

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.010

改性真空预压结合覆水预压处理超软土试验

高明军^{1,2}, 孙召花², 刘志浩², 刘汉龙^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:结合某围海造地工程,采用无砂垫层改性真空预压结合覆水预压法对新吹填软土进行预处理,详细介绍施工工艺,提供了施工与试验中的多种技术参数。通过现场监测,对加固区的表面沉降、水平位移、分层沉降、孔隙水压力等规律进行分析。静力触探、十字板剪切试验及室内土工试验结果表明:该工法具有良好的地基处理效果,加固后原状淤泥的含水量降低、密度增大、孔隙比减小、压缩模量和直剪指标均有大幅度提高;与常规的软基处理方法相比,可缩短工期5~12个月,平均节约成本约40%,从而大幅度降低工程造价。

关键词:围海造地;改性真空预压;软基处理

中图分类号:TV223.2;S277.4⁺2 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2013)01-0053-06

Ultra-soft soil improvement via vacuum preloading without sand cushion overlying water

GAO Mingjun^{1,2}, SUN Zhaohua², LIU Zhihao², LIU Hanlong^{1,2}

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In a land reclamation project, modified vacuum preloading without sand cushion overlying water was performed to pre-treat the soft dredger fill. The details of this technology are introduced and the technical parameters for construction and tests are presented. The changing rules of surface settlement, horizontal displacement, lamination settlement, and pore water pressure were analyzed through field monitoring. The results of the static penetration test, the vane shear test, and the indoor soil test show that the technology is effective in soft ground treatment. After consolidation, the water content of the undisturbed silt decreased, the density increased, the void ratio decreased, and the compression modulus and direct shear improved significantly. Compared with conventional soft ground treatment methods, this technology can shorten the construction period by five to 12 months and reduce construction costs by 40%.

Key words: land reclamation; modified vacuum preloading; soft ground treatment

随着我国经济的发展,围海造地已成为缓解国土资源紧张、拓展生存空间的必然趋势,是现代社会建设发展的需要,因此大力发展围海造地具有十分重要的战略意义。开发与应用围海造地地基处理新技术,获得良好的地基处理效果,成为建筑、设计、岩土等工程界人士关注的重要课题。几十年来,国内外对围海造地进行了大量的探索和研究^[1-2],获得了很多宝贵的经验,尽管国内外围海造地在需求、管理等方面存在很大的差异^[3-4],借鉴国外先进的围海造地地基处理技术仍具有十分重要的意义。

围海软基通常为新吹填淤泥质土,具有“三高两低”(含水量高、灵敏度高、压缩性高、渗透性低、抗剪强度低)的特点^[5]。常规的堆载法^[6]、强夯法^[7]、深层搅拌桩技术^[8]、固化剂技术^[9]等工法在围海吹填场地地基处理中,由于不具备进场施工条件,以及加固效果差、工期长、造价高等因素,无法满足建设需要。因此迫切需要研制开发一种快速、高效、低价的新的软土地基处理方法。笔者结合温州某围海造地工程现场试验,

对大面积围海造地地基处理新技术——无砂垫层改性真空预压结合覆水预压法^[10]开展理论分析,进行施工设备、施工工艺、质量控制以及加固效果等方面的研究。所采用的改性真空预压结合覆水预压法解决了温州地区围海造地软基处理中砂源严重匮乏的不足,降低了工程造价,具有地基处理效果良好、加荷速度快、不易出现地基失稳等优点。

