

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.005

张丽娟, 刘仁钊. 南沙港淤泥固化前后物理力学性能和微观结构变化[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 31-36. (ZHANG Lijuan, LIU Ren-zhao. Physico-mechanical properties and changes in microstructure of silt before and after solidification in Nansha port [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 31-36.)

南沙港淤泥固化前后物理力学性能和微观结构变化

张丽娟, 刘仁钊

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为找出广州南沙港某油罐仓储区工程淤泥加固时固化剂的最优配比, 取该工程区典型淤泥, 以水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂作为固化剂, 对淤泥进行加固试验研究, 以无侧限抗压强度来检验加固效果, 找到最佳的固化剂掺量, 并进行固化淤泥与原状淤泥力学性能和微观结构变化的对比研究。试验结果表明, 水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰掺量分别为 20%, 1.5%, 10%, 6% 和 16% 时淤泥的固化效果最佳; 影响固化土强度的 5 个因素中, 水泥掺量影响最大, 石膏掺量影响最小。相比原状土样, 最优配比固化淤泥试样的渗透系数和孔隙率分别减小 81.0% 和 59.8%, 三轴不固结不排水试验的黏聚力和内摩擦角分别是原状土样的 3.8 和 4.9 倍, 固化淤泥的物理力学性能得到明显改善。

关键词: 淤泥改良; 固化剂; 物理力学性能; 微观结构

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)03-0031-06

利用固化剂对土体进行加固是目前软基处理中常用的一种方法。根据固化机理, 土体固化剂可分为有机化合物类、无机化合物类、生物酶类及复合型固化剂等。其中水泥、石膏、石灰、各类矿渣以及粉煤灰等无机化合物类固化剂具有材料成本低, 易于就地取材, 性能稳定等优点, 目前在软土地基加固中应用广泛, 对此开展的相关研究也很多。黄新等^[1-2]针对软土在固化机理方面开展了研究; 在固化土的强度和变形等宏观方面, 王振军等^[3-5]通过试验对不同类型固化剂加固土的力学性能进行了探讨分析; 唐朝生等^[6-11]开展了加固软土微观结构变化、变形计算模型等方面的研究。由于淤泥不同的沉积环境造成其物质成分及含量不同, 结构构造差异明显, 固化加固时适宜的固化剂类型、掺量、处理效果等也存在显著差别, 采用传统的单一固化剂, 固化效果不佳, 因此有必要针对工程现场淤泥的特点, 开展不同固化剂共同作用下固化淤泥的物理力学性能研究。

广州南沙港位于珠江口伶仃洋喇叭湾湾顶, 龙穴岛内东南侧, 土质为第四纪河相和海相交错沉积软土层^[12], 地下水位高, 整个场地地表以下均分布有淤泥层, 平均厚度约 10 m, 孔隙比最大达 3.0, 含水量超过 75%, 全部需要加固处理。软基处理与基础工程问题已成为该区域土建中最关键的技术问题。某油罐仓储区位于南沙港区东南侧, 仓储区总面积约 67.2 万 m², 其中一期工程需要处理的软基面积为 14.9 万 m²。该工程区原为滨海水塘, 软基处理范围内地质条件很差, 整个处理场地为淤泥层, 不排水抗剪强度低至 7.5 kPa。拟采用水泥为主的多种固化剂对淤泥进行加固改良, 为了保证加固质量, 在大面积地基处理前, 取现场典型土样进行室内试验研究, 通过加固土体强度研究不同固化剂掺量对淤泥的加固效果, 找到最佳的固化剂掺量, 并通过对比加固土及原状土加固前后力学性能和微观结构变化的对比研究, 了解土体加固效果, 作为现场大面积加固施工时固化剂掺量调整的依据。

收稿日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178122)

作者简介: 张丽娟(1969—), 女, 辽宁辽阳人, 副教授, 主要从事软土工程性质、边坡工程, 桩基础等方面的教学与科研工作。E-mail: zhanglijuan1969@126.com

