

干湿循环对 GGBS+MgO 改良黏土强度影响的试验研究

薄煜琳, 杜延军*, 魏明俐, 刘辰阳

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 将 MgO 作为激发剂掺入 GGBS 制备 GGBS+MgO 改良黏土, 同时制备等掺量水泥改良黏土作为参照样。通过无侧限抗压强度试验, 研究干湿循环对 GGBS+MgO 改良黏土强度的影响。测试 GGBS+MgO 改良黏土在干湿循环后的无侧限抗压强度、pH 值、变形模量和质量损失率并与标准养护改良黏土进行对比, 分析干湿循环级数对强度特性和 pH 值的影响规律。结果表明: 标准养护 GGBS+MgO 改良黏土强度约为水泥改良黏土的 1.5 倍, pH 值较水泥改良黏土低约 0.2; 干湿循环后, GGBS+MgO 改良黏土强度随干湿循环级数降低较快且破坏程度逐渐增大, pH 值降低明显。与水泥改良黏土相比, GGBS+MgO 改良黏土抗干湿能力较差。

关键词: 黏土; 水泥; GGBS+MgO; 固化稳定; 耐久性

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S1-0134-06

作者简介: 薄煜琳(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境岩土方面的研究。E-mail: boyulin.com@163.com。

Effect of wetting-drying cycles on strength properties of ground granulated blast-furnace slag and magnesium oxide-stabilized soft clay

BO Yu-lin, DU Yan-jun, WEI Ming-li, LIU Chen-yang

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In this study, MgO is added to GGBS as an activator and is used to stabilize kaolin clay. For the purpose of comparison, cement is used as another type of binder to stabilize kaolin clay. The effect of wetting-drying cycles on the durability of the stabilized soils is investigated. The results of unconfined compression tests show that wetting-drying cycle has more evident effect on GGBS+MgO stabilized soils. The change rules of unconfined compressive strength, pH, secant modulus, and mass loss with wetting-drying cycle and standard curing time are discussed. It is found that the values of unconfined compressive strength of GGBS+MgO-stabilized soils are 1.5 times those of cement-stabilized soils under the standard curing condition. pH of GGBS+MgO-stabilized soils is slightly lower than that of the cement-stabilized soils. Upon wetting-drying cycles, the unconfined compressive strength of GGBS+MgO-stabilized soils decreases more rapidly than that of the cement-stabilized soils. pH of both GGBS+MgO- and cement-stabilized soils decreases with the increasing wetting-drying cycles. It is found that the degree of integrity of GGBS+MgO-stabilized soils is lower than that of the cement-stabilized soils. It is concluded that compared with that of the cement-stabilized soils, the wetting-drying durability of the GGBS+MgO-stabilized clay is weaker.

Key words: soft clay; cement; GGBS+MgO; stabilization/solidification; durability

0 引言

水泥是一种最常用的软土改良剂。但水泥工业具有高能耗、高二氧化碳排放等缺点, 不利于节能减排; 此外, 水泥改良土通常呈强碱性, 对周边环境不利^[1]。粒化高炉矿渣微粉 (GGBS, ground granulated blast furnace slag), 是在冶炼生铁时产生的熔融态炉渣由于来不及结晶, 形成的玻璃态物质^[2]。作为常用水泥添加剂, 目前已广泛用于矿渣水泥^[3-4]、路基加固材料^[5]、土壤改良剂^[6]、混凝土掺合料^[7]、断热节能复合砌块^[8]等方面。其潜在的水硬性会被抑制, 单独作为土壤改

良剂使用时, 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^[6]。然而, 掺入氢氧化钠(NaOH)或氢氧化钾(KOH)等强碱激发剂, 会造成凝结速度过快、碱集料反应、收缩和风化等问题; 掺入硫酸盐激发剂, 会使改良土强度较低、养护时间较长, 且碳化和冻融等耐久性能较差^[9]。研究表明, 采用 8%~

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278100); 江苏省自然科学基金项目 (BK2012022)

收稿日期: 2013-03-02

*通讯作者

13%MgO 激发 GGBS、进而改良软土时, 其抗压强度可达到设计标准^[10]。然而, 关于 GGBS+MgO 干湿循环耐久性方面的研究还鲜有报道。

本文采用 MgO 作为激发剂掺入 GGBS 改良黏土, 通过无侧限抗压强度试验, 研究干湿循环对 GGBS+MgO 改良黏土的强度影响, 并与标准养护改良黏土进行对比, 探讨 GGBS+MgO 改良黏土的抗干湿性能。

