时,得到了拟合曲线和 GFAC 试验数据基本吻合。因此, α=1.579、β=6.978 可作玻璃粉细骨料混凝土

应力-应变本构方程的参数取值。由此得到玻璃粉细骨料混凝土的应力-应变本构方程拟合曲线(图 7)。

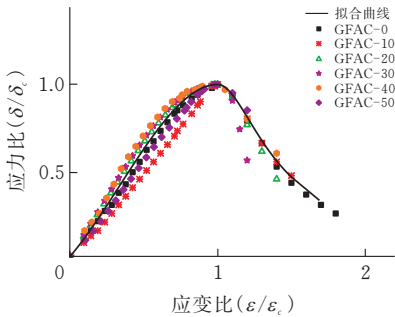


图 7 玻璃粉细骨料混凝土的应力-应变本构方程拟合曲线

4 主成份分析法

主成份分析法是通过降维的方式将 N 个评价标准转换成几个不关联的综合评价标准。并对原始数据进行无量纲化处理,减少数据差异性,分析每个单一指标间的相对关系,得出综合评价标准,进行评价对象的综合分析^[17-19]。主成份分析法的主要分析步骤见图 8。

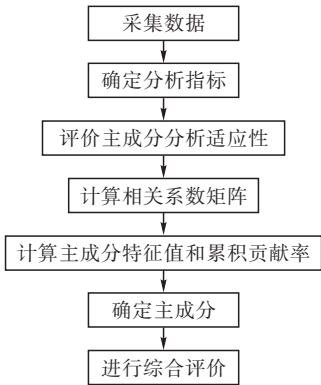


图 8 主成份分析步骤

4.1 分析结果

评价指标的正确选择,是决定综合评价结果正确性的主要影响要素^[20]。而抗压性能和抗劈拉性能是判断混凝土是否具有实用价值的主要参考要素。因此,本试验选取立方体抗压强度、劈拉强度和轴心抗压强度做为评价玻璃粉细骨料混凝土实用性能的分析指标,进行主成份分析。分别得出 3 个分析指标的适用性验证结果(表 2)、相关系数矩阵(表 3)、主成份特征值及贡献率(表 4)、主成份矩阵(表 5)和分析对象综合评价得分及排序(表 6)。

KMO 检测是判断评价指标是否适合主成份分析的一种统计学检测法, Sig 是评估数据显著性的重要指标^[21]。如表 2 所示, KMO 值大于 0.6, sig 值小于 0.05,表明选取的混凝土评价指标符合主成

份分析准则,试验数据是显著的。

表 2 KMO 和 Bartlett 检验

检测方法		结果
KMO 测定值		0.757
Bartlett 检验	近似卡方	7.466
	df	3
	sig	0.048

如表 3 所示,评价指标间的相关系数最小值是 0.772,大于 0.5,证明评价指标变量之间具有中等相关性。

表 3 评价指标相关系数矩阵

相关系数	立方体抗压强度	轴心抗压强度	劈裂拉伸强度
立方体抗压强度	1.000	0.824	0.772
轴心抗压强度	0.824	1.000	0.823
劈裂拉伸强度	0.772	0.823	1.000

累积贡献率是指前几个主成份共同对原评价标准的解释能力,累积贡献率值越大,正确解释的概率越高^[17]。如表 4 所示,主成份 1 和主成份 2 的累积贡献率在 94 % 左右,可以准确反应玻璃粉细骨料混凝土的综合性能。

表 4 主成份特征值和累积贡献率

主成份	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.613	87.100	87.100
2	0.228	7.614	94.714

主成份矩阵可以反映主成份和评价标准之间的相关性。相关系数绝对值的大小,体现相关性的强弱,系数的正负值分别代表正相关和负相关^[17]。由表 5 可知,主成份 1 与原评价标准的相关系数数值均大于 0.9,表明主成份 1 和评价标准具有较强的正相关性;主成份 2 与 GFAC 抗压评价标准具有负相关性,和劈裂拉伸强度有正相关性,因此,主成份 2 主要反映混凝土的抗劈拉性能。

表 5 主成份矩阵

	主成份 1	主成份 2
立方体抗压强度	0.946	-0.002
轴心抗压强度	0.927	-0.337
劈裂拉伸强度	0.926	0.339

综合得分是体现 GFAC 抗压性能和抗劈拉性能的一个综合评估值,数值越大,GFAC 的抗压性能和抗劈拉性能越突出^[17]。如表 6 所示,当玻璃粉替代为 30 % 时,GFAC 的综合得分最高,具有较好的抗压性能和抗劈拉性能,而且其坍落度为 13.7 cm,大于 10 cm,证明有一定的实际应用参考价值。

表 6 分析对象综合得分及排序

替代率/%	主成份 1	主成份 2	综合得分	排序
0	—2.384	—0.555	—6.357	6
10	—1.179	0.590	—2.947	5
20	0.015	0.388	0.127	4
30	1.724	0.183	4.547	1
40	0.090	—0.061	0.222	3
50	1.735	—0.544	4.408	2

5 结论

1)GFAC的细度模数和坍落度随玻璃粉替代率的增加而降低,当玻璃粉的替代率为40%和50%时,GFAC的坍落度小于10 cm;立方体抗压强度、轴心抗压强度和立方体劈裂拉伸强度随玻璃粉替代率的增加呈先上升后下降再增加的趋势;弹性模量随玻璃粉替代率的增加呈先上升后下降的趋势。

2)当 $\alpha=1.579$ 、 $\beta=6.978$ 时,根据普通混凝土应力-应变全曲线方程求得了拟合曲线和 GFAC 的试验数据基本吻合; $\alpha=1.579$ 、 $\beta=6.978$ 可作 CFAC 应力-应变本构方程的参数取值,得到了 GFAC 的应力-应变本构方程和普通混凝土类似,都经历了弹性、弹塑性和屈服破坏阶段。

3)主成份分析法的研究结果表明,当玻璃粉替代率为 30%时,GFAC 的综合得分最高,具有较好的抗压性能和抗劈拉性能,有一定的实际应用参考价值。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 徐美君.国际国内废玻璃的回收与利用(下)[J].建材发展导向,2007(3):55-59.