1 试验材料和方案

1.1 试验材料

1.1.1 淤泥土样 本试验土样取自油罐仓储区。根据室内试验测定结果,土样物理力学指标见表 1。

表 1 淤泥土样的物理力学指标

Tab. 1 Physico-mechanical parameters of the soft sample

土样名称	含水量/%	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比	液限/%	塑限/%	黏聚力/kPa	摩擦角/ $^{\circ}$
淤泥	74.8	1.61	2.087	58.9	31.8	4.82	6.5

1.1.2 固化剂 试验所用 5 种固化剂有水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂。其中主固化剂为南京江南水泥厂的 32.5#普通型硅酸盐水泥;其余为上海海易建筑装饰材料厂的生石膏粉和提纯的生石灰块,长沙江山建材外加剂厂的“江山牌”FDN-1 型早强高效减水剂,天津北辰方正试剂厂的分析纯硅酸钠。

1.2 试样的制备和养护

将充分搅拌的固化土分层装入到三瓣模并击实,制作成直径 40 mm,高 80 mm 的试样,将三瓣模连同试样放在温度 18 $^{\circ}C$,相对湿度 50%的恒温箱中养护 24 h 然后脱模,将脱模后的试样用塑料保鲜袋密封并编号记录后置于水槽中养护至龄期,养护温度控制在 20 $^{\circ}C$,相对湿度为 90%。

1.3 试验方案

1.3.1 单掺试验 为了初步确定水泥、石灰、石膏、减水剂和水玻璃对固化效果的影响规律和掺量范围,进行了不同掺量单掺配比的 7 d 无侧限抗压强度试验。单掺试验配比方案见表 2。

表 2 单掺试验配比方案

Tab. 2 Mixing proportion of a single additive

掺量水平	固化剂掺量/%					掺量水平	固化剂掺量/%				
	水泥	减水剂	水玻璃	石膏	石灰		水泥	减水剂	水玻璃	石膏	石灰
1	3	0.3	1.5	1.5	1.5	5	12.5	1.25	10	10	10
2	5	0.5	3	3	3	6	15	1.5	12.5	12.5	12.5
3	7.5	0.75	5	5	5	7	17.5	1.75	15	15	15
4	10	1.0	7.5	7.5	7.5	8	20	2.0	17.5	17.5	17.5

1.3.2 正交试验 为了最优选择配方中各固化剂的掺量水平,进行了 5 因素 4 水平试验。所选用的因素及其掺量水平和龄期为 7 d 和 14 d 试样的试验方案见表 3,试验各 16 组,总计 32 组,每组试验制备 3 个平行试样,结果取 3 个平行试样的平均值,共需要 96 个试样。

表 3 龄期 7 d 和 14 d 试样的正交试验方案

Tab. 3 Test plan of samples of 7 days and 14 days

试验编号	影 响 因 素					试验编号	影 响 因 素				
	水泥掺量/%	减水剂掺量/%	水玻璃掺量/%	石膏掺量/%	石灰掺量/%		水泥掺量/%	减水剂掺量/%	水玻璃掺量/%	石膏掺量/%	石灰掺量/%
1	8	0.5	5	6	6	9	15	0.5	10	14	8
2	8	0.8	8	10	8	10	15	0.8	12	12	6
3	8	1.2	10	12	12	11	15	1.2	5	10	15
4	8	1.5	12	14	15	12	15	1.5	8	6	12
5	12	0.5	8	12	15	13	20	0.5	12	10	12
6	12	0.8	5	14	12	14	20	0.8	10	6	15
7	12	1.2	12	6	8	15	20	1.2	8	14	6
8	12	1.5	10	10	6	16	20	1.5	5	12	8

1.3.3 物理力学性质试验 取最优和次优配比的固化淤泥试样及原状淤泥试样,对加固前后的试样进行变水头渗透试验、三轴不固结不排水剪试验、直剪与快剪试验,进一步研究优化配比固化淤泥土的加固效果。

