

文章编号:1001-4888(2015)03-0367-06

# GGBS 及其激发剂固化合肥湖积软土的试验研究<sup>\*</sup>

邵艳, 邢维忠, 魏源

(安徽建筑大学 土木工程系, 安徽合肥 230601)

**摘要:** 将 CaO 和石膏作为激发剂掺入粒化高炉矿渣微粉(GGBS)制备 GGBS+CaO+石膏固化黏土,通过无侧限抗压强度试验研究固化黏土的强度变化规律,基于正交试验确定 GGBS、CaO 和石膏三掺量的最佳配合比。研究表明:单掺 GGBS 对软土有一定的固化效果,但固化速度慢、效果差;将 CaO、石膏和 GGBS 混合后固化效果明显,固化土 3d(天)即可形成一定强度。养护 28d 后,固化黏土最大强度可以达到 2.9MPa;利用极差分析得出石膏掺量变化对抗压强度的影响最大,GGBS 次之,CaO 影响最小;GGBS、CaO 和石膏三掺量固化黏土最佳配合比分别为 11%、3.5%和 5%。上述研究成果为在合肥滨湖地区应用矿渣类软土固化剂提供了理论依据。

**关键词:** 粒化高炉矿渣微粉(GGBS);氧化钙(CaO);石膏;无侧限抗压强度;正交试验;极差分析

中图分类号: TU411

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-018

## 0 引言

合肥滨湖地区位于巢湖北侧,广泛分布着河湖相软土层,其软土以淤泥质黏土为主。具有含水量高、承载力低、沉降变形大等特点,不利于滨湖地区城市建设<sup>[1]</sup>。目前工程中主要采用以水泥为主的固化剂对软土进行改良。通过水泥与软土之间发生的水化、硬凝、离子交换等物理化学反应<sup>[2]</sup>,使软土形成具有较高稳定性和强度的固化土。并且在此基础上开发了多种水泥系软土固化剂<sup>[3,4]</sup>,使水泥固化软土的效果得到显著提高。在水泥系软土固化剂得到广泛应用的同时也存在着一些问题,水泥在生产的过程中会消耗大量的能量和资源并排出粉尘、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 以及氮氧化物、氟气等有毒气体,环境污染严重,资源消耗量大,成本高。

粒化高炉矿渣微粉(GGBS, ground granulated blast furnace slag),是高炉冶铁过程中排出的以硅酸盐和铝酸盐为主的物质。它是一种具有潜在活性的物质,矿渣的水化产物与水泥相同,主要为具有胶结作用的水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CAH),可以作为固化剂加入到土中。张大捷等<sup>[5]</sup>使用矿渣胶凝材料固化黏土,并与水泥、石灰进行对比,试验发现:矿渣胶凝材料固化效果好于水泥和石灰,掺量为 9%的矿渣固化土 28d(天)强度要高于 15%的水泥固化土。单独将矿渣作为改良剂使用时,其潜在的水硬性会被抑制,水化反应十分缓慢,需要掺入适量硫酸盐或碱类作为激发剂促使水化反应的进行,易耀林等<sup>[6]</sup>等采用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、NaOH 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 作为激发剂加入矿渣和电石渣混合物中固化软土,试验证明矿渣中加入一定的碱性激发剂作为软土固化剂可以有效地提高软土强度。但是,掺入氢氧化钠(NaOH)强碱激发剂,会造成凝结速度过快、碱集料反应、收缩和风化等问题。然而,关于 GGBS、CaO 和石膏方面的研究还鲜有报道。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-01-30; 修回日期: 2015-03-15

基金项目: 安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2012A061)

通讯作者: 邵艳(1965—),女,副教授,主要从事岩土力学和工程地质等方面的教学与科研工作。Email: shaoyan@ahjzu.edu.cn

本文将采用 CaO 和石膏作为激发剂掺入 GGBS 固化黏土,通过无侧限抗压强度试验研究固化土的强度变化规律,基于正交试验研究 GGBS、CaO 和石膏三掺量的最佳配合比,利用极差分析各掺量变化对抗压强度的影响。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验所用土取自滨湖地区某工程地基软土,塑限为 23.50%,液限为 37.4%,天然含水率 32.51%,天然密度约为  $1.9\text{g}/\text{cm}^3$ ,压缩系数约为  $0.85\text{MPa}^{-1}$ ,孔隙比为 1.14。配合比试验采用粉状干土,将固化剂与土加入水搅拌,加固土含水率取天然含水率 32.51%。固化剂(GGBS)取自合肥市日月水泥厂,其主要化学成分如表 1 所示。CaO 是取自天津博迪华工股份有限公司生产的化学用 CaO,纯净度很高,CaO 灼烧后含量不少于 98%。石膏采用的是常用的建筑石膏,呈白色粉状,属于 b 型半水石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ )。

