

文章编号: 1001-4888(2019)05-0767-08

粒化高炉矿渣粉替代量对偏高岭土地质聚合物力学性能及凝结时间影响的研究^{*}

马国伟, 王德华, 钟惟亮, 范立峰

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100024)

摘要: 偏高岭土地质聚合物在常温养护下具有抗压强度低、凝结时间长等缺点。本文使用 GGBS(粒化高炉矿渣粉)等质量替代偏高岭土, 研究常温养护下不同 GGBS 替代量对偏高岭土地质聚合物抗压强度和凝结时间的影响。本研究首先通过测试不同水玻璃模数对偏高岭土地质聚合物抗压强度的影响, 确定了最佳水玻璃模数; 然后, 控制最佳水玻璃模数不变, 通过测试偏高岭土地质聚合物的凝结时间和抗压强度, 确定了 GGBS 的最佳替代量范围。研究表明, GGBS 等质量替代偏高岭土可以缩短地质聚合物的凝结时间, 还可以大幅度增加其抗压强度。本文确定了水玻璃的最佳模数为 1.3, 在此基础上的 GGBS 最佳替代量为 20% 至 30%。

关键词: GGBS; 地质聚合物; 抗压强度; 凝结时间

中图分类号: TU528.41

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-071

0 引言

偏高岭土地质聚合物(Geopolymer)是一种由偏高岭土和碱性激发剂经过适当工艺处理得到的新型工业建筑材料。其凝结硬化分为解聚过程和缩聚过程, 在碱激发条件下, 硅铝酸盐的硅氧键和铝氧键首先发生断裂, 形成低聚硅铝四面体, 然后低聚硅铝酸盐以水为介质, 重新组合, 排出多余的水, 生成新的 Si-O-Al 网络结构体系。在高温养护下偏高岭土中的硅和铝活性升高, 导致其具有快硬早强的特点, 其 28 天抗压强度可以达到 80MPa 以上^[1], 因此可被用于预制构件的批量生产当中。然而, 高温养护条件限制了地质聚合物在施工现场中的制备和使用, 且地质聚合物基体内部存有大量细小气泡和孔隙。综上所述, 研究如何提高常温下偏高岭土的硅铝活性, 并降低偏高岭土地质聚合物的孔隙率, 最终提高偏高岭土地质聚合物的强度并缩短其凝结硬化时间, 具有重要意义。

目前, 国内外学者对偏高岭土地质聚合物的物理力学性能以及化学组成成分进行了很多研究。郑娟荣等^[1]对地聚物的发展和应用前景做了详细阐述, 地质聚合物材料相较于普通水泥基材料具有强度高、凝结硬化快和耐高温等优点, 所需原材均为工业废料或环境污染物, 因此, 应用前景广阔。杨南如^[2]从机理上分析了碱-胶凝材料形成的物理化学基础。Hemra 等^[3]和窦立岩等^[4]分别从热稳定性和宏观脆性角度对偏高岭土地质聚合物进行改性研究。张云升等^[5]基于三维孔隙管颈结构模拟, 模拟了偏高岭土地质聚合物浆料的孔隙率、连通性、渗透性以及曲折度等孔隙特征, 研究表明偏高岭土地质聚合物基体内部存在大量细小孔隙, 而非密实状态, 因此导致其抗压强度降低。Lloyd 等^[6]探讨了 GGBS 成分中, Ca 元素对 Si-O-Al 网络体系的作用, 研究表明 GGBS 中 Ca 元素可替代 Si-O-Al 网络

^{*} 收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-06-29

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器项目(51627812)资助

通讯作者: 马国伟(1968—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 新型建筑材料、智慧基础设施等。Email: guowei.ma@uwa.edu.au