1.3.4 微观试验 随着微观电子技术的发展,如扫描电镜等技术被陆续引入到土的微观结构研究领域,使得开展土体微观结构特征与工程特性之间关系的研究成为可能^[6-7]。为了进一步研究固化淤泥的性质,揭示土体微观结构变化和宏观力学响应之间的关系,取最优和次优配合比的固化淤泥试样和淤泥原状试样进行电镜扫描试验,以对比研究固化淤泥与原状淤泥微观结构。

2 试验结果分析

2.1 单掺和正交试验结果

2.1.1 单掺试验 7 d 无侧限抗压强度试验 根据表 2 方案,不同种类及不同掺量的固化剂共分 40 组来进行试验,每组平行 3 次试验,7 d 无侧限抗压强度试验结果见图 1。由图可见,不同种类固化剂的掺量不同,对 7 d 无侧限抗压强度的影响不同。随着水泥掺量的增加,抗压强度几乎呈线性增大。减水剂掺量较小时,强度随掺量增加而增大,当掺量达 0.8% 时强度达最大值 432 kPa,而后随着掺量增大,强度有所降低。石膏和水玻璃掺量较小时,随着掺量增大,强度增加较快;当掺量较大时,强度增加缓慢。石灰掺量由 0.8% 增大到 5% 时,强度增加很快,后随掺量增大,强度变化缓慢,当掺量达 7.5% 时,强度比掺量为 5% 时降低。根据单掺试验结果可见,主固化剂水泥掺量越大,对提高强度越有利,但考虑到经济因素,在固化剂掺量的正交试验中,水泥掺量选取了如表 3 所示的 4 个含量指标。同时根据其他几种固化剂对强度影响的分析,最终选取如表 3 所示的各个固化剂的掺量作为正交试验的配合比。

2.1.2 正交试验 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度试验 根据表 3 方案,试样 7 d 和 14 d 无侧限抗压强度试验结果见图 2。可见 14 号试验的 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度均为最高,其试验条件为 $A_4B_2C_3D_1E_4$,即配比为:水泥掺量 20%,减水剂掺量 0.8%,水玻璃掺量为 10%,石膏掺量为 6%,石灰掺量为 15%;13 号试样的 28 d 无侧限抗压强度为次高,其试验条件为 $A_4B_1C_4D_2E_3$,即配比为:水泥掺量 20%,减水剂掺量 0.5%,水玻璃掺量为 12%,石膏掺量为 10%,石灰掺量为 12%。根据各试样无侧限抗压强度的实测结果,可得 5 种固化剂 4 个不同掺量水平下的 7 d 和 28 d 平均无侧限抗压强度见图 3。同样可以看出,试验条件为 $A_4B_2C_3D_1E_4$ 时 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度均为最高。试验中可以用各因素极差的大小来衡量试验中相应因素作用的大小,极差大,说明它的不同掺量水平对强度所造成的影响大,往往是重要的因素,反之,极差小的通常是次要因素。对于 7 d 无侧限抗压强度而言,5 个因素的极差分别为:水泥 495 kPa,减水剂 240 kPa,水玻璃 193 kPa,石膏 125 kPa,石灰 195 kPa。按照极差的大小可知,在本次试验中,影响固化土 7 d 强度因素的主次顺序为:水泥掺量是影响强度的主要因素,减水剂掺量和石灰掺量是重要因素,水玻璃掺量的影响次之,石膏影响则最小。根据 14 d 无侧限抗压强度结果可以得到同样的结论。