1 工程概况

本次无砂垫层改性真空预压结合覆水预压试验场地长为45.0 m,宽为22.2 m,面积为1 000 m²。场地位于温州市龙湾区永兴镇,东濒瓯江。拟建场地原为围垦淤积而成,现大部分场地均为养殖塘,地势较低,需进行吹填处理。除道路及堤岸地段分布有力学性质相对稍好的黏土层外,均为含细砂淤泥、淤泥层,为具有高压缩性、高孔隙比、低强度的软土,属软土地基。根据该场地大量工程的沉降观测和稳定验算,在天然地基上极限填土高度为1.8~2.2 m,地基最终沉降为0.6~2.8 m,需进行软基处理。拟建场地土类型属软弱场地土,场地类别为Ⅳ类,属抗震不利地段。场地除软土分布外未见其他不良地质作用,地基稳定性较好,适宜本工程建设。根据温州工程勘察院有限公司《温州民营科技产业基地(永兴南片)工程地质初步勘察报告》,将场地地基土在勘察深度范围内自上而下划分为7个工程地质层(其中②层细分为2个亚层),即:①细砂,②黏土,②₁含细砂淤泥,②₂淤泥,③淤泥质黏土,④粉质黏土,⑤黏土,⑥黏土。

2 围海软基处理施工工艺

2.1 施工方案

无砂垫层改性真空预压结合覆水预压法,包括铺设浮桥、改性真空预压以及结合覆水预压技术,主要技术步骤如下^[10]:(a)在围堤内的淤泥区上铺设浮桥;(b)在淤泥区上铺设塑料编织布,将其固定于围堤和浮桥上;(c)在塑料编织布上水平铺设排水支管,塑料排水板缠绕排水支管插入淤泥区的淤泥中;(d)在塑料编织布上水平铺设排水主管,走向与排水支管垂直,排水主管一端连接真空泵;(e)在排水主管及排水支管上铺设土工布,在土工布上铺设真空膜;(f)在真空膜上放置水荷载。

塑料排水板采用B型板,施打深度为2.5 m,排水板间距为1.0 m×1.0 m,采用人工插板的方法施工。在施打塑料排水板的同时开挖排水明沟(该明沟在负压密封降水施工中作为压膜沟,在下一步的井点降水或电渗降水施工中作为排水明沟)。塑料排水板施打结束后,布置真空吸水总管(为渗水波纹管),并采用无砂垫层真空预压超软土固结中的真空管变形控制结构,能够保证真空系统的排水和通气能力,消除膜下真空盲点^[11]。总管下开挖浅层盲沟,以利于总管置入后比地表稍低。塑料排水板与总管连接,连接方式为直僚式或滤套式。将排水总管理入盲沟内,并在盲沟上铺1层条状土工膜后垫平盲沟。在所需加固区域将排水总管根据真空泵抽负压的能力,1台泵形成1个回路连接,大面积施工时则可多台泵各自形成抽负压网络。最后铺设2层塑料密封膜,膜边缘置入四周压膜沟内,然后进行试抽压。循环开启30%的真空泵,试抽真空15 d,检查是否漏气并加强真空维护。在试抽真空15 d后正式满负荷开启真空泵,在真空压力达到80 kPa后持续稳压。开始膜上覆水50~100 cm,以增加预压水荷载,防止真空膜受太阳暴晒和大风侵蚀,延缓老化。覆水后开始各项现场监测,绘制沉降~时间关系曲线,待沉降稳定、符合卸载条件后,卸除真空荷载,拆除抽真空系统。

2.2 监测项目与点位布置

为对软基加固的机理进行研究,并为计算理论提供依据和设计参数,在施工过程中预埋一定数量的监测仪器,以对加固区的表面沉降、水平位移、分层沉降、孔隙水压力等变化规律进行研究。孔压计共埋12组,采取一孔一计的方法埋设,埋设位置和深度考虑下一步理论分析的要求。布置6个沉降板,每个泵区布置3个;布置1个分层沉降管、2个测斜管、1个水位观测管。

3 现场试验结果及分析

3.1 膜下真空度

现场真空度的测量是真空预压加固软基监测的重要内容,对工程设计、加固效果分析以及真空预压机理研究有着重要的作用。膜下真空度既能够反映真空水泵是否正常工作,也能够直观地反映出水泵的抽真空

效果。

为保证膜下真空度平衡,将场地分为 2 个泵区,每个水泵承担面积 500 km² 的区域。1 号、2 号泵区的膜下真空度时程如图 1(a)所示。为数据处理方便,图中均将 2008 年 11 月 9 日定为原点。2 个水泵工作持续到 2008 年 12 月 4 日,共工作 25 d(600 h)。