1 试验内容和方法

1.1 试验材料

试验用土采用徐州矿务局夹河高岭土厂生产的商用高岭土(<320 目), 其主要物理指标见表 1。pH 测试参考 ASTM D4972—01 标准^[11], 取 10 g 干土和蒸馏水搅拌各 10 g 混合, 静置 1 小时后, 采用 HORIBA pH/COND METER D—54 便携式 pH 测试仪进行测试; 界限含水率按照 GB/T 0170—2007 标准测试^[12]; 颗粒分析采用马尔文激光粒度分析仪测定。依据 ASTM D2487—10 标准^[13]判定, 高岭土属于低液限黏土(CL)。

表 1 高岭土的主要物理性质指标

Table 1 Main physico-chemical properties of kaolin clay

土样名称	pH	比重	塑限 /%	液限 /%	黏粒含量 /%	粉粒含量 /%	细砂含量 /%
高岭土	8.77	2.68	14.6	29.4	33	63.3	3.7

GGBS 与 MgO 主要物理化学指标见表 2 和表 3 所示。其中比表面积和平均粒径通过 ASAP2020 型吸附分析仪采用氮气吸附法测试, 活性氧化镁含量测试采用水合法, 氧化镁活性测试采用柠檬酸反应法, 参照 YB/T 4019—2006 规范^[14]。

表 2 GGBS 的主要物理化学指标

Table 2 Main physico-chemical properties of GGBS

碱度	比表面积 / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均粒径 /nm	MnO 含量 /%	pH 值 (水土比 1:1)
1.689	0.2932	98.525	0.28	10.60

由 X 射线荧光光谱仪测得的高岭土、普通硅酸盐 32.5 号水泥、GGBS 和轻烧 MgO 主要化学成分见表 4。

1.2 改良剂的配比设计

表 4 试验所用高岭土、水泥、GGBS 以及 MgO 的主要化学成分

Table 4 Main chemical composition of soft clay, cement, GGBS and MgO

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量
高岭土	0.14	42.73	33.76	0.07	0.063	5.13	0.15	0.51	0.11	0.13	0.079	16.45
水泥	49.7	22.6	9.87	3.84	2.06	3.50	0.75	0.62	0.38	0.24	0.15	6.19
GGBS	34.0	34.3	17.9	1.64	6.02	1.02	0.64	1.17	0.28	0.25	0.02	2.67
MgO	2.46	5.58	0.42	0.10	81.3	0.22	0.01	—	0.01	—	—	9.87

本次试验使用的 GGBS+MgO 改良剂和水泥改良剂的掺量均为干土质量的 25%, GGBS+MgO 改良剂, MgO 占改良剂的 10% (GGBS: MgO=9:1), 为模拟高含水率黏土, 试样的含水率取 60% (约两倍液限), 具体配比见表 5。

表 3 MgO 主要物理化学指标

Table 3 Main physico-chemical properties of MgO

活性氧化镁含量 /%	活性 (ACC 值) /s	比表面积 / $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	平均粒径 /nm	pH (水土比 5:1)
81.3	89.117	28.0230	17.128	10.93

1.3 试验方法

将预备的高龄土烘干, 掺入改良剂并用机械方式搅拌 5 min 以上。为制备试验土样, 将改良黏土分 3 层装入 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的柱形模具, 每层振动 2 min 以排除试样中的气泡, 再装入下一层, 直至装满。将试样密封放置在标准养护室内, 养护条件为温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 98%。试样养护 7 d 后脱模, 将试样密封放置在标准养护室内继续养护 90 d 龄期。取水泥改良黏土和 GGBS+MgO 改良黏土各 30 个进行干湿循环试验, 其余 60 个试样继续养护, 与相应干湿循环试样进行对比。

