

文章编号:1671-6833(2012)05-0016-06

围海造地软基加固试验研究

朱群峰¹, 赵士文², 杨守华¹, 胡为贤², 张凌¹, 高长胜¹

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 南京瑞迪建设科技有限公司 水科院 勘测设计院, 江苏 南京 210029)

摘要: 围海造地形成的吹填淤泥地基具有含水率高、压缩性高、强度极低等特点, 对工程使用极其不利, 必须进行加固处理. 结合某工程, 采用真空预压法对吹填淤泥地基进行加固, 同时布置原观仪器进行现场试验研究. 位移监测结果表明试验区实测地表沉降量达 1 616 mm, 地基加固结束时的平均固结度达 86%, 工后沉降小于 300 mm; 水平位移小于 10 mm; 吹填淤泥单位厚度的压缩量达 267 mm/m, 属于大变形的范畴; 真空度和孔隙水压力监测结果表明真空度在吹填淤泥地基中的传递存在较大的沿程损失; 地基加固效果检测结果表明加固后的吹填淤泥平均十字板强度达 15.2 kPa; 吹填淤泥的土性指标得到了不同程度的改善; 地基承载力大于 60 kPa; 地基加固达到了预期的效果. 探讨了真空预压加固吹填淤泥地基存在的问题, 建议进一步开发土工水箱来改进吹填淤泥地基加固方法.

关键词: 吹填淤泥; 真空度; 工后沉降; 承载力; 土工水箱

中图分类号: TU472.6 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.004

0 引言

人多地少、土地资源日趋紧张是我国的一项基本国情, 为了缓解这一矛盾, 沿海各地都兴起了围海造地的高潮. 进入 21 世纪以来, 从渤海海湾到深圳沿海, 围海造地面积超过数百 km²^[1]. 如何快速高效地对围海造地形成的吹填淤泥地基进行加固, 是摆在岩土工作者面前的重要课题^[2].

目前比较流行的围海造地方法是利用开山石料等在海滩上形成围堤, 然后就近吹填海滩淤泥或航道疏浚淤泥形成陆域, 利用吹填淤泥形成的地基具有含水率高、压缩性高、强度极低等特点, 无法满足工程使用的基本要求, 必须进行地基加固^[3]. 作者结合工程对吹填淤泥地基加固进行试验研究, 以期能对类似工程有所帮助.

1 试验概况

1.1 工程概况

拟建项目位于东南沿海地区, 地理位置非常优越, 滩涂资源十分丰富, 潜在的土地储备资源达 14.5 km². 本地块造地工程主要目标是利用现有海堤内侧废弃盐田及堤外滩涂淤泥吹填造地, 总造地面积近百万 m². 项目实施后, 所形成的土地可为工程建设提供场地.

1.2 地质概况

场地地基自上而下依次为吹填淤泥、原地基淤泥、粉质黏土、残积土、全风化岩等地层组成, 其中主要不良土层为吹填淤泥层, 分布于整个场地表面, 厚度变化较大(5~7m), 其主要物理力学性指标见表 1.

表 1 淤泥层的主要物理力学性指标

Tab. 1 Main physical and mechanical indices of silt layers

地层名称	w/%	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e	$C_v/(10^{-4} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	C_{cu}/kPa	$\phi_{cu}/(^{\circ})$
吹填淤泥	120	14.0	3.2	2.0	13.5	12.0
原淤泥层	70.0	16.0	1.8	3.0	13.6	12.8

收稿日期: 2012-03-28; 修订日期: 2012-05-17

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009052); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点资助项目(Y300901)

作者简介: 朱群峰(1966-), 男, 湖北罗田人, 高级工程师, 工程硕士, 国家注册咨询工程师(投资), 主要从事软基处理研究工作. E-mail: qfzhu@nhri.cn.

1.3 地基处理方案

设计采用真空预压法对吹填淤泥地基进行加固.要求地基加固后的地基承载力不小于 60 kPa,工后沉降小于 300 mm.

具体施工工序为先铺一层土工布和两层土工格栅,再铺设 1.0 m 厚中粗砂垫层,然后机械进场插设塑料排水板,排水板间距为 1.0 m,正方形布置,打穿淤泥层.排水板插设完毕即开始埋设滤管、埋设监测仪器、铺密封膜、安装抽真空设备、抽真空.