体系中的 Si 元素,形成更加致密的结构,宏观上降低了偏高岭土地质聚合物的孔隙率。此外,养护条件对偏高岭土地质聚合物的凝结时间和抗压强度有所影响。陶文宏等^[7]研究了常温养护下偏高岭土煅烧温度、碱含量以及水玻璃模数对地质聚合物抗压强度和凝结时间的影响,结果表明,常温养护下,偏高岭土地质聚合物强度低于 50MPa,且终凝时间大于 3 小时。彭晖等^[8]研究了高温养护下不同对比对偏高岭土地质聚合物力学性能和凝结时间的影响,研究表明,高温养护(养护温度为 60℃)下,地质聚合物的抗压强度达到 60MPa 以上,对应的终凝时间低于 30 分钟。简家成等^[9]研究了高温养护下地质聚合物的物理性能和化学性能,地质聚合物具有强度高、凝结硬化快、耐高温、固定金属离子性能强等优点。崔潮等^[10,11]等研究了偏高岭土-矿渣地质聚合物升温条件下粘结剂粘结性能的变化趋势。众多研究表明,GBS 中硅铝活性较高,且其中的 Ca 元素可替代 Si 元素形成更加致密的结构体系。偏高岭土地质聚合物虽然具有广阔的应用前景,然而养护条件是制约其应用的主要因素之一。因此研究如何提高常温养护下偏高岭土地质聚合物的抗压强度并缩短其凝结时间具有重要意义。

为在常温养护条件下提高偏高岭土地质聚合物的物理力学性能,并且缩短其凝结时间,本文首先通过测试不同水玻璃模数下偏高岭土地质聚合物的抗压强度确定了最佳水玻璃模数,然后以 GGBS(粒化高炉矿渣粉)等质量替代偏高岭土,提高偏高岭土粉体中硅铝活性的同时,降低偏高岭土地质聚合物浆体的孔隙率,分别测试不同替代量下偏高岭土地质聚合物的凝结时间和抗压强度,确定最佳替代量范围。

1 实验原料、仪器和方法

1.1 实验原料

本文采用产自河南焦作的偏高岭土(如图 1 所示)。参考彭辉等人的研究^[8],偏高岭土由高岭土充分研磨后,经 100 目标准检验筛筛分,并在 800℃ 条件下煅烧 4h,冷却至室温后得到偏高岭土。偏高岭土详细参数见表 1。



图 1 偏高岭土
Fig. 1 Metakaolin

表 1 偏高岭土物理参数
Tab. 1 Physical parameters of metakaolin

项目	指标要求/%	检测结果
200 目筛余量	≤0.6	0.43
氧化铝	≥40	43.2
二氧化硅	≥48	49.1
氧化钠+氧化钾	≤1.0	0.57
活性指数(28d 天)	≥105	107

本文替代偏高岭土所使用的 GGBS 级别为 S140(如图 2 所示),其比表面积为 800, 7 天活性为 110, 28 天活性为 140。

采用模数为 3.2 的工业水玻璃配制低模数水玻璃,其氧化钠含量为 8.5%。配制低模数水玻璃所使用的工业片碱纯度为 99%。

1.2 实验仪器

配置低模数水玻璃所使用的仪器设备包括,电子天平秤(精度 0.1g)、烧杯、玻璃棒以及水浴盆等。使用 JJ-5 行星式实验室 5 升水泥砂浆搅拌机(如图 3 所示)对低模数水玻璃与偏高岭土(或偏高岭土和 GGBS 混合物)进行搅拌,搅拌机转速为 140r/min。



图 2 GGBS(粒化高炉矿渣粉)
Fig. 2 Granulated blast furnace slag



图 3 搅拌机
Fig. 3 Blender

由于研究对象不参加粗骨料,所以参考建筑砂浆基本性能试验方法标准 JGJ/T70—2009^[13],准备 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的三联钢模具,用以制作标准抗压试件。试件在标准恒温恒湿养护箱内进行养护,养护温度为 20℃±2℃,保持相对湿度 95%。使用维卡仪(如图 4 所示)测定偏高岭土地质聚合物的凝结时间。

