

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.004

# 新型固化剂 GSC 固化软土的力学性能试验研究

孙家瑛<sup>1</sup>, 沈建生<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学宁波理工学院 绿色建材与废弃物资源化研究中心, 浙江 宁波 315100;  
2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

**摘要:**利用脱硫石膏及钢渣-矿渣复合胶凝材料(简称 GSC)固化软土,既可以充分利用工业废渣,减少二次污染,又可以节约矿产资源,保护自然生态。通过研究在不同掺入比、不同水灰比和不同龄期时 GSC 固化土的无侧限抗压强度试验结果,分析了掺入比、水灰比、龄期对固化土强度的影响;同时引入似水灰比对 GSC 固化土后期强度进行预测。研究表明, GSC 掺入比越大,对软土的固化效果越好, GSC 固化土无侧限抗压强度随龄期的增长规律与水泥土一致但早期强度比水泥土低,当 GSC 掺入比高于水泥掺入比 3%,在龄期达到 28 d 后,如果 GSC 的水灰比小于水泥的水灰比时, GSC 固化土的强度高于水泥土的强度,因此用 GSC 替代水泥作为软土固化剂可以满足固化土强度要求。

**关键词:**脱硫石膏及钢渣-矿渣复合胶凝材料;似水灰比;固化;软土;无侧限抗压强度

**中图分类号:** TU528.01    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)01-0020-06

## Experimental Investigation of Stabilized Soft Soil by New GSC

Sun Jiaying<sup>1</sup>, Shen Jiansheng<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Green Building Materials and Waste Resources Reuse, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China;  
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

**Abstract:** Soft clay is stabilized by desulphurization gypsum and steel slag-slag blended cementitious materials (GSC), which can not only reuse industrial waste and decrease second pollution, but also can conserve mineral resources and protect natural ecology. The variation of unconfined compressive strength of the clay improved by GSC with different mixing ratios and water-GSC ratio and ages was studied through the laboratory experiments. The long-term strength of stabilized soil is predicted with GSC by quasi-water-GSC ratio. The results show that the more the mixing ratios is, the better the stabilized effect of soft soil is. With increase of curing period, the strength increasing of GSC-soil is consistent with cement-soil, and it has lower strength in the early stage. When mixing ratios of GSC is more than those of cement by 3%, if the water-GSC ratio is less than those of cement, it has the higher strength than cement-soil, after 28 days. The results show that GSC stabilized soil is feasible and it can meet the demand of cure strength.

**Key words:** desulphurization gypsum and steel slag-slag blended cementitious materials (GSC); quasi-water-GSC ratio; stabilization; soft soil; unconfined compressive strength

收稿日期: 2012-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(50808160); 科技新国际合作重大项目(2010FA24590); 宁波市创新团队项目(2011B81005)

作者简介: 孙家瑛(1960-), 男, 教授, 主要从事建筑材料研究, (E-mail) jakys@163.com.

坚持可持续发展道路,是中国一项长期的基本国策,工业废渣的再生利用,环境的综合治理,一直是可持续发展的核心内容。脱硫石膏和钢渣是常见的 2 种工业废弃物,随着工业规模的不断扩大,上述 2 种废弃物产量也在逐年增加,给城市的环境带来沉重的负担<sup>[1-3]</sup>。目前在岩土工程中利用工业废渣进行土体改良非常广泛,有文献研究表明,固化剂 HS<sup>[4]</sup>、MBER<sup>[5]</sup> 均是由水泥与工业废渣混合制成的,武汉大学发明的 HAS 固化剂是以矿渣渣为主要原料的一种新型灰渣胶凝材<sup>[6]</sup>。但尚未有文献载明利用钢渣、脱硫石膏等工业废渣混合,在不掺水泥的情况下作为软土的固化剂的研究。

研究表明:1)矿渣激发后水化产物除了与硅酸盐相同的 C-S-H 凝胶外,还产生了难溶的、高强的沸石类矿物<sup>[7]</sup>;2)钢渣粉的化学成分和矿物相组成与水泥熟料相似,具有一定的活性<sup>[8]</sup>;3)脱硫石膏含有较多的二水硫酸钙(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O),其固化后产生钙矾石,具有支撑及充填性作用<sup>[9]</sup>;施惠生等<sup>[10]</sup>研究发现,脱硫石膏对矿渣具有改性作用。如果将钢渣、矿渣、石膏三者混合运用于软土的固化,不仅可以减少燃煤电厂及冶金厂废渣的堆放场地,减少二次污染,而且可以减少天然石膏的开采量,保护天然石膏资源,节省开矿费用,符合中国可持续发展战略和循环经济理念,具有重要的现实意义。