2 现场试验

2.1 监测及检测项目

试验区面积约 5 万 m²,布置的监测及检测项目主要有地表沉降、深层沉降、孔隙水压力、膜下真空度、排水板中真空度、土体真空度、土体深层水平位移、十字板试验、取土试验、载荷板试验等十项内容.

2.2 监测仪器布置

监测仪器布置在试验区中心区域吹填淤泥厚度较大处,仪器布置及现场检测试验数量见表 2.监测仪器布置剖面图见图 1.

表 2 监测仪器布置数量汇总表

Tab.2 Summary of monitoring instruments

序号	监测与检测项目	单位	数量
1	地表沉降	点	1
2	孔隙水压力	点	4
3	排水板中真空度	点	4
4	膜下真空度	点	1
5	地基土体中真空度	点	4
6	土体分层沉降	孔	1
7	地质钻探	孔	2
8	十字板试验	孔	2 * 2
9	载荷板试验	点	2
10	土体深层水平位移	孔	1

3 试验结果分析

3.1 地表沉降

3.1.1 荷载

抽真空 10 d 后,膜下真空度达到 80 kPa,膜上覆水深度因场地高差各处不等,按平均覆水深度为 50 cm 计算,则总的预压荷载为 85 kPa.

3.1.2 实测沉降

实测地表沉降结果见表 3,主要包括抽真空沉降和前期沉降两部分内容.沉降过程线及沉降

速率过程线见图 2 ~ 图 3,从图表中可以看出,实测沉降量达 1 616 mm,最大沉降速率为 29.5 mm/d.抽真空后期,沉降速率连续 10 d 以上小于 2 mm/d,沉降趋于稳定.

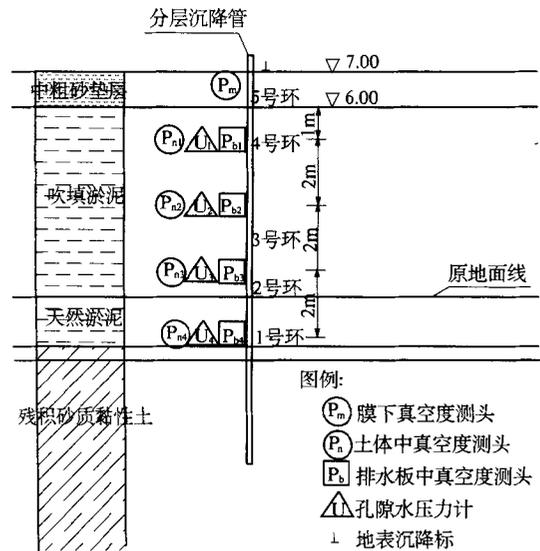


图 1 监测仪器布置剖面图

Fig.1 Section of layout of monitoring instruments

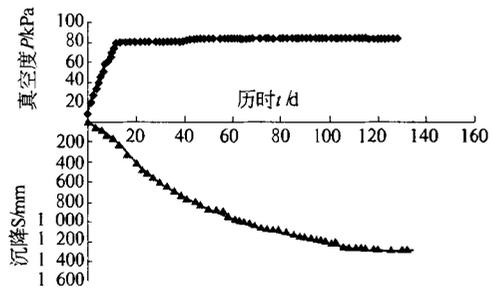


图 2 实测地表沉降过程线

Fig.2 Hydrograph of measured surface settlement

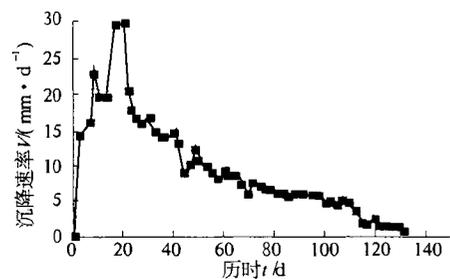


图 3 实测地表沉降速率过程线

Fig.3 Hydrograph of speed rate of measured surface settlement

表 3 实测地表沉降汇总表

Tab.3 Measured data of surface settlement

沉降分类	抽真空沉降/	前期沉降/	总沉降/
	mm	mm	mm
沉降结果	1 300	316	1 616

3.1.3 沉降、固结度计算分析

根据地基加固时观测到的地面沉降或地基土分层沉降时间过程线推算地基的最终沉降量,常采用指数曲线法、双曲线法等进行推算^[4-5].采用双曲线法推求最终沉降可以最大限度地利用观测资料,减少任意性,使计算结果更趋合理.双曲线法是假定满载(真空度 ≥ 80 kPa)后的沉降曲线呈双曲线,则下式成立.

$$t' = a + bt'/S'. \quad (1)$$

式中: $t' = t - t_0$; $S'_\infty = S - S_0$; t_0 、 S_0 为真空度达到设计要求(≥ 80 kPa)后沉降曲线的起点.从上式可知,当 t 趋于 ∞ 时, $S'_\infty = b$,进而求得最终沉降量 $S_\infty = S_0 + S'_\infty$.根据实测沉降曲线推求最终沉降量过程线见图4,推算结果见表4.