表 1 GGBS 化学成分表

Tab. 1 Chemical composition of GGBS

| 化学组成(%) | CaO | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | SO <sub>3</sub> | MnO  |
|---------|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----------------|------|
| 所占比例    | 38  | 33.5             | 11.1                           | 4.3                            | 4   | 0.01            | 0.08 |

### 1.2 试样制备与试验方法

试样的制备与养护:(1)将取回的软土放置于 105℃烘箱中烘至恒重;(2)将干土磨碎并过 2mm 的筛;(3)将过筛的干土、GGBS、CaO 和石膏按比例放入搅拌机中搅拌均匀并加入水,制成固化土混合料;(4)将三瓣模洗净,内壁上涂满凡士林并放置在塑料膜上防止水分流失;(5)将固化土混合料分层击实,每层的表面凿毛;(6)试样完成后在三瓣模的两端盖上玻璃片防止水分蒸发;(7)将试样静置一天后脱模取出放置于不透气的保鲜袋内密封;(8)将试样编号后放置于水中养护,直至养护龄期取出进行试验<sup>[7]</sup>。

当试样养护到预定的龄期后取出进行如下试验:(1)测量试样的直径、高度和质量;(2)利用 GDS 进行无侧限抗压强度试验,GDS 三轴试验仪是英国欧美大地生产的高级自动三轴仪,其中的“Unconfined compressive”模块可以进行无侧限抗压强度试验,试验结果会以图形以及 EXCEL 的形式保存;(3)重复试验并取平均值作为试验结果记录下来;(4)对试验结果进行分析,并得出结论。

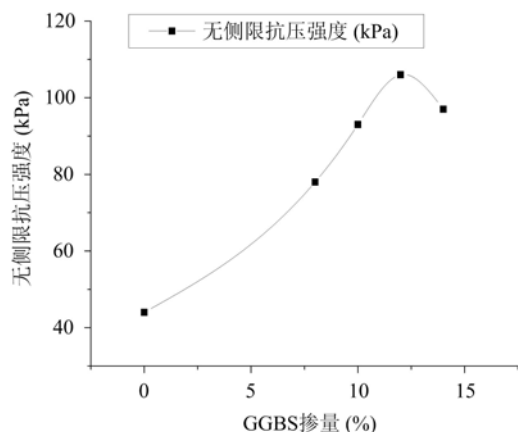


图 1 单掺 GGBS 后的无侧限抗压强度

Fig. 1 The unconfined compressive strength of single GGBS doped

## 2 试验设计

### 2.1 GGBS 单掺试验

GBSS 是具有潜在活性的物质,与水泥一样可以水化产生胶凝物质和膨胀性水化物,可以用于固化软土。首先,单独采用 GGBS 与软土混合进行初步试验,分析只加入 GGBS 的情况下对软土的固化效果。GGBS 掺入比为(0%、8%、12%、14%),养护 7d 后进行无侧限抗压强度试验,试验结果如图 1 所示。

由图 1 可知:GGBS 可以提高软土的抗压强度并且在掺量为 12% 时达到峰值,但是固化效果差,试样养护 7d 后抗压强度提高到 107kPa,与原状土相比仅提高了 60kPa。这是因为 GGBS 中存在着

以 Si-O 为主形成的硅氧四面体,而 GGBS 的水化则是破坏玻璃体中的 Si-O。当在固化土中只添加 GGBS 时,矿渣的水化主要依赖水中电离出来的  $\text{H}^+$  和 GGBS 内的  $\text{Ca}^{2+}$  的置换反应,随着  $\text{H}^+$  的消耗水中的 pH 值随之升高,当 pH 达到一定程度时破坏 GGBS 内部 Si-O 结构,促进水化的进行。但是这种