1 号泵于 2008 年 11 月 10 日 14:00 开泵工作(图 1(a)中第 24 小时处)。水泵工作持续到 2008 年 12 月 4 日,共工作 576 h,一直工作正常。可以看出,膜下真空度在抽真空初期增长速度较快,48 h 后基本趋于稳定。膜下真空度维持在 80 kPa 以上,稳定后的平均真空度为 87.2 kPa。

2 号泵于 2008 年 11 月 9 日 14:00(图 1(a)中原点)开泵工作。除了 11 月 10 日出现故障短暂停抽外,一直工作正常。膜下真空度维持在 80 kPa 以上,稳定后的平均真空度为 86.3 kPa。

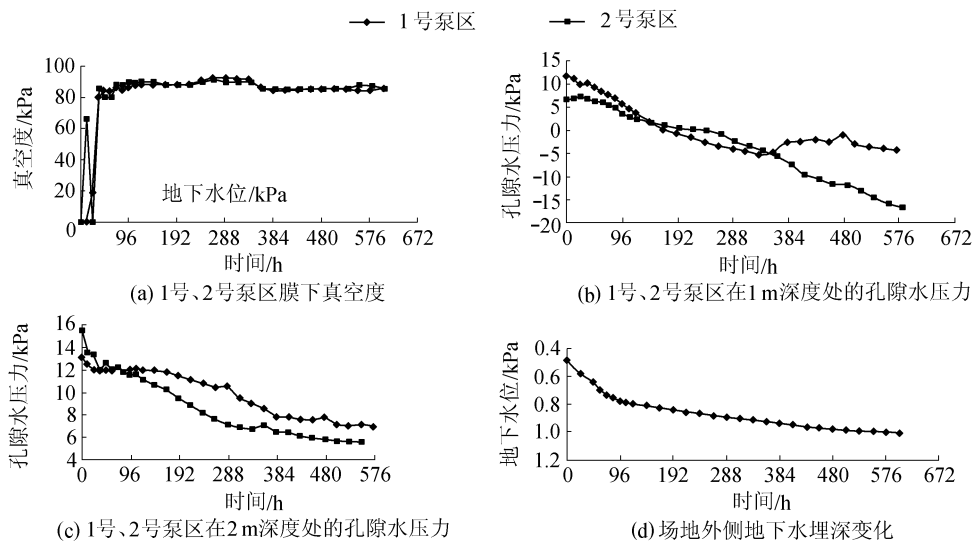


图 1 真空度、孔隙水压力和地下水位现场监测时程

Fig. 1 Field monitoring schedule diagram of vacuum degree, pore water pressure, and underground water level

3.2 孔隙水压力监测

按经典固结理论,荷载施加瞬间外荷载由孔隙水承担,伴随着渗透固结过程,外荷载逐渐由超静孔隙水压力向有效应力转移,土的强度和变形主要取决于有效应力。因此,为了研究土的力学性状,首先必须了解在外荷载作用下孔隙水压力的变化规律^[12]。沿土体不同深度埋设孔隙水压力计,目的是了解土体内孔隙水压力与真空压力的分布状况、变化及相互影响,判断加固效果。

a. 1 号泵区孔隙水压力。1 号泵区共布置 8 只孔压计,分别位于 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、8 m 和 12 m 深度处。取 1 m 和 2 m 处孔隙水压力时程分别如图 1(b)(c)所示。1 m 处孔压计由于埋设深度有误差,故孔隙初始值较大,为 11.4 kPa,但并不影响分析孔隙水压力的变化规律。受真空度影响较大,1 m 处孔隙水压力下降迅速,并出现负值(达到-5.2 kPa),变化幅度为 16.6 kPa。2 m 深度处孔隙水压力在第 1 天下降迅速,24 h 内孔隙水压力从 13.1 kPa 降到 11.9 kPa,然后进入稳定下降阶段,最终降至 6.9 kPa,变化幅度为 8.8 kPa。

b. 2 号泵区孔隙水压力。2 号泵区孔隙水压力仅布置 4 只孔压计,分别位于 1 m 处(1 只)、1.5 m 处(1 只)、2 m 处(2 只)。取 1 m 和 2 m 处孔隙水压力时程分别如图 1(b)(c)所示。1 m 深度处孔隙水压力从 6.9 kPa 降到-14.7 kPa,下降了 21.6 kPa。1.5 m 深度处孔隙水压力从 11.8 kPa 降到-3.5 kPa,下降了 14.3 kPa。

