

文章编号: 1000-7598-(2005)08-1327-05

有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究

范昭平¹, 朱 伟^{1,2}, 张春雷^{1,2}

(1.河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2.河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘 要: 淤泥固化技术是淤泥资源化利用的一个重要方法, 而有机质对淤泥固化效果的影响是淤泥固化技术研究中的重要课题。在淤泥固化的试验研究中发现有机质含量对淤泥固化的效果有着显著影响。通过对不同有机物含量的固化试验揭示了该种影响的规律, 发现淤泥中的有机质存在着一个极限含量 4.3%, 当超过这一极限含量后, 有机质量的增加不再对固化效果产生更大的影响。根据这一研究结果, 提出了对于高有机质淤泥采用水泥-石膏进行固化的方法。

关 键 词: 有机质; 淤泥资源化; 固化; 极限含量

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging

FAN Zhao-ping¹, ZHU Wei^{1,2}, ZHANG Chun-lei^{1,2}

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environmental Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Solidification technology is an important way for reuse of dredgings; the influence of organic matter on the effect of solidification is a significant problem needs to make clear. Through laboratory study, a remarkable influence of organic matter content on dredging solidification effect was discovered; the relationship of organic matter content and unconfined compressive strength of solidified dredging was made clear; a critical organic matter content 4.3% exists in dredging, when the organic matter content higher than the content, the adding of organic matter does little influence on solidification effect. According to this principle, a cement-gypsum solidification method is proposed to solidify high organic matter content dredgings.

Key words: organic matter; reuse of dredging; solidification; critical organic matter content

1 引 言

淤泥疏浚是航道疏通、港口维护、湖泊治理中常用的工程措施。我国每年都有数亿方以上的疏浚淤泥产生, 长期以来海洋倾倒和陆地抛填是淤泥的常规处理方法。然而, 随着环保意识的不断提高, 海洋倾倒正在被越来越多的国家所禁止, 而陆地抛填也由于严重的土地占用和环境问题受到质疑。因此, 研究新的淤泥处理方法已经成为一个重要的课题。在物理处理、热处理和化学处理等技术之中, 淤泥固化处理技术由于处理量大、速度快、成本低而在国外得到了迅速的发展, 近年来国内也开始了积极的研究开发工作。所谓固化处理, 就是在成为废弃物的淤泥中添加固化材料, 通过搅拌混合使其物理、力学性质发生根本的变化而形成土工材料, 从而达到再生资源利用的目的^[1-3]。

在疏浚淤泥中有相当一部分淤泥来自污染严重的湖泊、河道, 目前仅太湖因污染严重而需要疏浚的淤泥就有 3 925~5 928 万 m³, 这些污染严重的淤泥不可避免的会含有一定量的有机质, 虽然其含量不及高有机质土以及泥炭质土多, 但对固化效果会产生较大的影响, 这是淤泥固化研究中的一个新课题^[4]。

本研究着眼于淤泥中有机质含量对于固化效果的影响, 通过室内试验研究有机质对淤泥的固化效果有无影响、影响程度以及如何影响, 以揭示有机质含量与淤泥固化效果之间的关系, 从而进一步解决含有较高有机质的疏浚淤泥应当如何固化的问题。

2 淤泥的基本性质及试验方法

2.1 淤泥的基本性质

试验所用的淤泥分别取自广东省惠州市大亚

收稿日期: 2004-03-02

修改稿收到日期: 2004-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.50379011); 国家十五“863”重大专项研究课题(No.2002AA601013)。

作者简介: 范昭平, 男, 1978 年生, 硕士, 主要从事环境岩土工程的研究。E-mail: zhpfan@163.com

湾和江苏省无锡市五里湖。为论述方便,把取自大亚湾的海洋疏浚泥简称为D泥,而把取自五里湖的湖泊疏浚淤泥简称为W泥,两种泥的基本性质见表1, 颗粒曲线如图1所示。由表1与图1可以看出, W泥与D泥的基本性质中除了有机质含量相差较大外,其它性质都十分接近,并且两种淤泥中粘粒(粒径 $<0.005\text{ mm}$)的含量均为40%左右,但有机质含量却差别较大。为了研究不同有机质含量对淤泥固化效果的影响,将D, W按照质量比调配成为6种有机质含量不同的淤泥,记作W0D1, W1D2, W1D1, W2D1, W4D1, W1D0, 其中W1D2表示五里湖疏浚泥与大亚湾疏浚泥的质量比为1:2。依次类推,根据两种淤泥的有机质含量可以推算出这几种调配出来的淤泥的有机质含量,见表2。