本文以钢渣、脱硫石膏、矿渣为主要原料,掺入

水泥熟料作为矿物激发剂,制成脱硫石膏及钢渣-矿渣复合胶凝材料(以下简称 GSC)。将此材料用于固化软土。通过 GSC 固化土的无侧限抗压强度与水泥土无侧限抗压强度的比较,来探讨其固化软土的力学性能,并用似水灰比指标对 GSC 固化剂的固化效果进行预测,以探讨 GSC 在实际工程应用中的可行性。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 试验用原材料

水泥:P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥;脱硫石膏为北仑电厂的工业废料;矿渣、钢渣微粉由上海宝钢冶金公司生产,通过正交试验确定各原料的配合比,GSC 其组成为: $m(\text{脱硫石膏}):m(\text{钢渣微粉}):m(\text{矿渣粉}):m(\text{水泥熟料})=12:43:40:5$ 。水泥及 GSC 的物理力学性能见表 1。GSC 中钢渣微粉的主要化学成分见表 2。

土样为宁波典型的淤泥质粉质黏土,土样的基本物理力学指标见表 3。

表 1 水泥及 GSC 的物理力学性能

固化剂	t/min		抗压强度 $f_c$ /MPa		抗折强度 $f_t$ /MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
水泥	135	213	24.66	48.88	4.68	7.22
GSC	90	295	20.39	44.19	5.07	7.93

表 2 钢渣微粉的主要化学成分

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MFe	MnO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O	IL
9.04	27.23	1.88	41.50	10.24	0.51	3.14	0.06	1.55	1.00	0.04	0.08	0.11	1.65

表 3 试验土样物理力学性能

土样	含水量/%	土粒比重	孔隙比	液限 $\omega_L$ /%	塑限 $\omega_p$ /%	塑性指数 $I_p$	液限指数 $I_L$
淤泥质粉质粘土	37	2.73	1.052	37.5	21.1	16.4	0.82

### 1.2 试验方法

固化剂的掺入比  $a_w$  为 8%、10%、12%、15%、20%,掺入比  $a_w$  指的是掺入固化材料质量与湿土质量的比值。养护龄期为 7、14、28、60、90 d。具体试样制备如下:

1)将原状土风干碾碎,过 2 mm 筛后加入适量的水,将含水率调至 37%,采用 B10 型搅拌机搅拌均匀。

2)往原状土中分别加入指定比例的水泥和 GSC 进行混合,并搅拌均匀,水泥按 8%、10%、12%、15%掺入,水灰比为 0.5;GSC 按 8%、10%、

12%、15%、20%掺入,水灰比为 0.3、0.4、0.5。

3)将搅拌均匀的混合料分层振实成型,制成直径为 39.1 mm、高为 80 mm 的圆柱体试样,用袋养的方法把试样放入标准养护箱内养护至指定的龄期。

将养护至设计龄期的试样进行无侧限抗压强度试验。试验采用应变式三轴剪力仪,加荷速率为 0.8 mm/min,在室温条件下进行单轴压缩试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 固化土无侧限抗压强度随龄期的变化规律

图 1 给出了 GSC 固化土在不同掺入比,不同水

灰比下无侧限抗压强度随龄期的变化曲线。从图中可以看出,无侧限抗压强度随龄期的增大而不断增大。

从图 1 中可以发现,GSC 在龄期达到 7 d 以前固化效果不明显;当龄期达到 7 d 以后,GSC 固化土的无侧限抗压强度增长较为明显;当龄期超过 28 d 时,强度仍有较大的增长,但增长的幅度随着龄期的增加而逐渐降低。图中曲线从下到上观察可以发现,随着龄期的增长,强度的增长上面较下面明显,说明掺入比高的固化土随着龄期的增长较快。