置换反应十分缓慢,导致 GGBS 单掺试样养护 7d 后,土体中不能生成足够多的水化物,对土体的强化十分有限<sup>[8]</sup>。

2.2 激发剂掺量选择

将 CaO 和石膏与软土混合进行单掺试验<sup>[9]</sup>,分析 CaO 和石膏各单掺时对软土强度的影响,以确定试验配比的范围。CaO(掺入比为 2%、3%、4%、5%)和石膏(掺入比为 2%、3%、4%、5%),养护 7d 后进行无侧限抗压强度试验。单掺试验结果如图 2、图 3 所示。

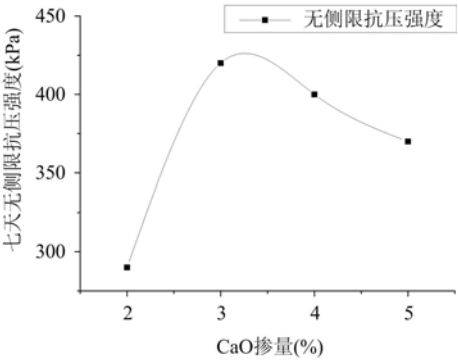


图 2 单掺 CaO 后的无侧限抗压强度  
Fig. 2 The unconfined compressive strength of single CaO doped

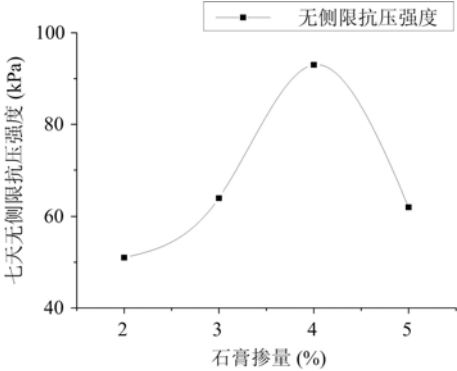


图 3 单掺石膏后的无侧限抗压强度  
Fig. 3 The unconfined compressive strength of single gypsum doped

如图 2、图 3 所示:向软土中加入 CaO 和石膏可以提高土体强度,其中 CaO 固化效果十分明显,当 CaO 掺入量达到 3% 时达到强度最大值。CaO 加入土中即和水反应生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,生成的  $\text{OH}^-$  与黏土矿物土中的 Al 和 Si 反应生成胶凝性水化物,这种反应速度快,土体可以很快形成强度。单掺石膏时固化效果差,养护 7d 后最大强度仅为 100kPa,这是因为石膏在单掺的情况下水化速度缓慢,养护 7d 不足以生成足够的水化物,当石膏在掺量为 4% 时强度达到峰值。

2.3 正交试验表

考虑上述单掺试验得出的结论,以及三种材料混合后 CaO 与石膏对矿粉的激发作用,以无侧限抗压强度为标准,采用正交试验分析石膏、CaO、GGBS 的最佳配合比。GGBS 掺量取 8%、11%、14%; CaO 掺量取 2%、3.5%、5%;石膏掺量为 2%、3.5%、5%,属于三因素三水平试验<sup>[10]</sup>。采用 SPSS 分析软件,编制出正交表如表 2 所示。选取具有代表性的组合进行试验,找出最佳配合比。

表 2 三因素三水平正交表  
Tab. 2 Three factors and three levels orthogonal table

| 试验编号 | GGBS 掺量 (%) | CaO 掺量 (%) | 石膏掺量 (%) |
|------|-------------|------------|----------|
| 1    | 14          | 5          | 2        |
| 2    | 8           | 3.5        | 5        |
| 3    | 14          | 2          | 5        |
| 4    | 8           | 5          | 3.5      |
| 5    | 11          | 5          | 5        |
| 6    | 14          | 3.5        | 3.5      |
| 7    | 11          | 3.5        | 2        |
| 8    | 11          | 2          | 3.5      |
| 9    | 8           | 2          | 2        |