表1 两种淤泥的基本性质指标

Table 1 Physical properties of tested dredging samples

泥样	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	比重 G_s	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	有机质 含量 $/\%$	pH值
W	130	13.8	2.65	3.41	75	32	5.78	7.5
D	120	13.8	2.74	3.28	73	29	1.39	7.5

注:有机质测定采用高温灼烧法(700~800℃)。

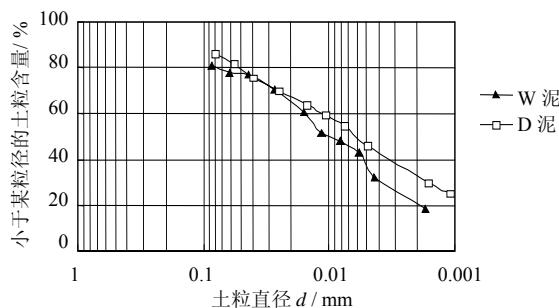


图1 淤泥的颗粒分析曲线

Fig.1 Grain-size distribution curves of tested dredging samples

表2 配制淤泥的有机质含量

Table 2 Prepared dredging organic matter contents

淤泥样	W0D1	W1D2	W1D1	W2D1	W4D1	W1D0
有机质含量/ $\%$	1.39	2.85	3.59	4.32	4.90	5.78

2.2 固化试验的基本方法

本试验所用水泥为南京江南水泥厂32.5#普通硅酸盐水泥,石膏为南京某磷肥厂的工业废料。试验时,将固化材料掺入配制好的淤泥当中,搅拌均匀后,分3层装入制样模具(直径为3.91 cm,高度为8 cm),每层振动2 min后再装入下一层,养护置于恒温恒湿箱中,养护1 d后脱模,脱模后继续

养护至试验龄期进行无侧限抗压强度试验。

3 有机质对淤泥固化效果的影响

3.1 淤泥固化效果的比较

W泥与D泥除了有机质含量相差较大外(相差4.4%),其它的性质都较为相似,故用水泥分别对这两种淤泥进行固化,通过固化效果的比较,揭示有机质含量较高的湖泊淤泥和有机质含量较低的海湾淤泥固化效果的不同。试验时对淤泥的每一个水泥掺加量,在进行混合搅拌后制成6个试样,每3个试样为一组,一组用来进行7 d的无侧限抗压强度试验,另一组用来进行28 d的无侧限抗压强度试验。将每一组3个试样的试验结果进行平均,得到对应于水泥掺加量的抗压强度。水泥掺加量在 50 kg/m^3 时采用 10 kg/m^3 的间隔,在 50 kg/m^3 后采用 25 kg/m^3 的间隔,一直添加到常用的最大掺加量 200 kg/m^3 为止。用水泥固化后的无侧限抗压强度试验结果见图2。

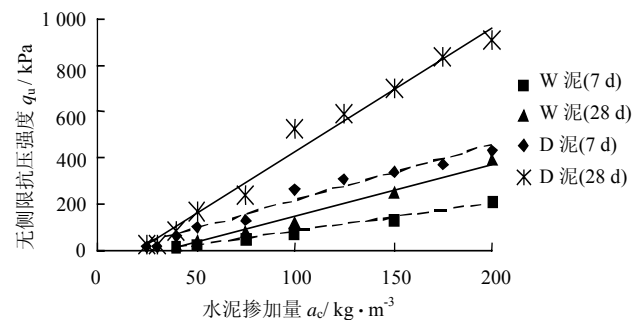


图2 固化土抗压强度与水泥掺加量的关系

Fig.2 Relationship between unconfined compressive strength and cement content of solidified dredgings

从图2中可以看出:

(1) 对于有机质含量较高的W泥和有机质含量较低的D泥,固化后在强度上都存在2个明显的规律:①存在一个最低水泥掺加量 a_0 ^[3],当掺加量低于 a_0 时,固化淤泥的强度增加非常小,基本不能表现出固化效果;②水泥掺加量 a_c 越大,抗压强度 q_u 就越高,在工程实用范围内 a_c 与 q_u 之间基本表现为线性关系。对于这2点基本规律可用式(1)表示,称之为固化淤泥强度基本方程。

$$q_u = k(a_c - a_0) \quad (1)$$

式中 k 为固化土的固化系数; a_0 为最低水泥掺加量。

(2)对D泥和W泥的28 d无侧限抗压强度进行比较可以发现,在固化材料相同掺加量的情况

下, $q_{uD}=(2.3\sim 4.4)q_{uW}$, 同时 W 泥的 $a_0=20\text{ kg/m}^3$, D 泥的 $a_0=34\text{ kg/m}^3$, 这一差距基本是由于 4.4% 的有机质含量不同所引起的, 表明有机质的存在大大降低了固化土的强度, 而且引起了最低水泥掺加量 a_0 的增加。

(3) 对 D 泥和 W 泥固化土的固化系数 k 进行比较, 在龄期为 7 d 时, W 泥的 $k=1.19$, 而 D 泥的 $k=2.42$; 在龄期为 28 d 时 W 的 $k=2.26$, 而 D 泥的 $k=5.37$ 。可见, 在固化材料同样的前提下, 无论在哪一个龄期 D 泥固化后的 k 值都比 W 泥高出一倍。而 k 值是表示水泥固化效果的物理量, 这也反映出有机质含量的增加将会大大地降低固化的效果。

3.2 有机质含量对于固化效果的影响

在明确有机质的存在会对淤泥的固化效果产生明显的影响后, 进一步定量研究有机质含量多少对固化效果的影响规律。为了得到不同有机质含量的淤泥, 将其它组分几乎完全相同, 有机质含量不同的 W 泥和 D 泥按一定比例进行混合配制, 得到有机质含量分别为 1.39%, 2.85%, 3.59%, 4.32%, 4.90%, 5.78% 的 6 种淤泥。采用 50, 75 kg/m^3 和 100 kg/m^3 的 3 种水泥掺加量, 对有机质的影响进行了定量试验。在试验时同样对每一种淤泥的每一种掺加量制取 2 组试样, 对 7 d 和 28 d 龄期的无侧限抗压强度进行试验, 所得结果如图 3 所示。试验结果有以下几个特点:

(1) 无论有机质含量多少, 淤泥经掺加 50 kg/m^3 以上的水泥进行固化处理后, 其抗压强度都随水泥掺加量的增加而增大, 也随着龄期的增长而增大, 固化土的 7 d 强度可以达到 28 d 强度的一半以上, 表明水泥固化淤泥具有早强的性质, 用这种固化淤泥填筑的地基很快就可以投入使用。

(2) 淤泥中有机质含量对水泥固化效果的影响呈现出较为明显的规律性。从图 3 的试验曲线中可以看到一个明显的规律, 在本次试验的有机质含量范围内 (1.39%~5.78%), 无论在什么样的掺加量的条件下, 强度的变化可以分为明显的 2 个阶段: 在第 1 阶段, 强度基本随着有机质含量的增加呈现出线性下降的趋势, 进入第 2 阶段后强度不再随着有机质含量的增加发生明显的变化。在这 2 个阶段之间存在一个明显的转折点, 在此称其为有机质的强度影响极限含量 O_c 。在本此试验的 1.39%~5.78% 的有机质含量范围内, 无论水泥掺加量的多少, O_c 基本表现在 4.3% 左右。