本次试验按 Kamon 等建议的方法进行^[15], 干循环历时 48 h, 高温养护由 40 $^{\circ}\text{C}$ 调整为 30 $^{\circ}\text{C}$, 干循环结束后将试样浸泡于 20 $^{\circ}\text{C}$ 水温的蒸馏水中, 标准养护 (20 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 98%) 24 h, 记为一级干湿循环。试验共进行十级干湿循环。每级干湿循环后, 取每种改良剂的 3 个平行试样进行无侧限抗压强度试验, 并测量其直径、高度及质量。无侧限抗压强度试验参照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 进行。每级干湿循环结束后都依公式 (1) 计算质量损失率 w_n ; 累计质量损失率则按照下式计算:

$$w_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad , \quad (1)$$

其中 m_0 为试样初始的质量(即为 28 d 时测得的质量), m_n 为不同配方第 n 级干湿循环后试样的质量。

$$\Sigma w_n = w_1 + w_2 + \dots + w_n \quad . \quad (2)$$

变形参数用变形模量 E_{50} 来度量, E_{50} 指应力为 50% 抗压强度时土的割线模量^[16], 按下式计算:

$$E_{50} = \frac{\sigma_{1/2}}{1/2\varepsilon_f} \quad (3)$$

2 试验结果及讨论

2.1 pH值研究

图1为标准养护及干湿循环下GGBS+MgO改良黏土和水泥改良黏土pH值随时间的变化关系。由图可知,水泥和GGBS+MgO改良土在正常养护下的pH值范围约为11.5~12.3。

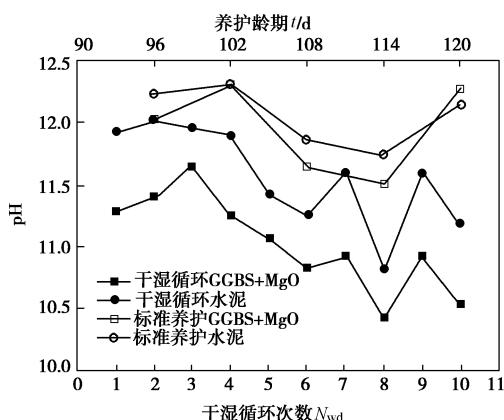


图1 水泥改良土和GGBS+MgO改良土标准养护和干湿循环pH值的变化关系

Fig. 1 Change of pH with cement- and GGBS+MgO-stabilized soils under standard curing and wetting-drying cycles

同时,标准养护GGBS+MgO改良黏土pH值较水泥改良黏土低约0.2,干湿循环GGBS+MgO改良黏土pH值较水泥改良黏土低约0.5。原因在于GGBS和MgO按9:1比例混合后,CaO和MgO的总含量低于水泥成分含量,GGBS+MgO与水混合后,孔隙水中Ca(OH)₂浓度较低,导致GGBS+MgO改良黏土pH值略低于水泥改良土。

由图1可知,两种改良土标准养护下pH值随龄期均有小幅降低,原因为火山灰反应消耗了Ca(OH)₂,从而使孔隙水pH值降低;而pH值随干湿循环级数增加而降低的原因可能在于随着干湿循环次数的增加,改良土破坏程度增加,表面裂隙的产生加速了Ca²⁺阳离子的溶出。

表5 改良土的配比设计

Table 5 Mix design of stabilized soils

改良剂类型	GGBS+MgO	水泥
试样数量	60	60
改良剂质量/干土质量	0.25	0.25
水泥质量/改良剂质量	0	1
GGBS质量/改良剂质量	0.9	—
MgO质量/改良剂质量	0.1	—
含水率/%	60	60

2.2 无侧限抗压强度变化特性

图2和图3分别表示标准养护和干湿循环GGBS+MgO改良黏土和水泥改良黏土无侧限抗压强度随养护时间(或循环次数)变化规律。

由图2和图3可知,标准养护GGBS+MgO改良黏土的强度约为水泥改良黏土的1.5倍。GGBS中Al₂O₃和SiO₂含量均高于普通硅酸盐水泥,在MgO碱性激发下,GGBS+MgO改良土中的火山灰反应更持久,早期和后期强度均较高^[17]。其次,普通硅酸盐水泥的比表面积约300 m²/kg,而GGBS比表面积可达400~450 m²/kg^[18],因此GGBS自身水化反应和GGBS与黏土活性矿物间的反应均比水泥改良土充分。