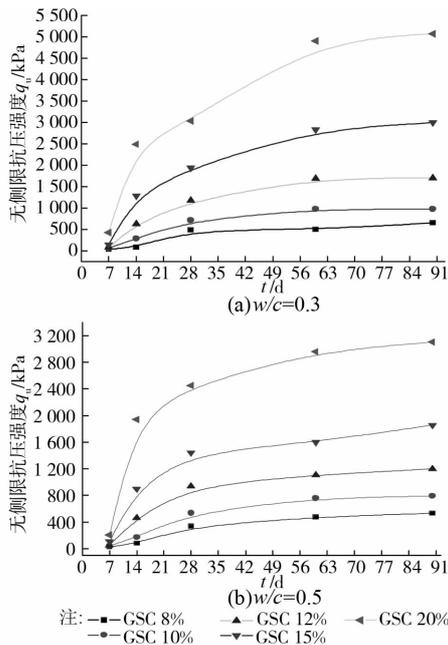


图 1 GSC 固化土  $t - q_u$  关系曲线

## 2.2 固化土无侧限抗压强度随掺入比的变化规律

图 2 给出了 GSC 固化土在水灰比 0.3 时,不同龄期固化土无侧限抗压强度随掺入比的变化规律。从图中可以看出:无侧限抗压强度随掺入比的增大而不断增大,龄期达到 60 d 后强度的增长较少。图中各曲线的斜率为递增关系,说明强度增长速率随着掺入比的增大而增大。

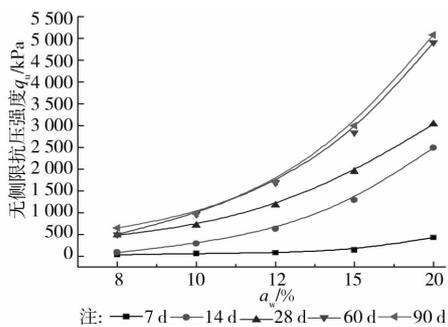


图 2 GSC 固化土  $a_w - q_u$  关系曲线(水灰比 0.3)

图 3 给出了 GSC 固化土在不同水灰比时,在龄

期达到 28 d 后固化土无侧限抗压强度随掺入比的变化规律。从图中可以看出:相同条件下,无侧限抗压强度随着水灰比的增大而减小,间接说明了土的含水量对水泥土的强度存在影响。当土中的水含量加大时,土的有效应力就小,相应的土的抗压强度就削弱。图 1 中后期强度的提高有一部分因素是水泥基固化材料的水化作用,使得土中的水分减少,孔隙由水化胶结物填充,土的有效应力增加,固化土的无侧限抗压强度也相应的提高。

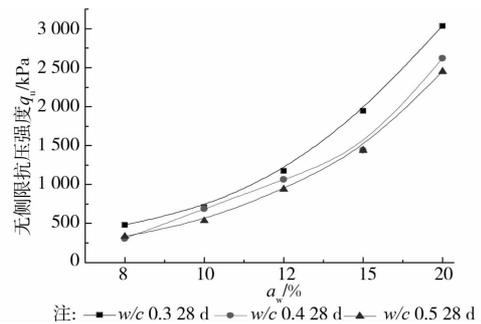


图 3 GSC 固化土  $a_w - q_u$  关系曲线

## 2.3 GSC 和水泥固化效果的比较分析

图 4 表明,GSC 固化土无侧限抗压强度随龄期的变化规律与水泥固化土的无侧限抗压强度变化规律一致,GSC 固化土的早期强度较水泥土的早期强度要低。

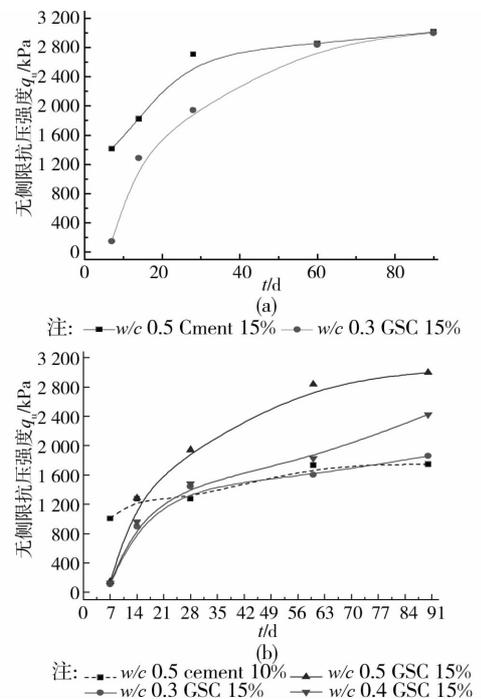


图 4 GSC、水泥  $t - q_u$  关系比较曲线

从图 4(a)中可以发现当 GSC 水灰比 0.3;水泥土水灰比 0.5 时,在同一掺入比下,当龄期达到 60 d 以后,两者的无侧限抗压强度相当。图 4(b)中表