经过对 1 号泵区与 2 号泵区各深度处的孔隙水压力量测值分析,可知改性真空预压结合覆水预压能够明显降低孔隙水压力,说明真空压力及覆水能够使地下水水位降低,通过降低水位可以使加固效果传递到比较深的位置,类似井点降水的效果。1 m 深度处出现了负的孔隙水压力,和通常的正的孔隙水压力物理特性一样,抽真空时负的孔隙水压力通常发生在距离原地下水水位线不远处。测点深部土体的孔压消散较慢,主要是由于真空度随深度增加逐渐衰减,另外深部淤泥渗透性极差,因而造成孔压消散缓慢。

3.3 地下水位监测

由于在真空预压时水位观测孔直通大气,会影响密封效果,故在第 1 阶段真空预压时不在场地内布置水

位观测孔(下一阶段在场地内布置水位观测孔),仅在场外地外侧布置1个地下水位观测孔,其场地的密封沟外侧距试验区边界为3.4 m。图1(d)为地下水埋深变化时程。

如图1所示,受场地外真空荷载的影响,场地内地下水位埋深下降后对场地外的地下水位也有一定的影响,距场地3.4 m位置处的地下水位稳定下降,由真空预压前的0.45 m下降到1.01 m。

3.4 表面沉降监测

a. 沉降板测量。沉降板观测的目的是了解土体沉降和总体平均固结度随加载时间的变化规律,本次试验共布置了6个沉降板,分别位于1号和2号泵区有代表性的位置。场地表面沉降量时程如图2所示。图2表明,场地表面沉降量随着抽真空天数的增加而逐渐增大,在抽真空20 d后逐渐趋于稳定,每天沉降量在5 mm以下,在第23天后每天沉降不超过3 mm。经过25 d后,1号泵区场地表面沉降19.4 cm,2号泵区场地表面平均沉降21.6 cm。

b. 场地高程测量。本次试验在加固前后,分别对场地的相对高程(相对于临时设置的水准基点,假定水准基准点高程为10.00 m)进行了水准测量,以了解经过真空预压后场地高程的整体沉降量,同时可校核沉降板观测的准确度。加固前、后均按照5 m×5 m布置网格,各布置40个水准测量点位。加固前的场地相对高程为8.991 8 m,加固后的场地相对高程为8.778 4 m。通过对场地高程的观测,发现场地表面沉降量为21.34 cm。

3.5 分层沉降监测

分层沉降沿深度的分布曲线见图3。如图3所示,在1.18 m深度范围内的分层沉降明显。由于难以克服的测量误差,下部土体沉降不明显,所以下部曲线波动现象明显。分层沉降沿深度呈递减趋势,沉降量大小与塑料排水板的长度和预压时间有关。

3.6 水平位移监测

1号、2号测斜孔所测得的土体水平位移分布见图4。

土体的水平位移整体上是由场地外向场地内移动。1号测斜孔在5 m深度范围内土体水平位移较大,土体最大水平位移为26.3 cm。2号测斜孔在2 m深度范围内土体水平位移较小,土体最大水平位移为6.3 cm。土体最大水平位移与测斜孔距场地的距离有关,1号测斜孔距场地距离近,故土体最大水平位移和影响深度较大;2号测斜孔影响深度和土体最大水平位移均较小。土体水平位移在第25天的改性真空预压后大致不变,不影响下一步工序。