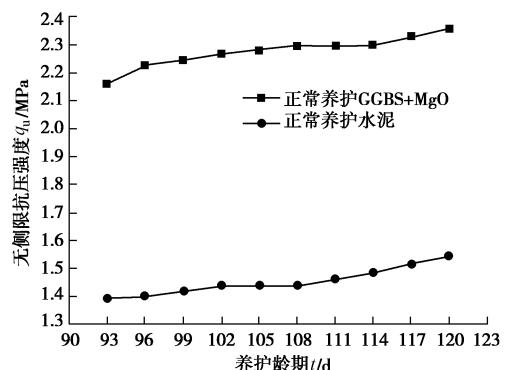


图2 标准养护下的水泥改良土和GGBS+MgO改良土无侧限抗压强度随龄期的变化关系

Fig. 2 Change of unconfined compressive strength of cement- and GGBS+MgO-stabilized soils under standard curing

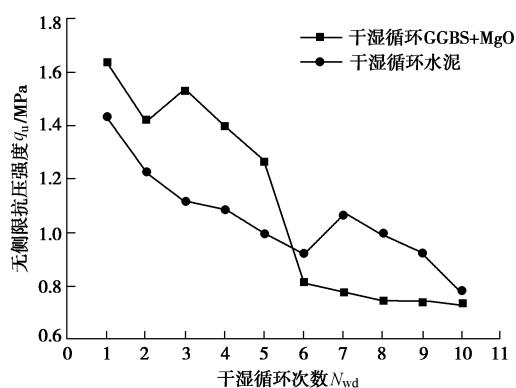


图3 水泥改良土和GGBS+MgO改良土的无侧限抗压强度随循环次数的变化关系

Fig. 3 Change of unconfined compressive strength of cement- and GGBS+MgO-stabilized soils with wetting-drying cycles

干湿循环作用下,循环初期GGBS+MgO改良黏土强度仍高于水泥改良黏土,六级循环后,GGBS+MgO改良黏土强度逐渐低于水泥改良黏土,

干湿循环达到十级时, GGBS+MgO 改良黏土和水泥改良黏土的强度相差不大。原因为 GGBS+MgO 与土壤矿物遇水反应生成 HT (hydrotalcite, 硅酸镁水合物凝胶即水滑石), HT 具有很强的亲水性, 湿循环作用会造成 HT 凝胶膨胀, 使试样内部孔隙增大, 从而降低干湿循环的耐久性。

通过强度损失率进一步分析干湿循环作用下对两种改良黏土的强度变化规律, 如图 4 所示。强度损失率即干湿循环下无侧限抗压强度与标准养护强度的比。十级干湿循环后, 水泥改良黏土强度约为标准养护条件强度的 50%, 而 GGBS+MgO 改良黏土强度仅为标准养护条件强度的 30%, 强度损失率更高, 说明 GGBS+MgO 改良黏土与水泥改良黏土相比抗干湿能力较差。

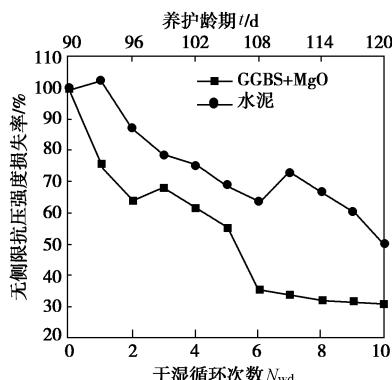


图 4 水泥和 GGBS+MgO 改良土的无侧限抗压强度损失率随干湿循环次数的变化关系

Fig. 4 Loss of unconfined compressive strength of cement- and GGBS+MgO-stabilized soils with wetting-drying cycles

图 5 为全部十级干湿循环下, 水泥改良土和 GGBS+MgO 改良土的强度随 pH 的变化规律; 干湿循环条件下, GGBS+MgO 改良土的强度随 pH 增长幅度较水泥改良土更显著, 而标准养护下的水泥改良土和 GGBS+MgO 改良土的强度与 pH 关联程度不明显。

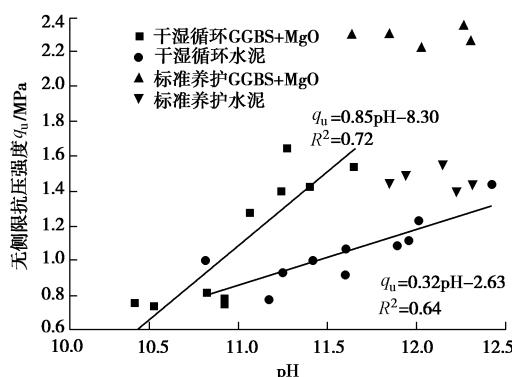


图 5 pH 值与无侧限抗压强度相关关系图

Fig. 5 Relationship between pH and unconfined compressive strength

2.3 变形模量 E_{50} 变化特性

图 6 为标准养护和干湿循环下 GGBS+MgO 改良黏土和水泥改良黏土变形模量 E_{50} 随干湿循环级数的变化规律。由图可知, 标准养护和干湿循环下 GGBS+MgO 改良黏土变形模量 E_{50} 随干湿循环次数变化幅度较水泥改良黏土显著。