### 3 试验结果与分析

图 4 为正交试验后不同龄期固化土的无侧限抗压强度。从图中可知,以 GGBS 为主剂,CaO、石膏为激发剂的软土固化剂可以极大提高软土的强度。在固化初期土体强度增长很快,固化土 3d 无侧限抗压强度一般可达到 28d 的 40%~50%,随后强度增长速度有所减缓,其中 11%、5%、5% 配比的固化土 28d 无侧限抗压强度可以达到 2.9MPa。

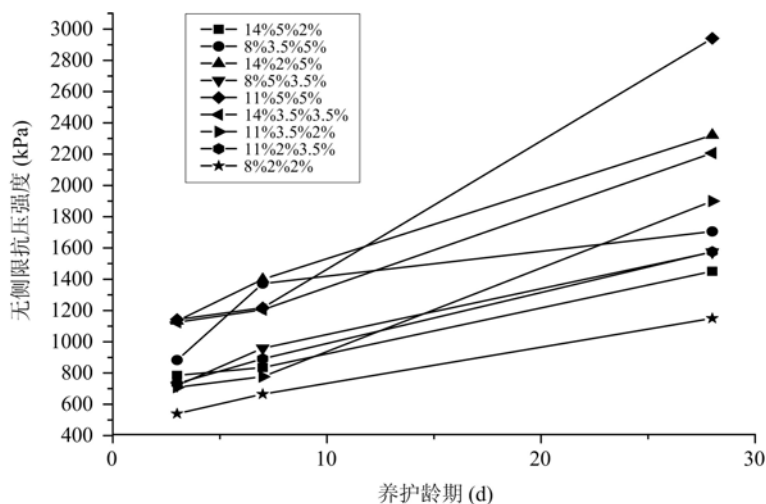


图 4 固化土的无侧限抗压强度曲线

Fig. 4 Unconfined compressive strength curves of stabilized soil

与图 1 单掺 GGBS 试验相比掺入激发剂固化土在养护初期就可以形成一定强度,加快了 GGBS 的水化。这是因为在 GGBS 和软土混合料中加入 CaO 时,CaO 遇水生成  $\text{OH}^-$ ,矿渣玻璃体表面的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{OH}^-$  反应生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  使玻璃体表面破坏,随后  $\text{Ca}^{2+}$  与 Si-O 上的其它离子进行置换从而彻底破坏玻璃体结构,最后  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与玻璃体破坏后生成的  $\text{SiO}_2$  反应生成胶凝性材料如 CSH 和 CAH,将土体中松散的颗粒胶结在一起形成一个稳定的具有一定强度的整体,从而提高软土强度。向 GGBS 和软土混合料中加入石膏时,石膏中的  $\text{SO}_4^{2-}$  渗透进入玻璃体中,打乱了玻璃体内结构的平衡,使玻璃体解体,促进了 GGBS 的水化,并生成水化物 CSH 和 CAH,然后激发剂中的  $\text{SO}_4^{2-}$  与 CAH 反应生成钙矾石。钙矾石是一种膨胀性水化物,在生成的过程中体积会增大 1.2 倍,填充软土中的孔隙,使土体更加致密。另一方面,钙矾石是一种针状结晶,这种结晶相互交叉形成网状空间结构进一步提高了土体强度<sup>[11-14]</sup>。

对上述正交试验结果进行极差分析,结果如表 3 所示。其中 K1、K2、K3 分别为各水平相应的三次无侧限抗压强度之和及其平均值。R1、R2、R3 分别为不同龄期的极差,其数值为 K1、K2、K3 中的最大值减去最小值,它可以用来衡量试验中各因素影响大小。极差大的因素,说明其三个水平对强度的影响大,是重要因素,极差小则往往代表次要因素。

由表 3 可以看出 3d、7d、28d 无侧限抗压强度的极差均为石膏>GGBS>CaO,说明石膏掺量的变化对固化黏土强度影响最大,固化黏土养护 28d 后,随着石膏掺量的增加,强度平均值也随之增大,强度平均值极差可达到 823kPa,掺量为 5% 时平均强度最大;GGBS 影响对强度的影响次之,随着掺量的变化平均强度先增大后减小,当 GGBS 为 11% 时强度达到最大值;CaO 对强度影响最小,平均强度随着掺量的增加而增加,但是 CaO 掺量从 3.5% 增长到 5% 时,强度仅仅增长了 51kPa,对固化黏土强度影响不大。因此,考虑矿渣类固化剂的经济性和实用性,GGBS、CaO、石膏掺量最佳配合比为 11%、3.5%、5%。