本研究的力学性能测试在北京工业大学力学实验中心开展,使用最大压力为 1000kN 的 CSS 电子万能试验机(如图 5 所示)测试试件的抗压性能。采用位移控制加载模式,加载速率为 0.5mm/min。



图 4 维卡仪
Fig. 4 Vicat apparatus



图 5 电子万能试验机
Fig. 5 Electronic universal testing machine

1.3 实验方法

1.3.1 抗压强度测试

首先,制作低模数的水玻璃(即碱性激发剂)。
水玻璃模数调节的方法是掺入一定质量的氢氧化钠,处于实验安全考虑,将片碱溶于水中配成 8.0 mol/L 的氢氧化钠溶液,使用水浴快速将氢氧化钠溶液冷却至室温。
根据公式(1)计算得到配制不同低模数水玻璃所需氢氧化钠固体质量,按照氢氧化钠固体质量不变的原则换算成 8.0mol/L 氢氧化钠溶液的质量并称取。将称取的 8.0mol/L 氢氧化钠溶液溶于高模数的工业水玻璃中得到低模数水玻璃。本实验中将模数为 3.2 的工业水玻璃,分别配置成模数为 1.0, 1.3, 1.6 和 1.9 的低模数水玻璃。

$$G = \frac{(M_1 - M_0) \times N \times G_1}{M_0 \times P} \times 1.29 \quad (1)$$

式中, G 为加入氢氧化钠的质量; G_1 为高模数水玻璃的质量; M_1 为高模数水玻璃的模数; M_0 为欲配置水玻璃的模数; N 为高模数水玻璃中氧化钠的含量; P 为加入的氢氧化钠的纯度。

然后将已配置的低模数水玻璃与偏高岭土(或偏高岭土和 GGBS 混合物)进行搅拌,水胶比为 1:2。为使搅拌均匀,先将称好的偏高岭土(或偏高岭土和 GGBS 混合物)单独搅拌两分钟,然后在接下来的两分钟内将低模数水玻璃缓慢倒入搅拌机内,再匀速搅拌两分钟得到偏高岭土地质聚合物胶体。将所得到的胶体倒入 70.7mm×70.7mm×70.7mm 的三联模具中,将三联模与所得胶体一同放在振动台上振捣,振动时保证模具不跳动,振动 5 至 10 秒或持续到表面没有明显气泡为止。振实后将装有胶体的试模放在温度为 20℃±2℃、相对湿度为 95% 的养护箱内进行养护。试件 24 小时后脱模,并将试块重新放入养护箱内养护,经 7 天、28 天养护后,分别得到不同养护期龄的立方体抗压试件。

脱模后,试件如图 6 所示。试件表面光滑,无明显分层现象,表面孔隙直径小,呈现橙红色。随着 GGBS 替代量的增加,颜色逐渐由橙红色向墨绿色转变,试件密度逐渐增大(见表 2)。

表 2 地质聚合物密度

Tab. 2 Density of geopolymer

GGBS 替代量/%	0	10	20	30
密度/(kg/m ³)	2460.8	2488.0	2502.0	2525.6

1.3.2 凝结时间测试

制作低模数水玻璃和搅拌方法同上。测定凝结时间时,将搅拌好的浆体倒入维卡仪模具中,当初凝试针沉至距底板 4mm±1mm 时^[14],判定其达到初凝状态;当终凝试针沉入试件 0.5mm 时,即环形附件开始不能在试件上留下痕迹时,判定其达到终凝状态。