明:当 GSC 掺入比高于水泥掺入比 5% 时,在 GSC 固化土的水灰比和水泥土的水灰比均为 0.5 的情况下,龄期达到 28 d 后,两者的强度相当;相同条件下,当 GSC 固化土水灰比降低时,在龄期达到 28 d 后,GSC 固化土的无侧限抗压强度均大于水泥固化土。

当 GSC 掺入比高于水泥掺入比 3% 时(见表 4),在龄期达到 28 d 时,水灰比 0.3 的 GSC 固化土

强度高于水灰比 0.5 的水泥土强度 3%;当龄期达到 60 d 时,GSC 固化土强度高于水泥土强度 30%;达到 90 d 时,GSC 固化土强度高于水泥土强度 37%。当水灰比均为 0.5 时,GSC 固化土 28 d 强度低于水泥土强度 23%,当龄期达到 60 d 时,GSC 固化土强度低于水泥土强度 21%,达到 90 d 时,GSC 固化土强度低于水泥土强度 15%。

表 4 固化土强度随龄期的变化值

固化剂	$\omega/c$	$a_w/\%$	$q_{u7}/\text{kPa}$	$q_{u14}/\text{kPa}$	$q_{u28}/\text{kPa}$	$q_{u60}/\text{kPa}$	$q_{u90}/\text{kPa}$
水泥	0.5	12	1 300.2	1 395.7	1 881.2	2 155.9	2 187.8
	0.3	12	81.8	625.5	1 175.6	1 600.2	1 707.7
GSC	0.5	15	110.5	896.8	1 440.7	1 689.9	1 858.5
	0.3	15	145.9	1 287.0	1 943.6	2 836.1	2 998.7

当 GSC 掺入比与水泥掺入比均为 12% 时(表 4),在龄期达到 28 d 时,水灰比 0.3 的 GSC 固化土强度低于水灰比 0.5 的水泥土强度 37%,当龄期达到 60 d 时,GSC 固化土强度低于水泥土强度 26%,达到 90 d 时,GSC 固化土强度低于水泥土强度 22%。

2.4 似水灰比与加固土无侧限抗压强度的关系

似水灰比  $R^{[11]}$ ,指单位体积 GSC 固化土在配置前水的质量与 GSC 的质量之比,最大似水灰比与土的性质有关<sup>[12]</sup>。中国有很多学者研究了关于水泥土无侧限抗压强度与水灰比、水泥用量之间的关系<sup>[13-16]</sup>,运用似水灰比  $R$ ,考虑水灰比、掺入比、含水量的关系,见式(1)。

$$R = \frac{M}{100} + \frac{100\omega_n}{(\omega_n + 100)a_w} \quad (1)$$

式中: $M$  为水灰比,%; $\omega_n$  为土的天然含水量,%; $a_w$  为掺入比,%。

通过试验结果可得到 GSC 固化土无侧限抗压强度  $q_u$  与似水灰比  $1/R$  成直线关系(见图 5)。

$$q_u = K_E \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (2)$$

式中  $K_E$  为直线斜率,称为 GSC 加固土的加固系数,大量研究表明,水泥土的加固系数  $K_E$  随着龄期的增大而增大<sup>[15-17]</sup>。从图 5 可以发现,GSC 固化土的  $K_E$  也存在此规律。直线与横坐标的交点为  $1/R_0$ , $R_0$  为最大似水灰比,式(2)表明某一种土的  $R_0$  可视为常量,通过回归分析如图 5 所示,可以得出该种土的  $R_0 = 4.1$ 。

3.5 GSC 固化土加固系数  $K_E$  与龄期的关系

在实际工程中,水泥土的强度常常通过 28 d 取样来测试其固化效果,为了更好的了解固化土后期强度的发展,就要对其进行强度预测,如 Sakka 等<sup>[15]</sup>、

