

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.06.016

双层滤管无砂垫层真空预压法处理超软海底吹填淤泥

彭 劼¹ 苏 波¹ 董江平² 王柏欢²

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.中交上航局航道建设有限公司,浙江 宁波 315200)

摘要:针对沿海吹填成陆工程中的海底吹填淤泥场地地基承载力极低,无法进行后续建设施工的问题,通过现场对比试验,研究了双层滤管无砂垫层真空预压法在该类场地的应用.现场试验监测结果表明,双层滤管无砂垫层真空预压法取得的沉降大小和均匀度、孔压下降幅度和均匀度以及地基承载力等加固效果指标明显好于常规的无砂垫层真空预压法,因此双层滤管无砂垫层真空预压法是一种可行、经济的超软海底吹填淤泥处理方法.

关键词:超软海底淤泥;真空预压法;双层滤管;无砂垫层;软土地基;地基加固

中图分类号:TU447 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2011)06-0676-06

真空预压法是一种有效的软基加固方法,近年来随着我国沿海地区吹填成陆工程的大量出现,真空预压法也越来越多地被应用到处理超软海底淤泥工程中.

普通的真空预压法是在软基表面铺垫 40~50 cm 厚的砂垫层之后,在砂垫层中埋入水平滤管,构成水平向排水系统,在土体中打入塑料排水板,作为竖向排水系统,然后将密封膜铺设在软基表面的砂垫层上,薄膜四周埋入土中,通过抽真空系统,借埋设于砂垫层中的水平滤管,将薄膜下土体间的空气抽出,使其形成相对负压,由于塑料排水板渗透性较大,该负压能够快速传递到砂井中,从而在排水板和排水板周围土体之间形成孔压差,使土体中的孔隙水流入排水板并被排出,从而达到加固软基的目的.

对于沿海吹填成陆工程中的海底吹填淤泥场地地基,采用常规的真空预压法往往难以达到加固的目的,如本研究所依托的温州市吹填地基加固工程中,如果采用常规真空预压法,40 cm 厚砂垫层荷载再加上垫层摊铺机械的荷载,总荷载将大于地基承载力,铺设难以进行.而且我国砂资源日益稀缺,因此无砂垫层真空预压是可行的方案^[1].已有的研究表明^[2-3],真空预压法处理之后,在地表会形成一个硬壳层,如温州市吹填地基加固工程中,已加固的常规无砂垫层真空预压形成的硬壳层厚度一般为 0.5~1.0 m.考虑到硬壳层以下的土体可能无法达到处理目标所要求的加固效果,而硬壳层厚度又不满足设计要求,因此本文提出采用双层滤管无砂垫层真空预压法,并进行了对比试验研究,其加固效果要明显优于常规的无砂垫层真空预压法.

1 双层滤管无砂垫层真空预压法施工工艺

在常规的真空预压工程中,垫层的主要作用是(a)传递抽真空系统中的低压,在膜下形成低压力场,其流体绝对压力为 26~31 kPa,也就是通常所说的真空度为 80~85 kPa;(b)将抽吸出来的地基中的水、气汇集并由管道排出场地.越接近垫层,塑料排水板中的流体压力越低,也就是软土中存在真空作用随深度衰减的规律.真空作用越小,那么加固效果显然就越差^[4-5].常规的真空预压剖面如图 1 所示.

为了增加硬壳层厚度,确保达到设计要求的加固效果,采用双层滤管无砂垫层真空预压法.即除了地表的无砂垫层水平滤层外,在地下 2.0 m 深处也布

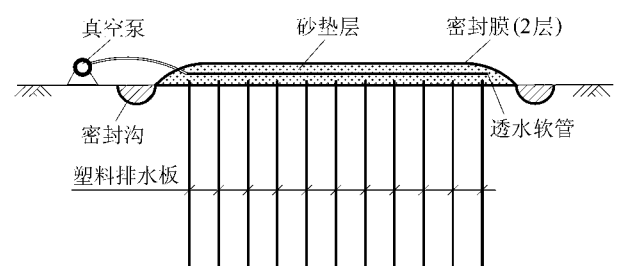


图 1 常规真空预压法示意图

Fig. 1 Section sketch of conventional vacuum preloading

收稿日期:2010-10-29

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2009B13014);中交上航局航道建设有限公司专项科研基金(2009081206)

作者简介:彭劼(1971—)男,湖南衡阳人,副教授,博士,主要从事软土地基处理及桩基础研究.E-mail:peng-jie@hhu.edu.cn

置一层水平滤层,与地表的水平滤层一样,该地下滤层也由 50 mm 外径的透水软管构成,透水软管上也绑扎塑料排水板,塑料排水板长度为 1.5 m。双层滤管无砂垫层真空预压剖面如图 2 所示。