图 6 试件

Fig. 6 Specimen

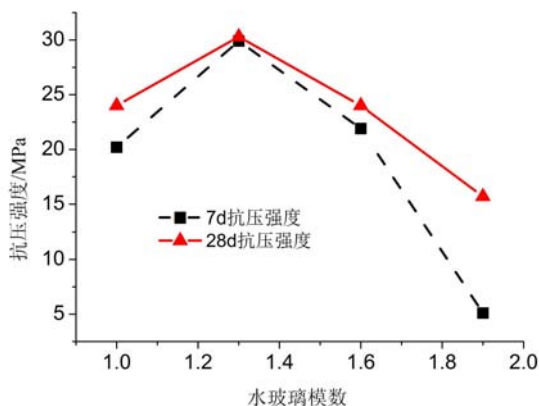


图 7 强度变化曲线

Fig. 7 Strength variation curve

2 实验结果

2.1 抗压强度

本文分别测试水玻璃模数为 1.0, 1.3, 1.6 和 1.9 时偏高岭土地质聚合物 7 天和 28 天的抗压强度,根据 28 天抗压强度以及 7 天以后抗压强度上升幅度确定最优水玻璃模数,实验结果见表 3。为确定最佳水玻璃模数,绘制 7 天和 28 天抗压强度随水玻璃模数变化的曲线如图 7 所示。

首先,地聚物的合成需要进行一个解聚的过程,即在碱激发条件下,硅铝酸盐的硅氧键和铝氧键断裂,形成低聚硅铝四面体;然后再进行一个缩聚过程,即低聚硅铝酸盐以水为介质,重新组合,排出多余的水,生成新的 Si-O-Al 的网络结构体系。水玻璃为地质聚合物的形成提供一种碱性环境,水玻璃的模数越低其碱性越强。

表 3 不同水玻璃模数下地质聚合物的抗压强度

Tab. 3 Compressive strength of geopolymer under different water glass modulus

水玻璃模数	1.0	1.3	1.6	1.9
7 天抗压强度/MPa	20.2	29.9	21.9	5.1
28 天抗压强度/MPa	24.0	30.3	24.0	15.7

如图 7 所示,水玻璃模数小于 1.3 时,地聚物抗压强度随水玻璃模数的增加而升高。当水玻璃模数为 1.3 时抗压强度最高,28 天抗压强度与 7 天抗压强度相比,增幅较小,说明当水玻璃模数为 1.3 时强度上升最快且反应彻底。当水玻璃模数大于 1.3 时,地聚物抗压强度随水玻璃模数的增加而降低,说明水玻璃模数过高对其强度的增长有抑制作用。水玻璃模数由加入的氢氧化钠固体质量所决定,因此其反映的客观物理意义是碱性环境的强弱。水玻璃的模数越低其碱性越强,因此碱性环境在一定程度上可以促进地质聚合物的反应生成,但当碱性环境过强时则会抑制反应的发生。

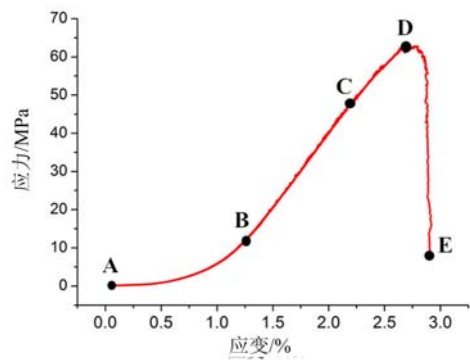


图 8 应力—应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curve

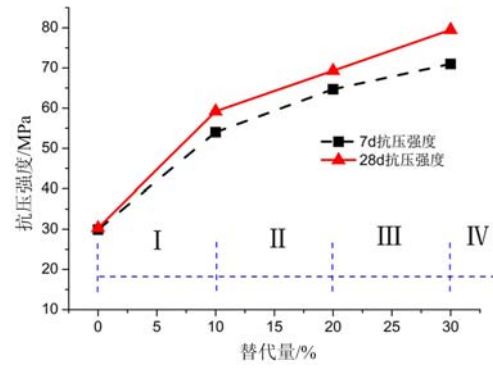


图 9 强度变化曲线
Fig. 9 Strength variation curve

由抗压强度测试结果得出,最佳水玻璃模数为 1.3。为得到在常温养护条件下,偏高岭土地质聚合物早强、高强的特性,控制水玻璃模数为 1.3,使用 GGBS 等质量替代偏高岭土。本文分别采用 0%, 10%, 20% 和 30% 的 GGBS 替代偏高岭土,并测试其 7 天和 28 天抗压强度。实验结果见表 4,根据位移荷载曲线处理得到偏高岭土地质聚合物的应力—应变曲线如图 8 所示,其抗压强度随替代量变化的曲线如图 9 所示。