3.7 静力触探试验

静力触探试验在试验场地外侧距场地7.5 m布置2个试验点,测试结果代表了加固前的地基土强度指标;场地内选择4个试验点,测试结果代表了加固后的地基土强度指标。试验采用单桥探头,根据加固前、后的比贯入阻力指标分别绘制不同试验点的比贯入阻力随深度变化曲线(本文取3号点作为示例)。

通过图5可以看出,加固深度约为2 m的范围内地基土强度显著提高。0~1 m范围内比贯入阻力由加固前的0.019 MPa上升到0.220 MPa;1~2 m范围内比贯入阻力由加固前的0.04 MPa上升到0.47 MPa。由此可知,经过处理后地基后土的允许承载力已经得到显著提高,证明无砂垫层改性真空预压结合覆水预压对超软土的预处理是有效的。

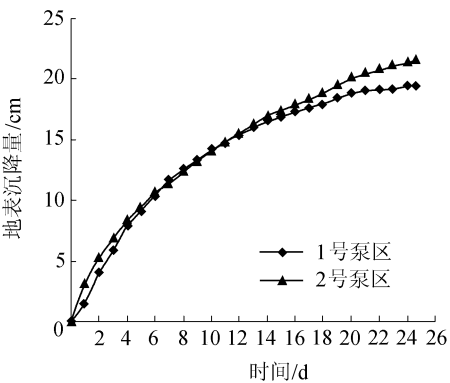


图2 场地表面沉降量时程
Fig. 2 Time chart of subsurface settlement

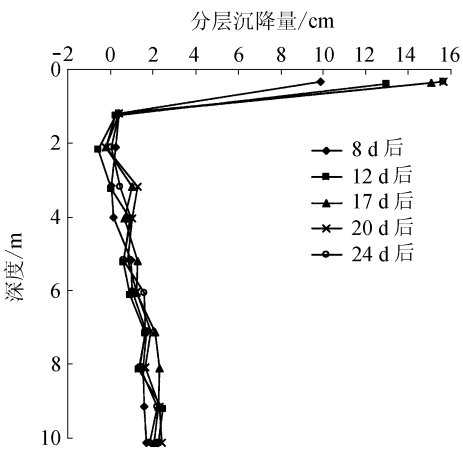


图3 分层沉降沿深度分布曲线
Fig. 3 Settlement at different depths

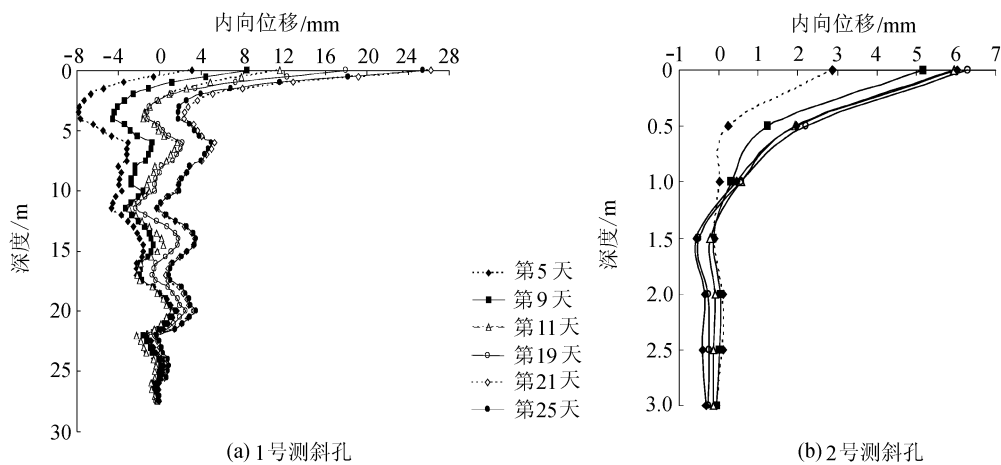


图 4 测斜孔水平位移分布
Fig. 4 Lateral displacement curve graphs

3.8 十字板剪切试验

十字板剪切试验在场地外侧距场地 7.5 m 处布置 2 个试验点,测试结果代表了加固前的地基土强度指标;加固场地内选择 4 个试验点,测试结果代表了加固后的地基土强度指标。在场地内随机选取有代表性的点位。十字板剪切试验结果见图 5。十字板规格为 50 mm×100 mm,根据测试结果得出不同点位未扰动力的不排水抗剪强度。加固前、后抗剪强度对比曲线取 3 号点作为示例。