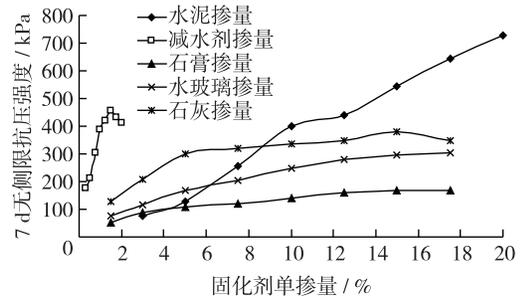


图 1 单掺试验 7 d 无侧限抗压强度

Fig. 1 Unconfined strength of single additive test for 7 days

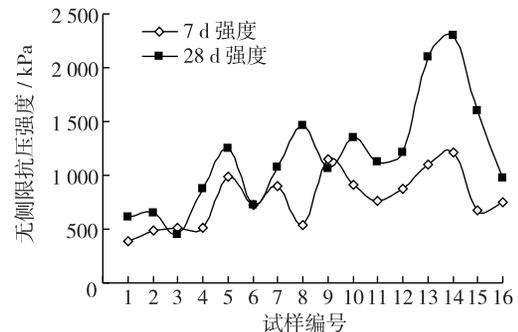


图 2 正交试验 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度

Fig. 2 Unconfined strength of orthogonal test for 7 and 28 days

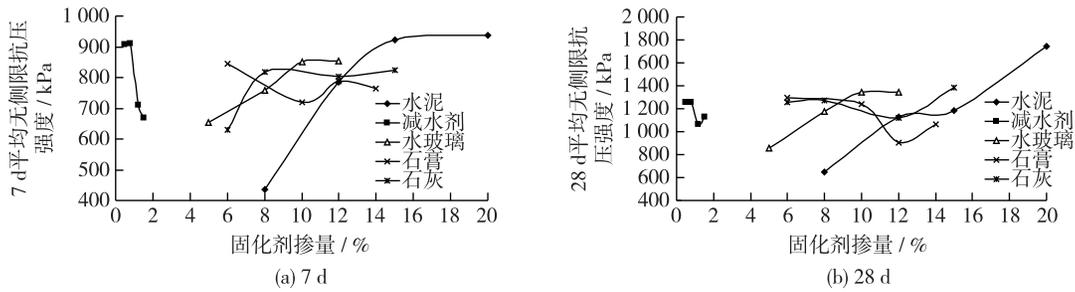


图 3 各因素四水平掺量 7 d 和 28 d 平均无侧限抗压强度

Fig. 3 Average unconfined strength of 4 different mixing proportions for 7 and 28 days

2.2 物理力学试验结果

根据固化土 7 d 和 14 d 无侧限抗压强度测试结果可知,当水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰掺量分别为 20%, 0.8%, 10%, 6% 和 15% 时强度最高、配比最优,掺量为 20%, 0.5%, 12%, 10% 和 12% 时配比次优。据此,本文以最优、次优配比的固化淤泥试样和原状淤泥试样为研究对象,进行了淤泥加固前后的变水头渗透试验、三轴不固结不排水剪试验、直剪切快剪试验对比,试验结果见表 4。

由表 4 可见,次优配比和最优配比固化淤泥与原状淤泥相比,渗透系数分别减少 72.8% 和 81.0%,而抗剪强度指标大大提高,三轴不固结不排水剪试验的内聚力 c 分别为原状淤泥的 3.6 和 3.8 倍,内摩擦角 φ 为 3.8 和 4.9 倍,直剪试验快剪的 c 分别为原状淤泥的 3.4 和 4.3 倍, φ 分别为原状淤泥的 3.5 和 3.6 倍,固化淤泥的物理力学性质指标明显提高。

表 4 固化淤泥与原状淤泥物理力学指标对比

Tab. 4 Comparison of physical-mechanical properties of unconsolidated and consolidated soft soil

淤泥土样	变水头 渗透试验 $k/(10^{-6} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	三轴压缩 试验(UU)		直接剪切 试验	
		c_u/kPa	$\varphi_u/^\circ$	c/kPa	$\varphi/^\circ$
原状淤泥	4.098 6	4.8	6.5	7.2	8.2
次优配比固化淤泥	1.113 0	17.3	24.8	24.6	28.3
最优配比固化淤泥	0.779 5	18.1	31.7	31.2	29.9

2.3 电镜扫描微观试验结果

利用环境电子显微镜(ESEM)观测淤泥固化前后土样的微观结构,用显微照片分析淤泥加固前后的孔隙率等微结构特征及其变化规律。对最优、次优配合比的固化试样和淤泥原状试样分别进行电镜扫描,放大倍数依次为 600, 1 000 和 2 000 倍,淤泥原状样、最优、次优配合比固化淤泥试样的 2 000 倍的二值处理后的 ESEM 图片见图 4。