双层滤管无砂垫层真空预压法的施工步骤如下。
a. 先将塑料排水板绑扎在透水软管上,塑料排水板长度根据软土层厚度确定,试验区淤泥层厚度为 2.5 m,因此塑料排水板长度分别为 1.5 m(地下滤层)和 2.5 m(地表滤层)。

b. 在加固区地表铺设一层 150 g/m² 的编织布,以使施工人员可以在场区上行走、施工,不致掉入淤泥中。

c. 地下滤层施工:人工用插杆把地下滤管层压入到地下 2.0 m 处,此时塑料排水板是向上的,且要确保其不露出地面,塑料排水板长度 1.5 m,板头在地面以下 0.5 m,塑料排水板采用 B 型板,正方形布置,间距 0.8 m。

d. 地表透水软管布置好之后,铺设一层 200 g/m² 无纺土工布,以改善水平滤层透气性能,透水软管、塑料排水板、无纺土工布共同构成水平向、竖向向排水体系。

e. 再铺 2 层厚度为 0.12 mm 的聚氯乙烯密封膜,并将膜边人工踩入淤泥中。

f. 布置抽真空系统并与地表、地下透水软管连接。

g. 开始抽真空并监测,平均沉降速率达到连续 10 天不大于 2 mm/d、静力触探或十字板试验测得承载力大于 50 kPa 即可卸载。

由于地下滤层的施工是由人工将绑扎好的塑料排水板的透水软管压入地基中,能够施工的深度受限于土的软硬程度^[6],因此双层滤管无砂垫层真空预压法不适用于厚度较大或初始土体强度较大的软基处理,但是对于沿海吹填厚度不大的超软淤泥处理,则具有施工可行性,增加的材料不多,是比较经济的常规真空预压改进方法。

2 现场试验及监测数据分析

现场试验区位于浙江省温州市龙湾区,该试验区属于温州市吹填成陆工程的一部分。温州市吹填成陆工程总的近期规划范围包括龙湾丁山一期工程、天成工程、永兴南园工程,面积 17.7 km²。

吹泥船将海底淤泥与海水混合物吹至吹填区,形成陆地,吹填的厚度为 2.5 ~ 4.5 m。吹填后淤泥的天然含水率远大于液限含水率,饱和度接近 100%,由现场十字板剪切试验得到的土体不排水强度极低(均小于 2 kPa)。颗粒分析试验结果表明该吹填土所有粒组的粒径均小于 0.075 mm,其中粒径小于 0.005 mm 的黏粒质量分数为 43.4%。

根据吹填区日后的用途,对后续用于场区内道路的部分提出的处理要求为:在加固后 0 ~ 1.5 m 深度内,地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 50$ kPa,要求在处理后,一些较大的施工机械可以在其上实施道路施工。由于吹填后形成的场地地基承载力极低,一般的软基处理方法例如复合地基、强夯等均无实施条件,只有无砂垫层真空预压施工荷载较小,具有实施可行性^[7],因此该吹填区域采用了无砂垫层真空预压法处理。为了研究双层滤管无砂垫层真空预压法和常规无砂垫层真空预压法的区别,进行了现场对比试验。

现场试验区为矩形,长 50 m、宽 20 m,加固面积为 1 000 m²。为了便于对比研究,在同一个试验区内、同一块密封膜内划分 2 个分区,分别布置了双层滤管无砂垫层真空预压和普通的无砂垫层真空预压,平面分布以及相应的监测布置情况如图 3 所示。布置了 2 台射流真空泵,正常情况下只开 1 台,另 1 台备用。

从 2010 年 1 月 31 日开始抽真空,至 2010 年 5 月 9

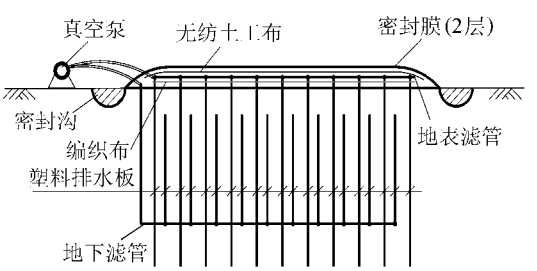


图 2 双层滤管无砂垫层真空预压法示意图

Fig. 2 Section sketch of vacuum preloading with double-layer filter pipe in non-sand-mat layer