由图 6 可知 2 m 以上的土体加固效果明显,加固前、后曲线有交错现象。根据静力触探曲线可知真空预压的加固深度为 2 m 左右,因此对十字板剪切试验也主要考察深度 2 m 以内的土体强度。未扰动土的抗剪强度由加固前的 5.75 kPa(注:剔除奇异值 1 个)提高到 16.50 kPa。

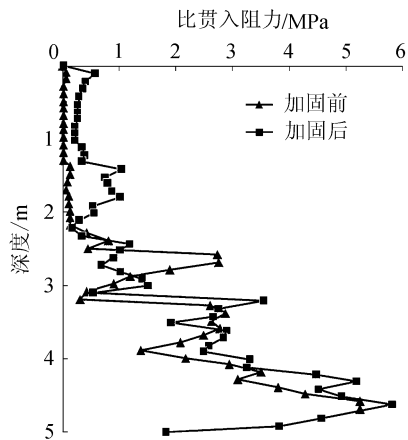


图 5 静力触探试验加固效果对比
Fig. 5 Consolidation effect comparison through static penetration test

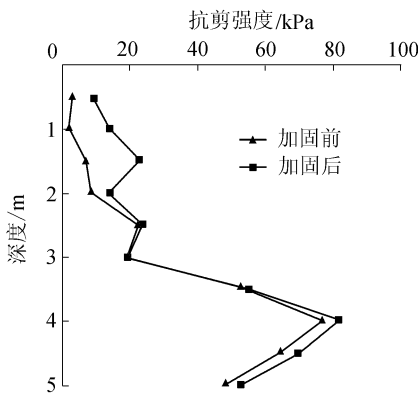


图 6 十字板抗剪试验强度曲线对比
Fig. 6 Consolidation effect comparison through vane shear test

4 室内试验成果

处理前后土体主要性质指标关系比较见表 1。由表 1 可知,加固深度范围内的吹填土各项指标得到明显改善,含水率由加固前超过 53.0% 下降到 33.2% 左右,孔隙比从大于 1.439 下降到 1.130 左右,压缩模量和直剪指标均有大幅度提升。分层总和法计算沉降用 $e \sim p$ 曲线法计算地基的最终沉降量,理论计算沉降量为 41.1 cm。测试结果表明,加固后比加固前地面平均总沉降量为 66.3 cm。

5 结 语

a. 在改性真空预压覆水阶段,主要进行了多项施工监测和 2 项原位试验,结果表明该技术采用改性真空预压,取消砂垫层,并采用新的管网排水系统,使超软地基达到一定的固结作用并有一定的承载力。

表1 处理前后土样主要物理力学指标对比

Table 1 Main physical and mechanical indices of soil before and after pretreatment

样品 编号	深度/ m	含水率/ %		孔隙比 e		压缩系数/ MPa^{-1}		压缩模量/ MPa		固结系数			
		处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后	处理前	处理后	固结压力 $p=100\text{ kPa}$		固结压力 $p=200\text{ kPa}$	
										处理前	处理后	处理前	处理后
1	0.5~1.0	68.0	33.2	1.856	0.916	1.63	0.55	1.75	3.46	4.50	1.18	4.41	1.90
2	1.0~1.5	53.0	39.6	1.439	1.137	1.09	0.83	2.23	2.59	0.72	0.37	0.69	0.44
3	1.5~2.0	59.1	28.8	1.588	0.783	1.25	0.37	2.07	4.88	2.14	1.51	2.07	1.76
4	2.0~2.5	56.9	57.3	1.555	1.547	1.32	1.28	1.94	1.99	1.67	0.58	2.06	0.31