在有机质含量小于 O_c 的情况下, 有机质每增加

1% 就会带来固化淤泥强度 25%~30% 的降低, 表明有机质含量对固化效果影响较大。

O_c 的存在同样对有机质的影响机理在侧面有所反映。一般认为, 有机物在淤泥中多以富里酸的离子态存在^[9], 这种酸离子附着于土颗粒的表面, 在土颗粒表面形成一层吸附膜, 一方面这种酸离子会分解水泥水化产物; 另一方面由于富里酸的存在, 影响了水泥水化产物与土颗粒之间的胶结, 使水泥水化产物不能形成连续的网络状骨架结构, 从而对固化淤泥的强度发生影响。通过 O_c 的存在也可以推测, 有机物含量小于 O_c 时, 土体颗粒表面的富里酸的离子未能达到饱和, 到达 O_c 以后土体颗粒表面的富里酸离子基本达到饱和, 因此此后有机质的增加不对固化淤泥的强度产生明显的影响。

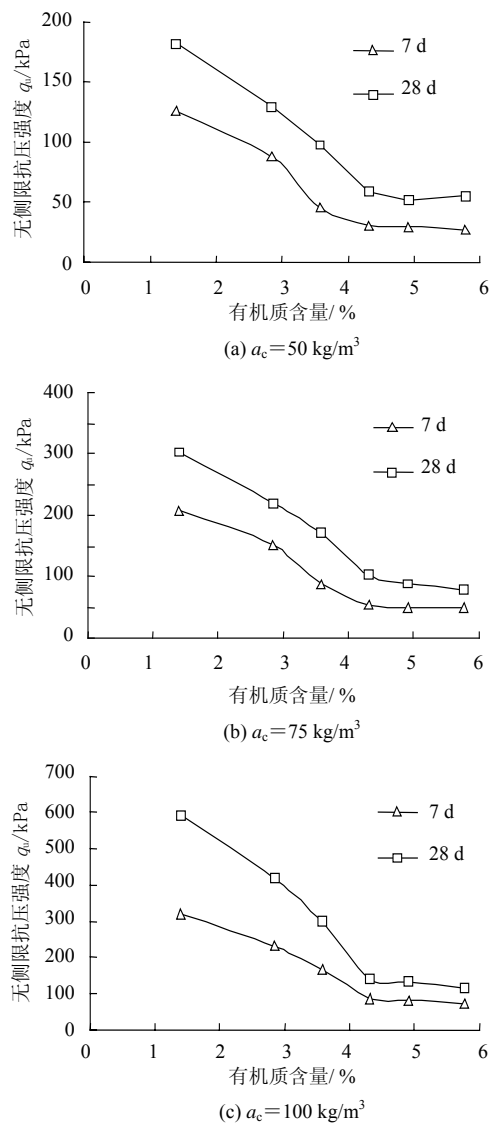


图 3 固化土强度与有机质含量关系

Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength and organic matter content of solidified dredging

4 含有机质淤泥的固化方法探讨

从图 2 可以看出, 无论有机质含量多高, 只要添加足够量的水泥, 一般还是能够达到土工材料所需要的强度。但是, 过多的掺加量会使淤泥固化技术失去使用价值。因此, 必须考虑对有机质含量较高的淤泥进行低价格固化方法。考虑到有机质含量主要影响固化产物与土颗粒的胶结, 寻找水泥以外的固化材料, 通过产生与富里酸离子具有亲和性的固化产物来解决高有机质淤泥高效率固化的问题, 常用的固化材料还有石灰、粉煤灰和石膏粉。水泥固化产生水化硅酸钙主要起胶结作用; 粉煤灰与水泥一起使用只产生水化硅酸钙和水化铝酸钙, 而粉煤灰主要起充填作用; 石灰固化产生碳酸钙同时有一定的脱水作用, 石膏固化产生钙矾石, 具有充填性的作用^[3]。黄新等^[6]研究表明, 在水泥中添加适量石膏加固软土地基, 可以取得单纯用水泥加固达不到的效果。对于有机质含量较高的五里湖淤泥将水泥作为主固化材料, 石灰、粉煤灰、石膏作为辅助材料进行了固化试验, 发现只有添加石膏对有机质含量较高淤泥强度的增加产生了明显的效果。因此, 对水泥-石膏型固化材料进行了进一步的试验研究。使用有机质含量较高的 W 泥和有机质含量较低的 D 泥进行比较试验。考虑到经济性因素, D 泥的水泥掺加量选择 40 kg/m³ 和 50 kg/m³, W 泥的水泥掺加量选择 50 kg/m³ 和 75 kg/m³, 针对不同的石膏掺入比进行固化试验。试验结果如图 4、图 5 所示, 其中石膏掺入比=(石膏质量/水泥质量)×100%。