表 4 不同 GGBS 替代量下地质聚合物的抗压强度

Tab. 4 Compressive strength of geopolymer under different GGBS substitution

GGBS 替代量/%	0	10	20	30
7 天抗压强度/MPa	29.9	54.0	64.7	71.0
28 天抗压强度/MPa	30.3	59.2	69.3	79.5

从宏观角度讲,GGBS 粉末粒径小于偏高岭土,比表面积比偏高岭土大。当掺入 GGBS 后其粉状基体与水玻璃胶体接触更充分,使得其反应更迅速更彻底,因此可大幅度减少凝结时间。由于 GGBS 粉末粒径小,对偏高岭土粉状基体形成填充效果,使得搅拌后的偏高岭土地质聚合物胶体更加致密,从而提高其抗压强度。从微观角度讲,GGBS 粉末中硅铝含量和活性高,可加速常温养护下偏高岭土与碱激发剂的反应速率,且 GGBS 中所含 Ca 元素可替代 Si-O-Al 网络结构体系中的 Si 元素^[6],形成更加致密的结构体系,降低偏高岭土地质聚合物的孔隙率,提高偏高岭土地质聚合物的抗压强度。

如图 8 所示,经 GGBS 改性之后,偏高岭土地质聚合物的应力—应变曲线与素混凝土的应力—应变曲线略有不同^[12],可分为四个阶段,即压密阶段(A 点到 B 点)、线弹性阶段(B 点到 C 点)、非线性上升阶段(C 点到 D 点)和破坏阶段(D 点到 E 点)。地质聚合物搅拌后呈现胶体状态,本身粘性较大,

相比于混凝土,其振捣过程中大量细小的气泡很难排除基体,这就导致其基体内部存在很多细小的气泡,因此受到载荷时,会出现压密阶段,且压密阶段比混凝土长。当其压密后呈现线弹性状态。GGBS 的添加可以有效地提高常温养护下偏高岭土地质聚合物的抗压强度(即区域 I, II, III)。但由于添加 GGBS 使得其凝结时间大幅度缩短,当替代量超过 30% 时(即区域 IV),不利于地聚物的搅拌和装模。因此综合考虑强度提高的效果以及实际应用,区域 II 和区域 III 为理想替代量。

2.2 凝结时间

为得到在常温养护条件下,偏高岭土地质聚合物快凝的特性,控制水玻璃模数为 1.3,使用 GGBS 等质量替代偏高岭土。本文分别采用 0%, 10%, 20% 和 30% 的 GGBS 替代偏高岭土,并测试其初凝时间和终凝时间。不同 GGBS 替代量下初凝时间和终凝时间见表 5,实验结果如图 10 所示。