通过比较发现, E_{50} 随龄期的变化规律与无侧限抗压强度随龄期变化的规律相似, 故 E_{50} 与无侧限抗压强度之间应存在较好的正相关关系 (见图 7)。

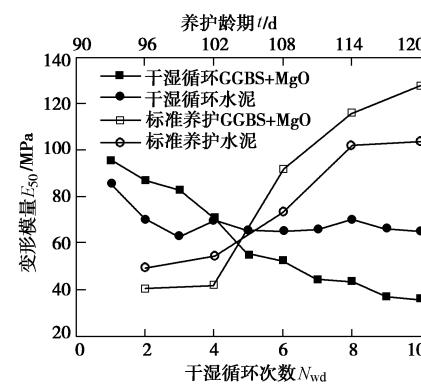


图 6 水泥改良土和 GGBS+MgO 改良土在标准养护和干湿循环条件下的变形模量随时间 (或干湿循环次数) 变化关系曲线

Fig. 6 Change of secant modulus of cement- and GGBS+MgO-stabilized soils with wetting-drying cycles/curing time

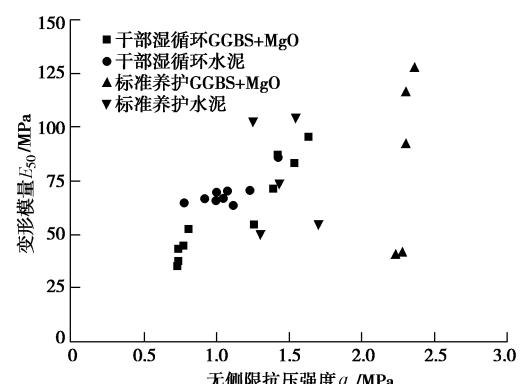


图 7 改良土的变形模量随无侧限抗压强度的变化关系

Fig. 7 Relationship between secant modulus and unconfined compressive strength of stabilized soils

2.4 累计质量损失率研究

试样的累计质量损失率见图 8 所示。由图可知, 随着干湿循环级数的增加, 水泥改良土的累计质量损失率略高于 GGBS+MgO 改良土, 大约高 3% 左右。

在每级干湿循环后关于对其试样的状况进行健全度的描述^[19], 如表 6 所示。

表 6 试样健全度判定标准^[19]Table 6 Criteria for evaluating integrity of stabilized soil samples^[19]

健全度	试样表面状况	脱落状况
a	外观未呈现明显变化	
b	局部产生细微裂痕	局部表面出现脱落
c	一部分产生明显裂痕	试样小部分脱落
d	整体出现明显裂痕	试样有大块脱落
e	试样一部分整体崩落(<20%程度)	
f	试样整体出现崩落、崩坏,但是基本形状还存在	
g	试样全体崩坏,成片状或块状	
h	试样全体崩坏,成细粒状或泥状	

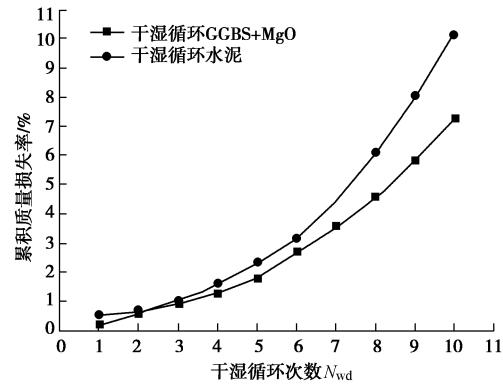


图 8 水泥和 GGBS+MgO 改良土干湿循环累计质量损失率图

Fig. 8 Change of accumulated mass loss of cement- and GGBS+MgO-stabilized soils with wetting-drying cycles