表 3 极差分析表  
Tab. 3 Range analysis

|                 |    | GGBS              |                 | CaO               |                 | 石膏                |                 |
|-----------------|----|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|                 |    | 三种水平强度<br>之和(kPa) | 平均抗压<br>强度(kPa) | 三种水平强度<br>之和(kPa) | 平均抗压<br>强度(kPa) | 三种水平强度<br>之和(kPa) | 平均抗压<br>强度(kPa) |
| 3d 无侧限<br>抗压强度  | K1 | 2142              | 714             | 2405              | 802             | 2033              | 678             |
|                 | K2 | 2584              | 861             | 2716              | 905             | 2577              | 895             |
|                 | K3 | 3042              | 1014            | 2647              | 882             | 3158              | 1053            |
|                 | R1 | 900               | 300             | 311               | 103             | 1155              | 385             |
| 7d 无侧限<br>抗压强度  | K1 | 2995              | 998             | 2954              | 985             | 2276              | 759             |
|                 | K2 | 2885              | 912             | 3354              | 1118            | 3055              | 1018            |
|                 | K3 | 3439              | 1146            | 3011              | 1004            | 3988              | 1329            |
|                 | R2 | 444               | 148             | 400               | 133             | 1712              | 571             |
| 28d 无侧<br>限抗压强度 | K1 | 4430              | 1477            | 5048              | 1683            | 4501              | 1500            |
|                 | K2 | 6417              | 2139            | 5813              | 1938            | 5357              | 1786            |
|                 | K3 | 5980              | 1993            | 5966              | 1989            | 6969              | 2332            |
|                 | R3 | 1987              | 662             | 918               | 306             | 2468              | 823             |

4 结论

本文讨论了将 CaO 和石膏作为激发剂掺入粒化高炉矿渣微粉制备 GGBS+CaO+石膏固化黏土的强度变化规律，基于正交试验研究 GGBS、CaO 和石膏三掺量的最佳配合比。主要结论如下：

(1) 单独掺加 GGBS 固化效果不明显，黏土体强度提高不显著，这主要是因为矿渣的活性是潜在的，在无激发剂的情况下水化速度缓慢，需要加入一定量的激发剂促进其水化。

(2) 向 GGBS 中加入 CaO 和石膏可以有效地加快矿粉的水化速度，固化黏土在养护初期(3d)就形成一定的强度，一般可达到 28d 抗压强度的 40%~50%，28d 固化黏土的无侧限抗压强度的最大可达到 2.9MPa。

(3) 由极差分析可知：试样养护 28d 后，石膏对土体强度的影响最大，当石膏掺量为 5%时试样平均抗压强度最大；GGBS 次之，当 GGBS 掺量为 11%时平均强度达到峰值；CaO 对强度影响最小，当掺量大于 3.5%时对平均强度影响不大，因此，GGBS、CaO、石膏的最佳掺入比为 11%、3.5%、5%。

参考文献：

[1] 邵艳, 王仕传, 李长勇. 合肥滨湖新区软土物理力学特性相关性分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(5):86—89 (Shao Yan, Wang Shichuan, Li Changyong. Correlation analysis of physical and mechanical characteristics indexes of soft soil for the lakeshore new distract in Hefei [J]. Industrial Building, 2013, 43(5):86—89(in Chinese))

[2] 宁建国, 黄新. 利用工业废渣配制水泥系软土固化剂探讨[J]. 工业建筑, 2005, 35(增):432—437 (Ning Jianguo, Huang Xin. Exploration of preparing cement-based stabilizing agent for soft soil by industrial cinders [J]. Industrial Building, 2005, 35(增):432—437(in Chinese))

[3] 杨爱武, 杜东菊, 赵瑞斌 等. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9):1823—1827 (Yang Aiwu, Du Dongju, Zhao Ruibin, et al. Experimental study on cement and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9):1823—1827(in Chinese))

[4] 孟庆山, 杨超, 雷学文 等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3):707—712 (Meng Qingshan, Yang Chao, Lei Xuwen, et al. Experimental study of early solidification of sludge in East Lake, Wuhan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3):707—712(in Chinese))