注:样品1,2,4为高液限黏土,样品3为低液限黏土。

b. 室内试验结果表明,加固后原状淤泥的含水量降低、密度增大、孔隙比减小、压缩模量和直剪指标均有大幅度提高。由此可见,加固后软土层变硬,加固效果较显著。

c. 可节省大量的场地软基处理时间,加快企业用地的供给速度和市政工程的建设速度。按处理20万 m^2 计算,国内外常规的地基处理方法通常要求场地晾晒6~12个月以上才能进场施工,处理工期一般为6~12个月,总工期为12~24个月。该技术在吹填后可马上进场施工,处理工期在4~6个月左右,可比常规方法缩短总工期5~12个月,为企业早用地、早建设、早投产创造有利条件。

d. 可节省巨额的工程投资,减轻企业的用地和建设成本。与常规的软基处理方法造价比较,该技术的地基处理造价在50~60元/ m^2 ,与常规方法相比平均节约成本约40%。

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. (DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin, LI Yan, et al. Innovation of large-area reclamation engineering and practice in projects[J]. Marine Traffic Engineering, 2010(10): 54-67. (in Chinese))

[2] 李军,胡继业,邓元广. 大面积吹填陆域真空预压密封墙处理技术应用[J]. 水运工程,2004(2):44-48. (LI Jun, HU Jiye, DENG Yuanguang. Application of vacuum preloading sealing wall technique for large-area reclaimed land[J]. Marine Traffic Engineering, 2004(2): 44-48. (in Chinese))

[3] 张军岩. 世界各国(地区)围海造地发展现状及其对我国的借鉴意义[J]. 国土资源,2008(8):60-62. (ZHANG Junyan. Reclamation in countries around the world and useful lessons to China[J]. Land Resources, 2008(8): 60-62. (in Chinese))

[4] 孙丽. 中外围海造地管理的比较研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.

[5] 黄绍明,高大钊,孙更生. 软土地基与地下工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

[6] 栾茂田,武亚军,杨庆,等. 大连港大窑湾吹填区软基的堆载预压处理研究[J]. 建筑结构,2006,36(4):10-12. (LUAN Maotian, WU Yajun, YANG Qing, et al. Study on preloading technique for treatment of hydraulic reclamation of Dayaowan Port Area of Dalian[J]. Building Structure. 2006,36(4): 10-12. (in Chinese))

[7] 年廷凯,李鸿江,杨庆,等. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(1):139-144. (NIAN Tingkai, LI Hongjiang, YANG Qing, et al. Improvement effect of high energy dynamic compaction under complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2009,31(1):139-144. (in Chinese))

[8] 李鸿博,高广运,王立明. 深层搅拌桩施工挤土效应分析[J]. 岩土工程技术,2005,19(4):200-203. (LI Hongbo, GAO Guangyun, WANG Liming. Analysis of soil-squeezing effects in mixing pile construction[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2005,19(4):200-203. (in Chinese))

[9] 刘汉龙,董金梅,高玉峰. 轻质混合土技术开发与工程特性[J]岩土力学,2005,26(增刊1):13-16. (LIU Hanlong, DONG Jinmei, GAO Yufeng. Technical development and engineering characteristic of lightweight mixed soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(Sup1):13-16. (in Chinese))

[10] 刘汉龙,曾国海,高有斌,等. 吹填超软地基改性真空预压结合覆水预压快速处理方法[P]. 中国专利:201010158412, 2010-08-18.

[11] 曾国海,叶吉,高有斌,等. 无砂垫层真空预压超软土固结中的真空管变形控制结构[P]. 中国专利:200920180101,2010-07-14.

[12] 郑新亮,董志良,杨福麟. 真空联合堆载预压土体孔隙水压力变化规律的研究[J]. 水运工程,2004(2):4-8. (ZHENG Xinliang, DONG Zhiliang, YANG Fulin. A study on variation law of pore water pressure in soil reinforced by vacuum & surcharge preloading[J]. Marine Traffic Engineering, 2004(2): 4-8. (in Chinese))