[3] 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.

[4] KHMIRI A, CHAABOUNI M, SAMET B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars[J]. Construction and Building Materials,2013, 44:74-80.

[5] 宁宝宽,张俊祥,孟晋,等.废玻璃粉-尾矿砂混凝土的强度试验研究[J].矿产综合利用,2015(3):69-72+54.

[6] KARAMBERI A, MOUTSATSOU A. Participation of coloured glass cullet in cementitious materials. 2004, 27(2):319-327.

[7] HYEONGI LEE,ASAD HANIF,MUHAMMAD US-MAN,et al. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,170: 683-693.

[8] 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.

[9] 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.

[10] WANG H. A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete [J]. Waste Management, 2008,29(1):335-341.

[11] MUKESH C. LIMBACHIYA. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete[J]. Construction and Building Materials, 2008, 23(2) : 1078-1083.

[12] EZ -ZAKI H, EL GHARBI B, DIOURI A. Development of eco-friendly mortars incorporating glass and shell powders[J].Construction and Building Materials, 2018(159):198-204.

[13] 何正华.废玻璃粉掺合料对砂浆气体渗透性和力学特性的影响研究[D].湖北:湖北工业大学,2019.

[14] 曾三海,王光辉,笔杆旭光.轻骨料混凝土配合比设计的试验研究[J].新型建筑材料,2013,40(10):55-57+76.

[15] 李志强,王国庆,杨森,等.玻璃粉混凝土力学性能及应力-应变本构关系试验研究[J].应用力学学报,2019, 36(5):1131-1137+1261.

[16] 过振海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003:27-30.

[17] 宇传华.SPSS与统计分析[M].北京:电子工业出版社, 2006:491-493.

[18] 汪海东,曾志兴.基于主成份分析法的高性能再生混凝土性能优化设计[J].混凝土,2011(4):51-53.

[19] 司守奎,数学建模算法与应用[M].2 版.北京:国防工业出版社,2019:231-232.

[20] 赵双权,毛明杰,张文博,等.基于主成份分析的粉煤灰细骨料混凝土最优配合比研究[J].混凝土,2017(8): 104-106.

[21] 陈晓梅,王文华.混杂纤维轻骨料混凝土配合比优选研究[J].混凝土与水泥制品,2016(9):44-47.

Study on Mechanical Properties of Concrete with Glass Powder as Fine Aggregate

HUANG Yanlin ,ZHOU An

(School of Civil Engin., Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: In order to explore the influence of glass powder instead of river sand on the mechanical properties of concrete, 90 specimens were designed for the experiment; Through the basic mechanical test of concrete, the slump, fineness modulus, compressive strength, split tensile strength and static elastic modulus of glass powder fine aggregate concrete are studied when the glass powder replacement rate increases from 0 to 50%. The change trend of the quantity, and the stress-strain constitutive equation of glass powder fine aggregate concrete and the comprehensive performance based on principal component analysis method are analyzed. The results show that with the increase of glass powder replacement rate, the fineness modulus and slump of glass powder fine aggregate concrete continue to decrease. When the replacement rate is 30%, the slump is 13.7cm; the cubic compressive strength, the axial compressive strength and split tensile strength show a trend of increasing first, then decreasing and then increasing; the elastic modulus shows a trend of increasing first and then decreasing; The stress-strain curve of glass powder fine aggregate concrete is similar to that of ordinary concrete, and the calculation results of the constitutive equation are basically consistent with the experimental data; When the glass powder replacement rate is 30%, the comprehensive score of the principal component analysis is higher than that of ordinary concrete, and the glass powder fine aggregate concrete has better compressive and tensile properties, which has practical application value.

Keywords: glass powder fine aggregate; mechanical properties; constitutive equation; principal component analysis

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 56 页)

Fluid-solid Coupling Analysis of Landslide under Fluctuation of Reservoir Water Level and Rainfall

QING Jing,ZHU Lei,CHEN Hao,XIE Peng

(School of Civil Engin., Architecture and Environment , Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068, China)

Abstract: The periodic fluctuation of water level in the reservoir area will change the geological conditions of the soil on both sides of the bank. Under the combined action of rainfall, it is easy to induce the deformation of sliding mass and greatly affect the stability of landslide. In this paper, taking Lujiatuo landslide in the Three Gorges Reservoir Area as an example, according to the two-dimensional models of landslide profile, geo Studio software is used to simulate the landslide stability distribution of different combinations of reservoir water level and rainfall; at the same time, a three-dimensional model is established according to the finite element software ABAQUS to analyze the fluid solid interaction. The results show that: under the combined action of reservoir water level drop and rainfall conditions, the landslide will aggravate the deformation, and increase the overall displacement. There is the possibility of local instability when encountering the most unfavorable working conditions. However, because the soil mass at the front edge of the landslide is medium strong permeable, which is conducive to groundwater seepage, the overall displacement of the landslide changes little, and no plastic through zone is observed. It is still in a stable state.

Keywords: landslide; stability; rainfall; reservoir water level; fluid solid coupling

[责任编辑: 裴 琴]