图 9 (a) 和 9 (b) 分别为五级循环和十级循环后 GGBS+MgO 改良土与水泥改良土外观情况。由图 9 (a) 可知, 经过五级干湿循环后水泥改良土试样表面有细小裂隙的产生, 但整体较为完整; 而 GGBS+MgO 改良土试样表面已有小片状的脱落, 干湿循环条件对其试样的影响较为严重。图 9 (b) 显示, 十级干湿循环结束后, 水泥改良土表层有大面积的脱落, 可见干湿循环对水泥改良土的影响表现在表层; 而 GGBS+MgO 改良土已经出现块状的崩落, 可见干湿循环条件对 GGBS+MgO 改良土的影响已经发展到改良土内部。

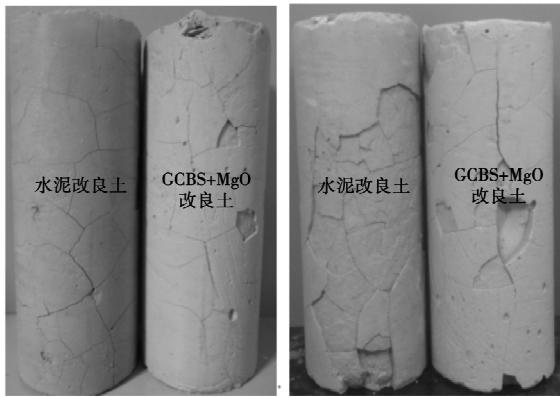


图 9 干湿循环后水泥改良土和 GGBS+MgO 改良土的外观对比

Fig. 9 Photos showing the samples stabilized with cement and GGBS+MgO after wetting-drying cycles

通过健全度判定标准对该试验中的干湿循环下的水泥和 GGBS+MgO 试样进行统计, 结果见图 10。图 10 显示随着干湿循环次数的增加, GGBS+MgO 改良土的试样破坏程度逐渐增大, 超过水泥改良土试样。由此可见, GGBS+MgO 改良土抗干湿循环能力较水泥改良土弱。

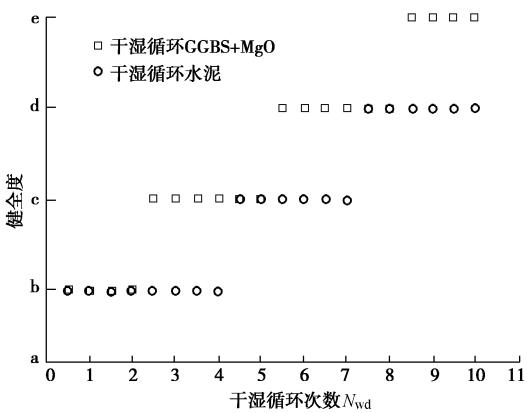


图 10 改良土健全度评价结果图

Fig. 10 Results of integrity evaluation for stabilized soils

3 结 论

本文讨论了标准养护和干湿循环 GGBS+MgO 改良黏土的强度变化规律, 并评价改良黏土的健全度, 主要结论如下:

(1) 标准养护 GGBS+MgO 改良黏土 pH 值较水泥改良黏土低约 0.2, 干湿循环后, GGBS+MgO 改良黏土 pH 值降低明显, 较水泥改良黏土低约 0.5。

(2) 标准养护 GGBS+MgO 改良黏土无侧限抗压强度约为水泥改良黏土的 1.5 倍, 但干湿循环对 GGBS+MgO 改良黏土强度影响显著, 六级干湿循环后, 强度低于水泥改良黏土, 并随着循环级数增加逐渐降低; 变形模量变化规律与强度变化具有相似规律。

(3) 随着干湿循环级数增加, 水泥改良黏土脱落破坏现象仅集中在外表层, 而 GGBS+MgO 改良黏土在六级干湿循环后裂隙破坏已发展到试样内部。

(4) 由于 GGBS 为工业废料, 价格低廉, MgO 水化反应不造成 CO₂ 排放, 具有良好的社会、环境和经济效益, 可代替普通硅酸盐水泥土壤改良剂使用。但长期干湿循环作用对 GGBS+MgO 改良黏土强度影响较大, 如使用 GGBS+MgO 土壤改良剂时, 应充分考虑当地的气候变化和地下水影响。

参考文献:

- [1] 李颖, 陈德平, 倪文. 矿渣-石膏净浆硬化体碱度降低方法探讨[J]. 材料导报, 2010, 24(16): 243-247. (LI Ying, CHEN De-ping, NI Wen. Methods for reducing alkalinity of

- slag-gypsum harden pastes[J]. Journal of Materials, 2010, **24**(16): 243 - 247. (in Chinese))
- [2] 王 盛, 朱重键. 采用立磨生产粒化高炉矿渣粉[J]. 混凝土, 2004(12): 47 - 51. (WANG Sheng, ZHU Zhong-xin. Granulated blast-furnace slag powder producing by vertical mill[J]. Concrete, 2004(12): 47 - 51. (in Chinese))
- [3] TOMONITSU S, KOJI K. Solidification of sludges with cement-slag-CaSO₄[C]// Proc of 7th ICCC, Paris, 1980.
- [4] 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): 1987 - 1991. (ZHANG Da-jie, TIAN Xiao-feng, HOU Hao-bo, et al. Mechanical behavior and mechanism of stabilizing soft soil by slag cementitious material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(9): 1987 - 1991. (in Chinese))
- [5] SWAMY R N. Cement replacement materials[M]. Surrey: Surrey University Press, 1986.
- [6] 程福安, 魏瑞丽, 李 辉. 粒化高炉矿渣资源化利用的技术现状[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, **42**(3): 446 - 450. (CHENG Fu-an, WEI Rui-li, LI Hui. Status of recycling technology of blast furnace slag[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science), 2010, **42**(3): 446 - 450. (in Chinese))
- [7] 王秀娟, 陆文雄, 邵 霞, 等. 高炉矿渣用作高性能混凝土掺合料的研究进展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, **10**(2): 170 - 175. (WANG Xiu-juan, LU Wen-xiong, SHAO Xiao, et al. Progress in granulated blast furnace slag used as admixture for high performance concrete[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2004, **10**(2): 170 - 175. (in Chinese))
- [8] 董艳辉, 李景昆. 高炉矿渣用作蒸压粉煤灰砖骨料的试验研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2011(1): 32 - 34. (DONG Yan-hui, LI Jing-kun. The experimental investigation of blast furnace slag as autoclaved fly ash brick aggregate[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2011(1): 32 - 34. (in Chinese))
- [9] 张明涛, 赵 敏, 谭克锋. 新型无熟料矿渣水泥的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, **30**(4): 920 - 924. (ZHANG Ming-tao, ZHAO Min, TAN Ke-feng. Experimental study on the new non-clinker slag cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, **30**(4): 920 - 924. (in Chinese))
- [10] HAHA M Ben, LOTHENBACH B, SAOUT G Le, et al. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag—Part I: Effect of MgO[J]. Cement and Concrete Research, 2011: 955 - 963.
- [11] ASTM D4972-01 Standard test methods for pH of soils[S]. 2007.
- [12] JTGE40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社. 2007. (JTGE40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese))
- [13] ASTM D2487-10 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)[S]. 2010.
- [14] YB/T 4019—2006 轻烧氧化镁化学活性测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. (YB/T 4019—2006 Method for determination of magnesium oxide chemical activity[S]. Beijing: China Standard Press. 2006. (in Chinese))
- [15] MASASHI Kamon, SUPAKIJ N, TAKESHI K. Utilization of stainless-steel slag by cement hardening[J]. Soils and Foundations, 1993, **33**(3): 118 - 129.
- [16] 李建军, 梁仁旺. 水泥土抗压强度和变形模量试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 473 - 477. (LI Jian-jun, LIANG Ren-wang. Research on compression strength and modulus of deformation of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 473 - 477. (in Chinese))
- [17] 李建立. 水泥土桩复合地基的应用[J]. 现代公路, 2012(1): 86 - 88. (LI Jian-li. Application of cement soil pile composite foundation[J]. Highway, 2012(1): 86 - 88. (in Chinese))
- [18] INTHURRAIDE G J B, OLIVER J. High performance concrete for French Nuclear Reactor Containment Vessels[J]. Utilization of High Strength Concrete, 1993, **1**(1): 20 - 24.
- [19] 张 帆. 水泥系材料固化 Pb/Zn 重金属污染黏土的力学特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2011. (ZHANG Fan. Mechanical properties of Pb/Zn contaminated clay treated by cement-based materials[D]. Nanjing: Southeast University, 2011. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)