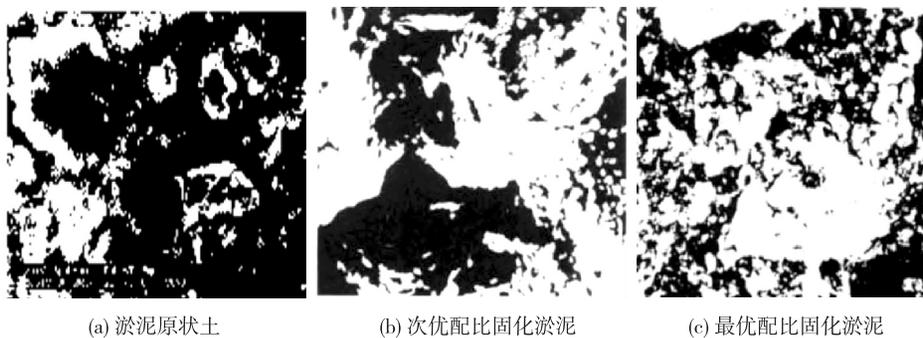


图 4 二值化处理后的试样 ESEM 图像(2 000 倍)

Fig. 4 ESEM pictures of samples (2 000 times)

有研究^[8]表明,珠江三角洲地区软土的结构可划分为蜂窝状、海绵状、骨架状、絮状和凝块状等 5 种结构类型,通过对以上 5 种类型软土微观结构代表性照片与图 4 所示照片的对比分析,结合相关研究成果^[8,10-11],本研究选取孔隙率、孔隙平均面积、颗粒个数、孔隙分布分维和颗粒分布分维 5 个参数来定量研究

淤泥加固前后微观结构的变化。淤泥原状试样、最优和次优配合比固化试样的5个微观结构特征参数如表5所示。从表5可见,最优和次优配比固化淤泥的孔隙率分别为原状淤泥的40.2%和42.4%,而颗粒个数则分别是原状淤泥的3.6和2.9倍。由此可见,固化后淤泥内部孔隙减少,宏观上则表现为土体强度的提高。本研究中若最优配比固化淤泥较原状淤泥孔隙率减小一半,则其三轴UU试验的 c 和 φ 相应提高2.3和3.2倍。由于不同地区淤泥不同的沉积环境造成其物质成分及含量不同,结构构造差异明显,因此建立区域性土微观结构变化与宏观力学表现之间的定量关系,值得进一步探讨和研究。

3 结 语

针对广州南沙港某油罐仓储区的典型淤泥,以水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂为固化剂对淤泥进行了单掺和正交加固试验研究,结果表明:

- (1) 水泥掺量20%,减水剂掺量0.8%,水玻璃掺量为10%,石膏掺量为6%,石灰掺量为15%时的配比为最优配比,试样7d和28d的强度均为最高;
- (2) 影响固化土强度的5个因素中水泥掺量是最主要的,其次分别为减水剂、石灰、水玻璃和石膏掺量;
- (3) 加固后淤泥试样在宏观上表现为渗透系数减小,强度提高,微观上表现为孔隙减少。次优和最优配比固化淤泥渗透系数分别为原状淤泥的27%和19%,三轴UU试验的内聚力 c 分别为原状淤泥的3.6和3.8倍,内摩擦角 φ 为3.8和4.9倍,ESEM结果显示最优和次优配比固化淤泥孔隙率较原状淤泥减少了59.8%和57.6%。

参 考 文 献:

- [1] 黄新,周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62-68. (HUANG Xin, ZHOU Guo-jun. Hardening mechanism of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(1): 62-68. (in Chinese))
- [2] 李琴,孙可伟,徐彬,等. 土壤固化剂固化机理研究进展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(9): 64-67. (LI Qin, SUN Ke-wei, XU Bin, et al. Progress and application on curing mechanism of soil stabilizer[J]. Materials Review, 2011, 25(9): 64-67. (in Chinese))
- [3] 王振军,翁优灵,杜少文. 矿渣粉加固粉土的理论分析及路用性能研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 709-714. (WANG Zhen-jun, WENG You-ling, DU Shao-wen. Theoretical analysis and field performance of silt soil reinforced with slag powder[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 709-714. (in Chinese))
- [4] 汪春荣,李春,乔宝,等. 石膏对矿渣路面基层水泥性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(2): 57-60. (WANG Chun-rong, LI Chun, QIAO Bao, et al. Effect of gypsum on the cement for road base and surface with slag[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(2): 57-60. (in Chinese))
- [5] 刘小兰,汪益敏. 南宁膨胀土工程特性及化学加固试验研究[J]. 路基工程, 2010(3): 26-28. (LIU Xiao-lan, WANG Yi-min. Experimental study on engineering characteristics and chemical consolidation of Nanning expansive soil[J]. Subgrade Engineering, 2010(3): 26-28. (in Chinese))
- [6] 唐朝生,施斌,王宝军. 基于SEM土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, WANG Bao-jun. Factors affecting analysis of soil microstructure using SEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 560-565. (in Chinese))
- [7] 薛茹,胡瑞林,毛灵涛. 软土加固过程中微结构变化的分形研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 87-91. (XUE Ru,

表5 固化淤泥与原状淤泥的微观结构特征参数

Tab. 5 Microstructure parameters of unconsolidated and consolidated soft soil

淤泥土样	孔隙率	孔隙 个数	颗粒 个数	孔隙分 布分维	颗粒分 布分维
原状淤泥	0.681	321	108	1.885	1.624
次优配比固化淤泥	0.289	93	310	1.688	1.845
最优配比固化淤泥	0.274	68	385	1.673	1.851

- HU Rui-lin, MAO Ling-tao. Fractal study on the microstructure variation of soft soil in consolidation process[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 87-91. (in Chinese))
- [8] 周翠英, 林春秀. 基于微观结构的软土变形计算模型[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(1): 16-20. (ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu. Research on deformation calculation model of soft soil based on microstructure[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(1): 16-20. (in Chinese))
- [9] PUSCH R. Experience from preparation and investigation of clay microstructure[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1): 187-194.
- [10] 王宝军, 施斌, 蔡奕, 等. 基于 GIS 的黏性土 SEM 图像三维可视化与孔隙度计算[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 251-255. (WANG Bao-jun, SHI Bin, CAI Yi, et al. 3D visualization and porosity computation of clay soil SEM image by GIS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 251-255. (in Chinese))
- [11] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 基于 SEM 和 MIP 试验结构性黏土压缩过程中微观孔隙的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 406-412. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Evolution of microscopic pore of structured clay in compression process based on SEM and MIP test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 406-412. (in Chinese))
- [12] 陈晓平, 黄国怡, 梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 137-141. (CHEN Xiaoping, HUANG Guo-yi, LIANG Zhi-song. Study on the soft soil properties of the Pearl River delta[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 137-141. (in Chinese))

Physico-mechanical properties and changes in microstructure of silt before and after solidification in Nansha port

ZHANG Li-juan, LIU Ren-zhao

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to find out the best additive portion of soft foundation treatment for a petroleum storage project located in Guangzhou Nansha harbor area, the typical soft sludge was selected and solidified experiment was conducted with the additive agent of cement, lime, gypsum, sodium silicate and water-reducer, and the treatment result and the best additive portion were got, the changes of the mechanical properties and microstructure of the soft sludge before and after consolidated were compared and studied based on the unconfined compressive strength. Test results show that 20%, 1.5%, 10%, 6% and 16% of cement, lime, gypsum sodium silicate and water-reducer are the best proportion, and among these 5 factors affecting the strength of the solidified soft sludge, the cement addition has become a most important influence factor and the gypsum addition is the minimum. Comparing with unconsolidated sludge soft sample, the penetration coefficients and void ratio of the best additive portion solidified sample are reduced by 81.0% and 59.8%, and C and φ of UU shear tests are of 3.8 and 4.9 times. The physico-mechanical properties of the solidified soft sludge are enhanced obviously.

Key words: sludge consolidation; solidified agent; physico-mechanical properties; macrostructures