[5] 张大捷, 田晓峰, 侯浩波 等. 矿渣胶凝材料固化软土的力学性状及机制[J]. 岩土力学, 2007, 28(9):1989—1991 (Zhang Dajie, Tian Xiaofeng, Hou Haobo, et al. Mechanical behavior and mechanism of stabilizing soft soil

- by slag cementitious material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9):1989—1991(in Chinese))
- [ 6 ] 易耀林, 李晨, 孙川 等. 碱激发矿粉固化连云港软土试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9):1820—1826 (Yi Yaolin, Li Chen, Sun Chuan, et al. Test on alkali-activated ground granulated blast-furnace slag(GGBS) for Lianyungang soft soil stabilization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9):1820—1826(in Chinese))
- [ 7 ] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007 (Guo Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properities of stabilized soil [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2007(in Chinese))
- [ 8 ] 潘庆林. 粒化高炉矿渣的水化机理探讨[J]. 水泥, 2009, 9:6—10 (Pan Qinglin. Study on Mechanism of hydration of granulated blast furnace slag [J]. Cement, 2009, 9:6—10(in Chinese))
- [ 9 ] 陆华. 新型软土固化剂的研制及其反应机理研究[D]. 广州:暨南大学, 2006 (Lu Hua. Research on development and reaction mechanism of a new type of soft soil hardener [D]. Guangzhou:Jinan University, 2006(in Chinese))
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2003 (Ren Luquan. Optimnm design and analysis of experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003(in Chinese))
- [11] 吴蓬, 吕宪俊, 胡术刚 等. 粒化高炉矿渣胶凝性能活化研究进展[J]. 金属矿山, 2012, 10:157—161 (Wu Peng, Lv Xianjun, Hu Shugang, et al. Study progressof the activation of granulated blast furnace slag cementitious material[J]. Metal Mine, 2012, 10:157—161(in Chinese))
- [12] 吕晓姝, 史可信, 翟玉春. 粒状高炉矿渣的研究和利用进展[J]. 材料导报, 2005, 19:382—384 (Shi Xiaozhu, Shi Kexin, Zhai Yuchun. Investigation and utilization of ground granulated blast furnace slag [J]. Materials Review, 2005, 19:382—384(in Chinese))
- [13] 吴蓬. 粒化高炉矿渣胶凝性能的活化工艺及水化机理研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2013 (Wu Peng. Study on activation of cementing properties and hydration mechanism of slag cementitious material [D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology, 2013(in Chinese))
- [14] 易耀林, 卿学文, 庄焱 等. 粒化高炉矿渣微粉在软土固化中的应用及其加固机理[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2):382—384 (Yi Yaolin, Qing Xuewen, Zhuang Yan, et al. Utilization of GGBS in stabilization of soft soils and its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(增 2):382—384(in Chinese))

## Experimental Study of Lacustrine Soft Soil Solidification in Hefei Area by adding GGBS and Activators

SHAO Yan, XING Wei-zhong, WEI Yuan

(Department of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

**Abstract:** Calcium oxide (CaO) and gypsum as activators are added into granulated blast furnace slag (GGBS) to prepare GGBS plus CaO and gypsum solidified clay. Study of solidified clay intensity variation was carried out through unconfined compressive strength experiment. The optimum mix ratio of three contents GGBS, CaO and gypsum was obtained based on orthogonal experiment. Experimental results show that single GGBS has only a bit effect on soft soil solidification with slow solidification speed. The solidifying effect is obvious by mixing CaO, gypsum and GGBS, and the solidified soil will present certain intensity after three days. The maximum strength of solidified soil will reach 2.9MPa after 28 days. Based on the range analysis, the maximum effect on compressive strength is contributed by gypsum, next one comes from GGBS, calcium oxide contributes the minimum impact. It is found that the optimum mix ratio of solidified soft soil is 11% GGBS, 3.5% CaO and 5% gypsum. Above results provide theoretical reference for application of GGBS to solidify lacustrine soft soil in Hefei lakeside new district.

**Keywords:** ground granulated blast-furnace slag (GGBS); calcium oxide (CaO); gypsum; unconfined compressive strength; orthogonal experiment; range analysis