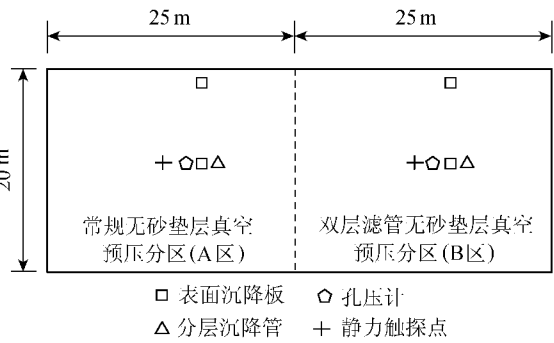


图 3 现场试验平面示意图

Fig. 3 Layout of field test

日,大部分时间膜下真空度稳定在80 kPa 以上,抽真空历时 98 d,膜下真空度如图 4所示。

监测的内容包括表面沉降、分层沉降和孔隙水压力,观测点的布置见图 3。孔隙水压力计采用人工埋设法,埋设在 2 个分区的加固区中部,在由 4 根排水板形成的矩形的形心处,各布置 1 组孔隙水压力传感器,每组 3 个探头,按深度方向每向下 1 m 左右埋设 1 个探头。

2.1 表面沉降

表面沉降是软基分析的基础,也是加固效果最直接的反映,图 5 为 2 个分区的表面沉降曲线,常规的无砂垫层真空预压区(以下简称 A 区) 2 个观测点的沉降值分别为 50.3 cm 和 58.2 cm,考虑到加固区淤泥层厚度约为 2.5 m,可知真空预压的加固效果是比较显著的。

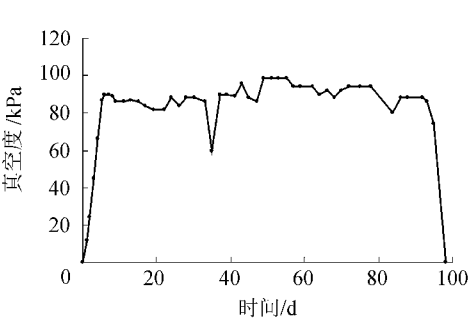


图 4 真空荷载作用曲线
Fig. 4 Vacuum loading curve

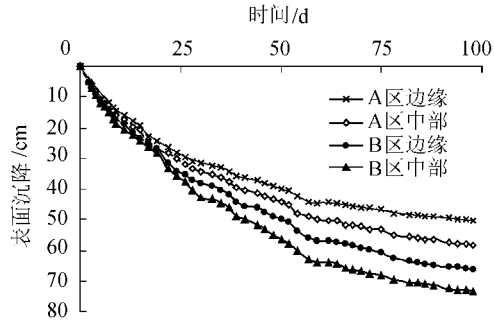


图 5 表面沉降曲线
Fig. 5 Surface settlement curve

双层滤管无砂垫层真空预压区(以下简称 B 区)场地中心和边缘处的累积沉降曲线表明,在真空预压期间 2 个观测点的沉降值分别为 66.3 cm 和 73.3 cm,B 区中部沉降比 A 区要大 26%,B 区边缘沉降比 A 区要大 32%。这不仅表明双层滤管无砂垫层真空预压加固效果要好于常规无砂垫层真空预压,而且双层滤管无砂垫层真空预压的加固效果更均匀,中部沉降大于边缘沉降的幅度由常规无砂垫层真空预压的 16%降低到 11%。

图 6 为 A 区和 B 区的平均沉降速率曲线,B 区的平均沉降速率在抽真空过程中大于 A 区。

2.2 分层沉降

通过分层沉降的观测,可以了解地基不同深度处的沉降量,从而计算出各土层的压缩量^[8]。由于试验区软土厚度不大,因此分别在 A 区和 B 区布置了 1 根分层沉降管,每根沉降管放置了 2 个沉降磁环,磁环初始深度以及沉降曲线如图 7 所示。

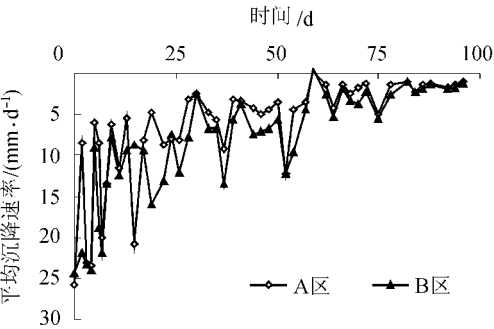


图 6 表面平均沉降速率曲线
Fig. 6 Surface settlement velocity curve

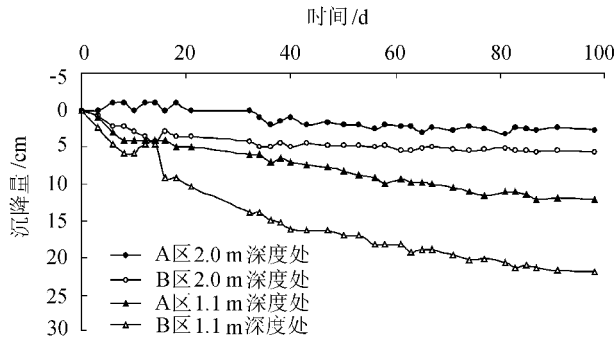


图 7 分层沉降曲线
Fig. 7 Layered settlement curve

A 区和 B 区磁环之间的土层压缩量如表 1 所示,由表 1 数据分析可知,B 区 0~1.1 m 范围内的土体在抽真空过程中压缩量比 A 区要大 11%,B 区 1.1~2.0 m 范围内土体压缩量则比 A 区要大 83%,可知双层滤管无砂垫层真空预压在整个土层中的加固效果要好于常规无砂垫层真空预压,尤其是对深度较大处的土层,其加固效果更要显