从图中看出: (1) D 或 W 泥采用水泥-石膏复合型固化材料进行固化后的强度都要高于单一掺加水泥固化后的强度, 表明石膏的掺加有着明显的效果。

(2) 对于 D 泥, 从图 4 中可以看出, 石膏的掺入比为水泥的 10% 时固化效果最佳, 此时固化土 7 d 强度比不掺加石膏可增长 37%, 28 d 强度可增长 41%; 当石膏掺入比超过 10% 时, 再增加石膏的量固化土的强度不但没有增加, 反而下降; 对于 W 泥石膏的掺入比为水泥的 30% 时, 固化效果最佳, 当石膏掺入比超过 30% 时, 固化土强度有所下降。对于这一现象的发生机理, 文献^[3]有较为详细地分析, 此处不再赘述。(3) 对于 W 泥, 从图 5 中可以看出石膏的最佳掺入比为 30%, 此时固化土 7 d 强度比不掺加石膏可增长 41%~120%, 28 d 强度增长 41%~220%。由此可见, 有机质含量较高淤泥的石膏最佳掺入比要大于有机质含量较低的淤泥, 并且, 石

膏对于有机质含量较高淤泥的固化强度的提高效果更加显著。

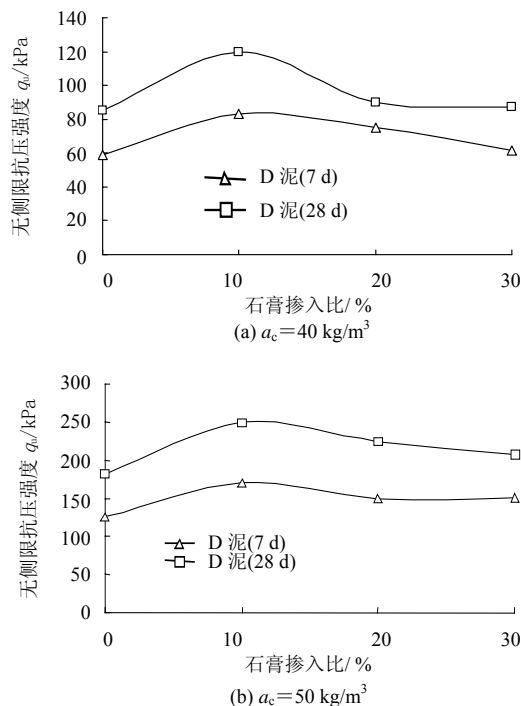


图 4 D 泥固化土抗压强度与石膏掺入比的关系
Fig.4 Relationship between unconfined compressive strength and gypsum mixing proportion of D soil

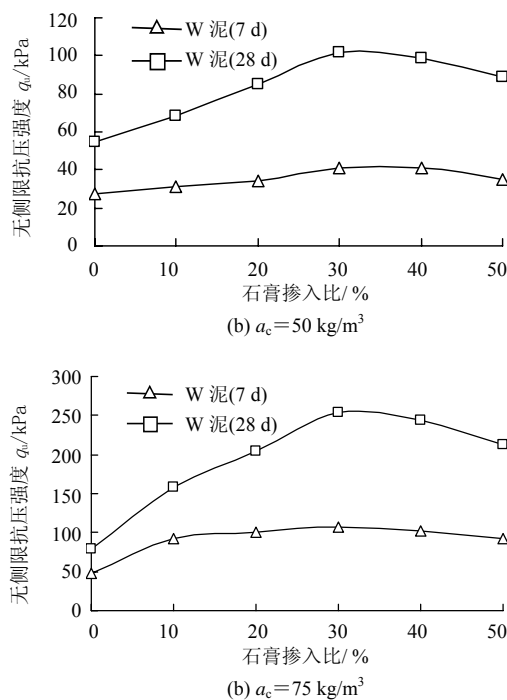


图 5 W 泥固化土抗压强度与石膏掺入比的关系
Fig.5 Relationship between unconfined compressive strength and gypsum mixing proportion of W soil