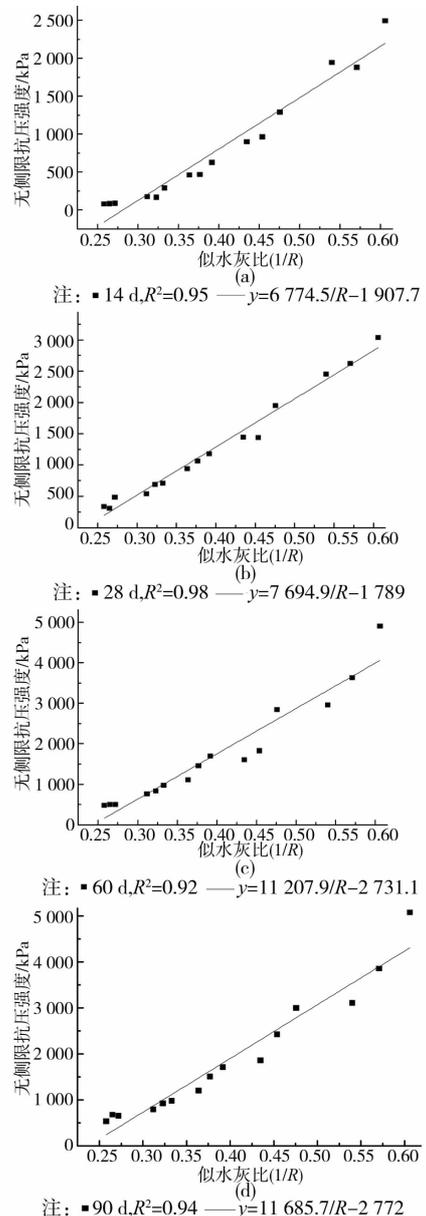


图 5 无侧限抗压强度与似水灰比之间的关系

Horpibulsk 等<sup>[17]</sup>都提出了相应的预测公式。本文通过含  $1/R, K_E$  的预测公式(2)来研究 GSC 固化剂的固化效果及在工程应用中的可行性。 $K_E/K_{28}$  与龄期  $t$  的关系见图 6。通过回归分析得到:

$$\frac{K_E}{K_{28}} = 0.21 + 0.3 \ln(t - 6.25) \quad (3)$$

由式(2)、(3)可以得到:

$$q_u = [0.21 + 0.3 \ln(t - 6.25)] K_{28} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{4.1} \right) \quad (4)$$

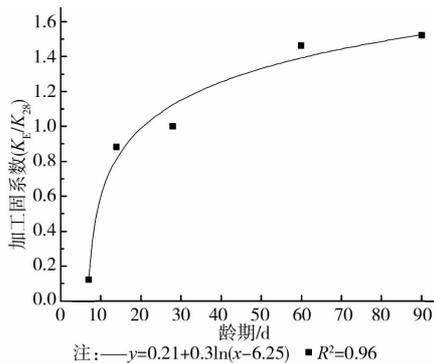


图 6  $K_E/K_{28}$  与龄期之间的关系

当已知某种似水灰比  $R$  及其在龄期 28 d 时的强度系数  $K_{28}$ , 就可以通过式(4)计算出 GSC 固化土在任意龄期的强度。图 7 为实测强度与预测强度进行了比较, 两者的相关系数为 0.98, 具有很好的相关性, 因此用公式(4)对 GSC 固化土进行强度预测是可行的。

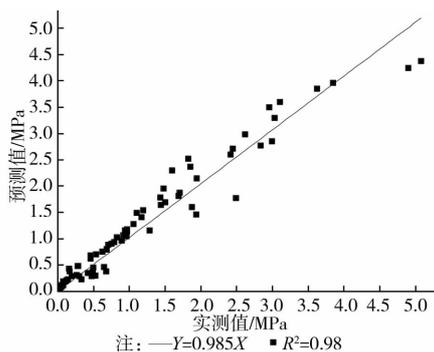


图 7 实测强度与预测强度的比较

### 3 结论

1) 通过大量的试验得到, 当 GSC 掺入比越大, 对软土的固化效果越好, 当 GSC 固化土水灰比与水泥土的水灰比相同时, 在龄期达到 28 d 后, 当 GSC 掺入比高于水泥掺入比 3% 时, GSC 固化土强度略低于水泥土且随着龄期的增长, 差距相应的缩小。当 GSC 固化土水灰比降低时, 在龄期达到 28 d 后,

当 GSC 掺入比高于水泥掺入比 3% 时, GSC 固化土的无侧限抗压强度均大于水泥固化土且随着龄期的增长, 差距相应的增大。因此用 GSC 替代水泥作为软土固化剂可以满足固化土强度要求。