表 5 不同 GGBS 替代量下地质聚合物的凝结时间

Tab. 5 Condensation time of geopolymer under different GGBS substitution

GGBS 替代量/%	0	10	20	30
初凝时间/min	191	57	27	19
终凝时间/min	261	80	35	24

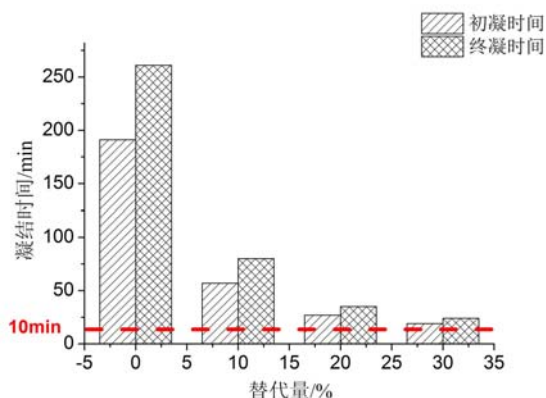


图 10 凝结时间变化图

Fig. 10 Change of condensation time

由图 10 可知,GGBS 的替代可以大幅度缩短偏高岭土地质聚合物在常温养护下的凝结时间。但是,当替代所使用的 GGBS 超过 30% 时,粘附在搅拌叶片上的地聚物因其搅拌充分首先发生凝结硬化反应,导致搅拌叶片周围的地质聚合物十分粘稠,搅拌机功率无法带动搅拌叶片继续工作,因此极限替代量为 30%。

综上所述,以 GGBS 等质量替代偏高岭土得到的偏高岭土地质聚合物具有快硬早强的特点,可以实现部分养护抢修工程,这类工程常常以及时修复小损小坏、保持房屋、道路或建筑物原来完损等级为目的。由于其拌合原材料均可提前制备,因此尽量采用现场搅拌、现场使用的

施工方法。可根据不同抢修工程对强度和凝结时间的要求选择 GGBS 的替代量,如机场跑道修复工程,为保证飞机的正常起降,当其跑道发现损坏后需要在极短时间内对其进行修复,对修复材料的凝结时间和强度要求较高,因此可选择使用 20%~30% 的替代量。而当抢修工程需要较大体积铺设地质聚合物,且对抗压强度要求不高时,由于铺设所使用的时间较长,建议可以采用 10%~20% 的替代量。

3 结论

本文开展了偏高岭土地质聚合物在常温养护下的改性研究,方法是使用 GGBS 等质量替代偏高岭土,并通过测试其凝结硬化性能,确定适用于抢修工程中的最佳水玻璃模数以及最佳替代量。具体结论如下:

- (1) 水玻璃模数为 1.3 时,偏高岭土地质聚合物抗压强度最高;
- (2) GGBS 等质量替代偏高岭土可以有效提高常温养护下地质聚合物的抗压强度,可以达到部分抢修工程对强度的要求;
- (3) GGBS 等质量替代偏高岭土可以有效缩短常温养护条件下偏高岭土地质聚合物的凝结时间,可以满足抢修工程中对材料快硬早强特性的需求;
- (4) 当水玻璃模数为 1.3、GGBS 替代量为 20% 至 30% 之间时,可以有效提高偏高岭土地质聚合物的物理力学性能,同时大幅度缩短其凝结时间。当抢修工程需要大体积地铺设地质聚合物且对其

抗压强度要求不高时,可以选择10%~20%的GGBS替代量。

本文结果可为地质聚合物向工程应用的推广提供设计参考依据。

参考文献:

- [1] 郑娟荣,覃维祖. 地聚物材料的研究进展[J]. 新型建筑材料, 2002(4):11—12 (ZHENG Juanrong, TAN Weizu. Recent progress of geopolymeric materials[J]. New Building Materials, 2002(4):11—12 (in Chinese))
- [2] 杨南如. 碱-胶凝材料形成的物理化学基础[J]. 硅酸盐学报, 1996, 24(4):459—465 (YANG Nanru. Physical chemistry basis for the formation of alkaline cementitious material[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1996, 24(4):459—465 (in Chinese))
- [3] Hemra K, Aungkavattana P. Effect of cordierite addition on compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer[J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(3):1021—1026.
- [4] 窦立岩,汪丽梅. 地聚物改性研究进展[J]. 山东化工, 2017, 46(8):61—63 (DOU Liyan, WANG Limei. Progress on geopolymer modification[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(8):61—63 (in Chinese))
- [5] Zhang Yunsheng, Zhang Wenhua, Sun Wei, et al. Preparation of metakaolin based geopolymer and its three-dimensional pore structural characterization[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2015, 30(3): 550—555.
- [6] Lloyd R R, Provis J L, Deventer J S J V. Pore solution composition and alkali diffusion in inorganic polymer cement[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(9):1386—1392.
- [7] 陶文宏,付兴华,孙凤金,等. 地聚物胶凝材料性能与聚合机理的研究[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(4):730—735 (TAO Wenhong, FU Xinghua, SUN Fengjin, et al. Studies on properties and mechanism of geopolymer cementitious material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(4):730—735 (in Chinese))
- [8] 彭晖,李树霖,蔡春声,等. 偏高岭土地质聚合物的配合比及养护条件对其力学性能及凝结时间的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11):2809—2817 (PENG Hui, LI Shulin, CAI Chunsheng, et al. Study on effect of mix and curing conditions on the mechanical properties and setting time of metakaolin based geopolymer[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(11):2809—2817 (in Chinese))
- [9] 简家成,刘峥,杨宏斌,等. 地聚物胶凝材料制备及应用研究现状[J]. 矿产综合利用, 2014(3):18—22 (JIAN Jiacheng, LIU Zheng, YANG Hongbin, et al. Research on preparation and application status of geopolymers[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(3):18—22 (in Chinese))
- [10] 崔潮,肖斌,张建仁,等. 偏高岭土-矿渣基地聚物与花岗岩骨料界面的分布特性及影响[J]. 复合材料学报, 2017(11):2605—2613 (CUI Chao, XIAO Bin, ZHANG Jianren, et al. Research on distribution and factors of interfacial transition zone between metakaolin-slag-based geopolymer and granite aggregate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017(11):2605—2613 (in Chinese))
- [11] 崔潮,赵建伟,李树霖,等. 升温条件下偏高岭土地质聚合物粘结剂的粘结性能研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):429—437 (CUI Chao, ZHAO Jianwei, LI Shulin, et al. On the bonding performance of metakaolin-based geopolymer adhesive under heating condition[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):429—437 (in Chinese))
- [12] 晏小欢,任晓丹,李杰. 混凝土单轴受压全过程变异性试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 664—670 (YAN Xiaohuan, REN Xiaodan, LI Jie. Experimental study of full process variability of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(5):664—670 (in Chinese))
- [13] JGJ/T70—2009, 建筑砂浆基本性能试验方法标准[S]. 北京:中华人民共和国建设部, 2009 (JGJ/T70—2009, Standard for test method of performance building mortar[S]. China:Ministry of Construction People's Republic of China, 2009 (in Chinese))
- [14] GB/T 1346—2011, 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2011 (GB/T 1346—2011, Test methods for water requirement of normal consistency, setting time and soundness of the portland cement[S]. China:Standards Press of China, 2011 (in Chinese))

The effects of GGBS and Modulus of water glass on the hardening behavior of metakaolin based geopolymer under normal temperature curing

MA Guo-wei, WANG De-hua, ZHONG Wei-liang, FAN Li-feng

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

Abstract: Metakaolin-based geopolymers have the disadvantages of low compressive strength and long setting time under room temperature curing. In the present study, GGBS (Ground granulated blastfurnace slag) was utilized to replace the metakaolin, and the effect of different GGBS replacements on the compressive strength and setting time of the geopolymer under normal temperature curing was investigated. The optimal modulus of water glass was determined at first by testing the effect of different modulus of water glass on the compressive strength of metakaolin-based geopolymer. Then, keeping the optimal modulus of water glass unchanged, the optimal range of replacement for GGBS was determined by testing the setting time and compressive strength of metakaolin-based geopolymers. The results show that GGBS can decrease the curing period and significantly increase the compressive strength of the geopolymers. The optimal modulus of water glass is 1.3, and the optimal range of GGBS is 20% to 30%.

Keywords: GGBS; geopolymer; compressive strength; setting time