对于单向固结地基,土层的平均固结度可用下式表示^[6].

$$U = \frac{S_t}{S_\infty}. \quad (2)$$

式中: S_t 为经过时间 t 后的地基沉降; S_∞ 为地基的最终沉降量.

按(2)式来计算固结度,计算结果见表4.

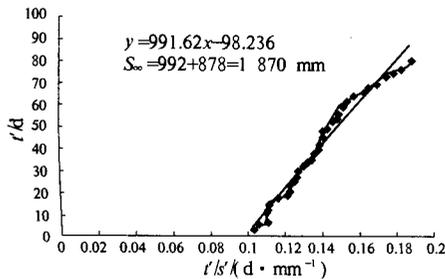


图4 实测地表沉降推求最终沉降量过程线
Fig.4 Hydrograph of calculated final settlement based on measured surface settlement

表4 沉降、固结度汇总表

Tab.4 Summary of settlement and degree of consolidation

类别	实测总沉降/mm	推求最终沉降/mm	工后沉降/mm	推求固结度/%
结果	1 616	1 870	254	86

从表中可以看出,在预压荷载作用下,地基加固结束时的平均固结度达86%,工后沉降小于300 mm,达到了预期的地基加固效果.

3.2 膜下真空度

实测膜下真空度过程线见图5.从图上可以看出,抽真空10 d后,膜下真空度上升到80 kPa以上,实测最大真空度达86 kPa,真空度维持在

80 kPa 以上的时间超过3个月.说明密封效果良好.

3.3 排水板中真空度

实测板中真空度过程线见图5.从图上可以看出,板中真空度明显小于膜下真空度,板中真空度沿深度衰减,可见真空度在传递过程中明显存在沿程损失.

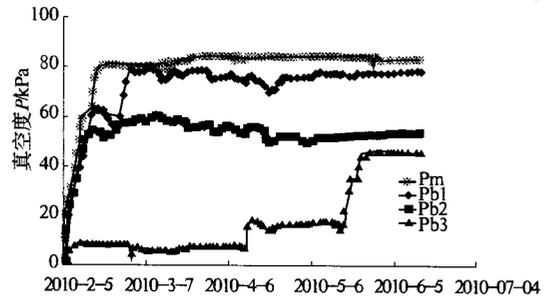


图5 膜下和排水板中真空度随时间变化过程线

Fig.5 Variation of vacuum degrees under membrane and in drainage plate with time

3.4 淤泥中真空度

实测淤泥中真空度过程线见图6.从图中可以看出,淤泥中真空度明显存在一个启动过程,即膜下真空度达到80 kPa并稳定一段时间后,淤泥中才有真空度出现,且沿深度递减,说明真空度在吹填淤泥中的传递比较困难,并存在明显的沿程损失.

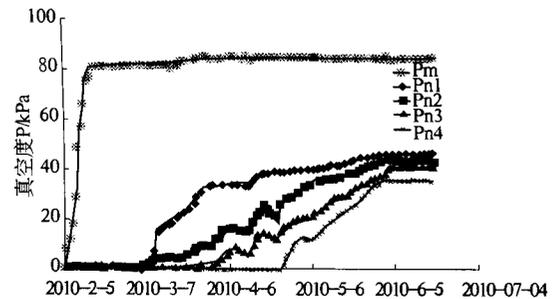


图6 淤泥中真空度随时间变化过程线

Fig.6 Variation of vacuum degrees in silt with time

3.5 孔隙水压力

实测超静孔隙水压力过程线见图7.从图上可以看出,随着真空度的上升孔隙水压力一直处于下降状态,抽真空后期渐趋稳定,表现出良好的规律性.埋深较浅的孔压迅速下降,实测超静孔压最大值为66 kPa;埋深较浅的孔压值降低幅度明显大于埋深较深的,说明真空度在淤泥中的传递沿深度衰减.