2) GSC 固化土早期强度低, 后期强度增长潜力大, 因此有待对此水泥基材料的早期强度进一步研究, 使后期强度能够提早激发出来。

3) GSC 固化剂掺入比及水灰比对土的加固效果有着显著的影响, 当水灰比增大时, 固化强度降低; 掺入比增大时, 固化强度提高。

4) 对现有公式进行修正, 得到 GSC 固化土强度预测公式, 能够较为准确的预测固化土后期强度。

### 参考文献:

- [1] 方文仓, 周建中, 施存有, 等. 脱硫石膏综合利用的关键工艺技术及装备[J]. 新型建筑材料, 2010, 12: 8-11.  
Fang W C, Zhou J Z, Shi C Y, et al. Key process technology and equipment for comprehensive utilization of FGD gypsum [J]. New Building Materials, 2010, 12: 8-11.
- [2] 郭家林, 赵俊学, 黄敏. 钢渣综合利用技术综述及建议[J]. 中国冶金, 2009, 19(2): 35-38.  
Guo J L, Zhao J X, Huang M. Technical summary and suggestions of comprehensive utilization of steel slag [J]. China Metallurgy, 2009, 19(2): 35-38.
- [3] Alanyali H, Cöl M, Yılmaz M. Concrete produced by steel-making slag (basic oxygen furnace) addition in portland cement [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2009, 6(6): 736-748.
- [4] 周明凯, 沈卫国, 冯修吉. HS 软土固化剂性能研究[J]. 武汉工业大学学报, 1996, 18(4): 120-122.  
Zhou M K, Shen W G, Feng X J. Study on the performance of HS soft soil stabilizer [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1996, 18(4): 120-122.
- [5] 樊横辉, 高建恩, 吴普特, 等. MBER 土壤固化剂集流场的施工工艺[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 56-59.  
Fan H H, Gao J E, Wu P T, et al. Construction technique of flow collecting plot with MBER soil stabilizer [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 56-59.
- [6] 侯浩波, 张发文, 魏娜, 等. 利用 HAS 固化剂固化尾砂胶结充填的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(4): 7-10.  
Hou H B, Zhang F W, Wei N, et al. Experimental study on solidifying tailings by HAS stabilizer in paste backfill [J]. Journal of Wuhan University of Technology,

- 2009,31(4):7-10.
- [7] Saikia N J, Sengupt P. Hydration behaviour of lime-co-Calcined kaolin-petroleum effluent treatment plant sludge [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32: 297-302.
- [8] 孙家瑛,耿健. 无熟料钢渣水泥稳定再生集料性能研究与应用[J]. 建筑材料报, 2010, 13(1): 52-55.  
Sun J Y, Geng J. Research and application of recycled aggregate by clinker free stabilized steel slag cement [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 52-55.
- [9] 黄雨, 周子舟, 柏炯, 等. 石膏添加剂对水泥土搅拌法加固软土地基效果影响的微观试验分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1179-1183.  
Huang Y, Zhou Z Z, Bai J, et al. Micro-experiments on a soft ground improved by cement-mixed soils with gypsum additive [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1179-1183.
- [10] 施惠生, 刘红岩. 脱硫石膏在矿渣水泥中的资源化利用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(1): 66-70.  
Shi H S, Liu H Y. Resource recovery of flue gas desulphurization gypsum in slag cement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(1): 66-70.
- [11] 储诚富, 洪振舜, 刘松玉, 等. 用似水灰比对水泥土无侧限抗压强度的预测[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 645-649.  
Chu C F, Hong Z S, Liu S Y, et al. Prediction of unconfined compressive strength of cemented soils with quasi-water-cement ratio [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 645-649.
- [12] Tang Y X, Nakabayashi S, Fujimura H, et al. Characteristics of cement treated soils as cast underwater [C]//The 33 Japan National Conference on Geotechnical Engineering. Japan: The Japan Geotechnical Society, 1998: 2319-2320.
- [13] Omine K, Ochiai H, Yasufuku N, et al. Prediction of strength-deformation properties of cement-stabilized soils by nondestructive testing [C]//Proceedings of the Second International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials. Rotterdam: Balkema, 1999: 323-330.
- [14] Sakka H, Ochiai H, Yasufuku N, et al. A nondestructive testing for evaluating the improvement effect of cement-stabilized soils [C]//Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology. Japan: Saga University, 1998.
- [15] Sakka H, Ochiai H, Yasufuku K, et al. Evaluation of the improvement effect of cement-stabilized soils with different cement-water ratios [C]//Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology. Japan: Saga University, 2000.
- [16] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.  
Tang Y X, Liu H L, Zhu W. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554.
- [17] Horpibulsuk S, Miura N, Nagaraj T S. Analysis and assessment of engineering behavior of cement stabilized clays [D]. Japan: Saga University, 2001.

(编辑 王秀玲)