- [3] 李成, 葛钦存, 杨有海. 膨胀软岩地层灌浆锚杆拉拔试验研究及抗拔力的可靠度分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1994, 13(5): 19 - 25.
LI Cheng, GE Qin-cun, YANG You-hai. Expansive rock anchor pull-out test and research[J]. **Journal of Lanzhou Railway Institute**, 1994, 13(5): 19 - 25.
- [4] 吴永红, 刘树林, 张景恒, 等. 钢筋混凝土预制桩 P - S 曲线及极限承载力[J]. 工程勘察, 2000, (3): 44 - 46.
WU Yong-hong, LIU Shu-lin, ZHANG Jing-heng, et al. P - S curve and bearing capacity of precast RC pile[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2000, (3): 44 - 46.
- [5] 许宏发, 钱七虎, 金丰年. 描述抗拔桩荷载-位移曲线的幂函数模型[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 622 - 624.
XU Hong-fa, QIAN Qi-hu, JIN Feng-nian. Power function model to describe load -displacement curve of tension pile[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 622 - 624.
- [6] 邓志勇, 陆培毅. 几种单桩竖向极限承载力预测模型的对比分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 428 - 431, 464.
DENG Zhi-yong, LU Pei-yi. Comparison and analysis of several predicting models of ultimate bearing capacity of single pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 428 - 431, 464.
- [7] Ilamparuthi K, dickin E A. Predictions of the uplift response of model belled piles in geogrid-cell-reinforced sand[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2001, 19(2): 89 - 109.
- [8] 尹道清. 韶关市西河污水处理厂生化池水泥砂浆钢筋锚杆抗拔实验[J]. 岩土工程界, 2002, 5(6): 62 - 64.
YI Dao-qing. The cement mortar anchor rod pull-out experiment of biochemical pool of Xihe wastewater treatment plant in Shaoguan city[J]. **Geotechnical Engineering Field**, 2002, 5(6): 62 - 64.
- [9] 王贤能, 叶蓉, 周逢君. 土层抗浮锚杆试验破坏标准选取的建议[J]. 地质灾害与环境保护, 2001, 12(3): 73 - 78.
WANG Xian-neng, YE Rong, ZHOU Feng-jun. Proposals for the selection of failure criteria in soil float-resisting anchor rod test[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2001, 12(3): 73 - 78.

上接第 1330 页

5 结 论

(1) 有机质对于淤泥的固化效果有着显著的影响, 不同有机质含量的淤泥固化后强度相差很大, 对有机质相差 4.4% 的两种淤泥, 固化土的 28 d 强度会相差 2.3 ~ 4.4 倍。

(2) 有机质含量对淤泥固化效果的影响存在一个强度影响极限含量 O_c , 当淤泥中有机质含量低于极限含量时, 固化土强度会随着有机质含量的增大而急剧降低; 当淤泥中有机质含量超过极限含量时, 有机质含量的增加对固化土强度增长影响不大, 本研究中此极限含量为 4.3% 左右。

(3) 对有机质含量较高的淤泥进行固化处理时, 采用水泥-石膏复合型固化材料的固化效果要明显高于采用单一水泥的固化效果, 并且有机质含量越高, 石膏的作用越显著。

参 考 文 献

- [1] 朱伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39 - 41.
ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. The status of dredged spoils utilization[J]. **Environmental Science & Technology**, 2002, 25(4): 39 - 41.
- [2] 张春雷, 朱伟. 淤泥再生资源利用技术中的岩土工程问题[A]. 第六届全国土动力学学术会议论文集[C]. 南京: 中国建筑工业出版社, 2002. 833 - 838.
- [3] 张春雷. 淤泥固化土力学性质及固化机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [4] 范昭平. 有机质对淤泥固化的影响机理及对策研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [5] 熊田恭一. 土壤有机质化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [6] 黄新, 胡同安. 水泥-废石膏加固软土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, (5): 72 - 76.
HUANG Xin, HU Tong-gan. On stabilization of soft soil with waste gypsum and cement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, (5): 72 - 76.