3.6 分层沉降

分层沉降由预设在深层沉降管外的沉降环测得,不同深度的环所测得的沉降值即为此深度以下土体发生的沉降.接近原地面的 5 号沉降环(顶环)的实测沉降即相当于地表沉降,埋设最深的 1 号沉降环(底环)的实测沉降即相当于下卧层的沉降,两环之间的沉降即为主要压缩层(吹填淤泥)所发生的沉降.顶环、底环的实测沉降见表 5,实测分层沉降过程线见图 8.

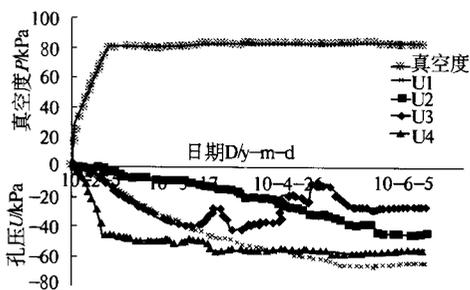


图 7 孔隙水压力随时间变化过程线

Fig. 7 Variation of pore water pressures with time

表 5 分层沉降观测结果

Tab. 5 Observed results of layered settlement

历时/ d	底环沉 降/mm	顶环沉 降/mm	吹填淤泥压 缩量/(mm·m ⁻¹)	备注
179	97	1 567	267	吹填淤泥厚 度为 5.5 m.

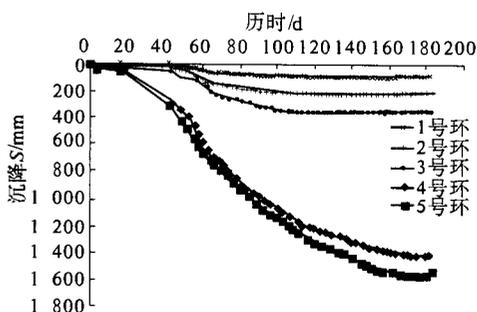


图 8 分层沉降随时间变化过程线

Fig. 8 Variation of layered settlement with time

从图表中可以看出,下卧层的压缩量小于 100 mm,占整个压缩量的比例很小.吹填淤泥单位厚度的压缩量达 267 mm/m,说明实测沉降主要来自处于流态的吹填淤泥,其变形问题属于大变形范畴^[7],尽快建立简捷实用的吹填淤泥沉降计算模型,对于解决目前沿海地区普遍存在的吹填淤泥地基加固工程问题具有极其重要的意义.

3.7 水平位移

实测水平位移见表 6,深层水平位移随时间变化过程线见图 9.

表 6 水平位移观测结果

Tab. 6 Observed results of horizontal displacement

最大位移/ mm	最大位移 深度/m	最大位移速 率/(mm·d ⁻¹)
9.7	1	1

注:测斜管位于淤泥搅拌桩所形成的密封墙体外 1.5 m 处.

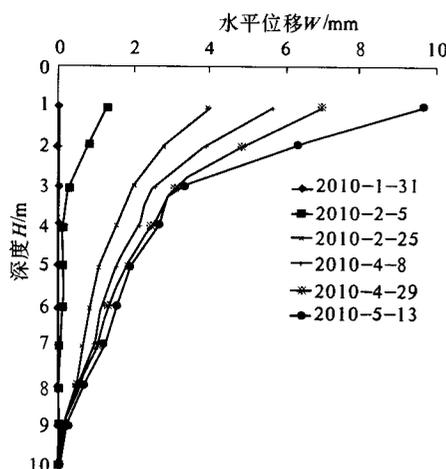


图 9 深层水平位移随时间变化过程线

Fig. 9 Variation of deep horizontal displacement with time

从图表中可以看出,水平位移和位移速率都不大,这主要是由于加固区周边淤泥搅拌桩所形成的宽度达 1.2 m 的密封墙体对水平位移的发展起到了很好的限制作用,大大降低了水平位移对周边环境造成的负面影响.

4 加固效果检验

4.1 实测十字板强度

现场十字板剪切试验结果见表 7,十字板强度沿深度分布曲线见图 10.表中强度均为吹填淤泥的平均十字板强度.从表中可以看出,地基加固后十字板强度有较大幅度的增长,地基加固效果明显.

表 7 现场十字板强度试验结果汇总

Tab. 7 Summary of field vane strength tests kPa

加固 前	加固 后	实测 增量	计算 增量	备注
0.9	15.2	14.3	16.9	理论计算时取 $P = 85$ kPa, $U = 86\%$, $\phi_{cu} = 13^\circ$

4.2 强度推算

强度增长可以近似用下式推算^[8-9]:

$$\Delta S_u = PU \tan \phi_{cu}. \quad (3)$$

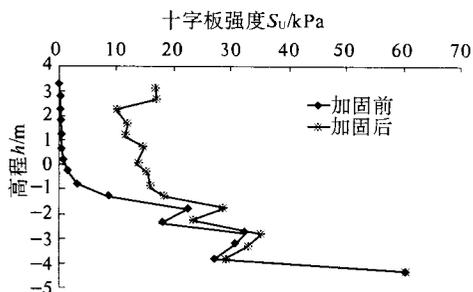


图10 地基加固前后十字板强度沿深度变化曲线
Fig. 10 Variation of vane strengths before and after foundation reinforcement with depth

$$S_u = \eta(S_{u0} + \Delta S_u) = \eta(S_{u0} + PU \tan \varphi_{cu}) \quad (4)$$

式中: S_u 为十字板强度; ΔS_u 为强度增长量; η 为强度折减系数, 一般取 0.75 ~ 0.90; P 为压力; U 为固结度; φ_{cu} 为固结不排水摩擦角。

理论强度增长量计算结果见表 7。可以看出, 实测平均强度增长量小于理论计算值, 分析原因, 很可能是因为真空度在吹填淤泥中的传递比较困难所致。

4.3 取样试验

地基加固前后分别在现场取原状土进行室内试验, 比较加固前后的土性指标变化情况, 可对地基加固效果作出评价^[10]。地基加固前后土性指标试验结果见表 8, 试验结果表明, 地基加固后的土性指标得到了不同程度的改善, 地基加固效果明显。

表 8 加固前后淤泥土性指标

Tab. 8 Indices of silt before and after reinforcement

项目	含水率/ 单位	湿密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙比	备注
加固前	120	14	3.2	各指标为试验结果平均值, “-”表示减少
加固后	68	15.8	1.94	
增长量	-52	1.8	-1.26	

4.4 载荷试验

真空预压结束后, 铺 0.5 m 厚开山土整平压实后进行载荷试验。载荷试验加荷方式按慢速法进行, 载荷板尺寸为 1.5 m × 1.5 m。载荷试验曲线见图 11 ($P-S$ 曲线)。从图上可以看出, $P-S$ 曲线没有出现明显的拐点, 根据规范^[11] 确定地基承载力, 地基承载力大于 60 kPa, 达到了预期的加固效果。

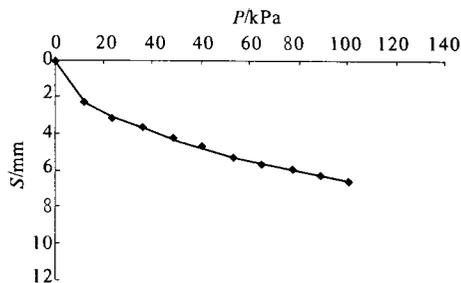


图 11 载荷试验 $P-S$ 曲线
Fig. 11 $P-S$ curve of loading tests

5 吹填淤泥地基加固问题探讨

围海造地形成的吹填淤泥地基, 目前比较流行的做法是采用真空预压来进行加固。真空预压的最大优点是施工方便, 加荷速度快, 预压过程中不存在地基失稳问题, 浅层加固能取得比较满意的效果^[12]。但从上面的分析中不难看出, 真空度在吹填淤泥中的沿程损失还是比较大的; 地基加固后的强度还难以满足更高使用要求的工程; 大面积的真空预压需要消耗大量的电能, 在电力比较紧张的地区可能难以得到保障; 吹填淤泥进行真空预压后, 发现排水板周围存在淤泥抱团现象^[3], 不利于真空度的传递, 这些都是真空预压加固大面积吹填淤泥地基存在的不足之处。

对于大面积的围海造地软基加固工程, 如果能做到早规划, 进一步开发出可循环利用的土工水箱^[13], 充分利用沿海地区充足的海水资源来进行充水预压, 将会大大节约地基加固成本, 让目前比较棘手的围海造地软基加固问题不再成为难题。

6 结束语

试验区实测地基沉降量达 1 616 mm, 主要发生在吹填淤泥层, 单位厚度的压缩量为 267 mm/m, 吹填淤泥地基变形问题属于大变形的范畴; 根据实测资料推求地基最终沉降量为 1 870 mm, 地基加固结束时的平均固结度达 86%, 预压荷载作用下的工后沉降小于 300 mm; 实测膜下真空度大于 80 kPa 的时间超过 3 个月, 排水板中真空度小于膜下真空度且沿深度衰减, 淤泥中真空度存在一个启动过程, 且明显小于板中真空度, 说明真空度的传递存在沿程损失; 实测水平位移小于 10 mm, 主要是因为淤泥搅拌桩所形成的密封墙体对地基的水平位移发展起到了很好的限制作用, 大大降低了真空预压对周边环境造成的负面

影响;抽真空期间,孔压值都有不同程度的减小,且埋深较浅的孔压减小的幅度明显大于埋深较深的,这也说明真空度在淤泥中的传递是沿深度衰减的;地基加固后吹填淤泥层的平均十字板强度达15.2 kPa,强度增长量达14.3 kPa;土性指标得到了不同程度的改善;地基承载力大于60 kPa;地基加固达到了预期的加固效果.探讨了真空预压加固大面积吹填淤泥地基存在的不足之处,建议进一步开发土工水箱来改进吹填淤泥地基加固方法.

参考文献:

- [1] 董志良,张功新,李燕,等.大面积围海造陆创新技术及工程实践[J].水运工程,2010(10):54-67.
- [2] 朱群峰,高长胜,杨守华,等.超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J].岩土工程学报,2010(9):1429-1433.
- [3] 唐彤之,黄家青,关云飞,等.真空预压加固吹填淤泥土现场试验研究[J].水运工程,2010(4):115-122.
- [4] 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1984:143-148.
- [5] 潘林有,谢新宇.用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J].岩土力学,2004(7):1053-1058.
- [6] 钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1988:91-95.
- [7] 朱群峰,汪璋淳,高长胜,等.新吹填淤泥地基加固试验研究[J].铁道工程学报,2011(11):40-45.
- [8] 赵维炳,刘家豪,高长胜,等.排水固结加固软基技术指南[C].北京:人民交通出版社,2005:25-26.
- [9] 齐永正,赵维炳.排水固结加固软基强度增长理论研究[J].水利水运工程学报,2008(6):78-83.
- [10] 南京水利科学研究院土工所,土工试验技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003:241-243.
- [11] GB 50021-2001,岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [12] 应舒,高长胜,黄家青.新吹填淤泥地基浅层处理试验研究[J].岩土工程学报,2010(12):1956-1960.
- [13] 赵维炳,陈振建,戴济群,等.工程排水与加固技术理论与实践[C]//第八届全国工程排水与加固技术研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2011:103-110.

Consolidation of Soft Foundation of Reclamation Projects

ZHU Qun-feng¹, ZHAO Shi-wen², YANG Shou-hua¹, HU Wei-xian², ZHANG Ling¹, GAO Chang-sheng¹

(1. Geotechnical Engineering Department of Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Design and Consulting Department of Nanjing R&D Tech Group Co. Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: The dredger fill of reclamation projects is characterized by high water content, high compression and low strength, etc., and it must be reinforced because of its adverse effects on projects. Based on a practical project, the dredger fill is consolidated by means of the vacuum preloading method. Field tests are performed by arranging in-situ instruments. According to the results of displacement monitoring, the ground surface settlement is 1616 mm, the average degree of consolidation may reach 86% at the end of foundation reinforcement, and the post-construction settlement is less than 300 mm. The horizontal displacement is less than 10 mm. The compressive deformation of dredger fill per unit thickness is 267 mm/m, and it belongs to large deformation. According to the results of degree of vacuum and power water pressure monitoring, the degree of vacuum which transmits in the dredger fill foundation has larger frictional loss. The average vane strength of the dredger fill after construction is 15.2 kPa. The indices of the dredger fill are improved to some extent. The bearing capacity of the foundation is more than 60 kPa, and the foundation consolidation is satisfactory. The existing problems in consolidating the dredger fill by use of the vacuum preloading method are discussed. It is suggested that the consolidation method for the dredger fill should be improved by developing the geotechnical water box.

Key words: dredger fill; degree of vacuum; post-construction settlement; bearing capacity; geotechnical water box