表 1 磁环间压缩量

Table 1 Compression of soil layers between two magnetic rings					
环间各土层深度/m		A 区		B 区	
		压缩量/cm	平均压缩量/cm	压缩量/cm	平均压缩量/cm
0~1.1		46.2	42.0	51.5	46.8
1.1~2.0		9.4	10.4	17.2	19.1

著好于常规方法,这是由于真空有效作用是随着深度增加而明显衰减的^[9-10].双层滤管无砂垫层真空预压在2.0 m处增加了一层滤管和向上的塑料排水板,因此使得介于0~2.0 m之间的土体受到的真空作用是比较均匀的,可以取得较好的加固效果.

2.3 孔隙水压力

孔隙水压力观测是了解地基土体固结状态的手段,通过不同深度孔压随时间变化曲线的实测资料,可以判断真空预压加固软基的程度.由于真空预压加固地基的地下水水位变化、曼德尔效应以及测量孔容易串气等因素的影响,孔压数据的规律往往并不理想,因此孔压数据的分析一般被作为判断加固效果的辅助手段^[11].试验中孔压计的埋设是1个测量孔布置1个孔压计,因此避免了串气现象.

图8为A区和B区孔压曲线.从监测的孔隙水压力随时间变化曲线上看,埋设在淤泥层内的0.5 m,1.5 m 2.5 m处的孔压测点,在抽真空期间,总体变化情况是孔隙水压力呈下降趋势,与真空度从零上升至80 kPa的时间比较吻合.浅层孔压下降较大,深层孔压下降较小,符合一般的抽真空规律^[11-13].真空荷载卸除后,孔压恢复到静水压力.

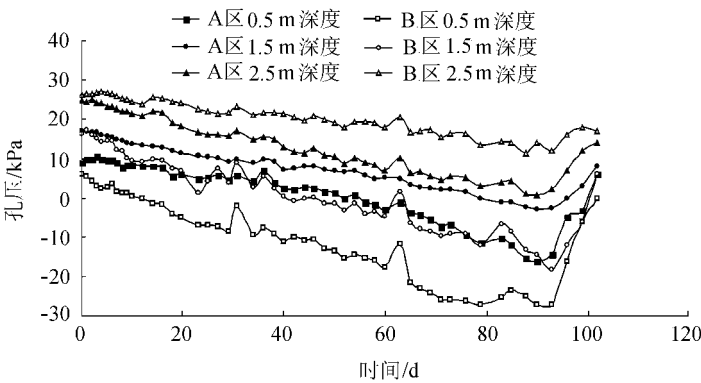


图8 孔隙水压力曲线

Fig. 8 Pore water pressure curve

A区和B区不同深度处孔压下降的最大幅度如图9所示.A区和B区0.5 m 2.5 m深度处的孔压在抽真空过程中下降幅度相差在30%以内,而1.5 m深度处的孔压下降幅度,B区超过A区55%.这表明双层滤管的增加能有效提高2层滤管之间土体的真空加固效果.从图1也可看出,双层滤管无砂垫层真空预压的优势在于2个滤层之间的土体孔压下降幅度和均匀度都明显好于常规无砂垫层真空预压.

2.4 静力触探试验

试验结束后,在场内进行了静力触探试验.在A区和B区中部各选择了2个点,这2个点均位于4根塑料排水板围成区域的形心处(即距离塑料排水板最远处),得到的A区和B区的静力触探曲线如图10所示.

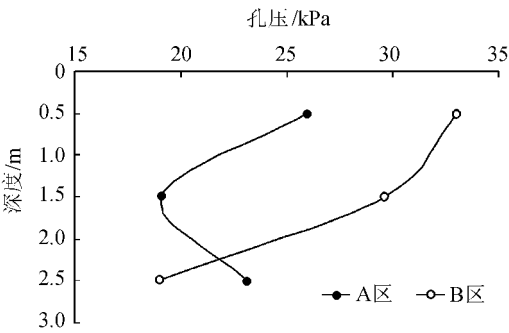


图9 不同深度处孔压最大下降幅度曲线

Fig. 9 Largest decline curve of pore water pressures in different depths

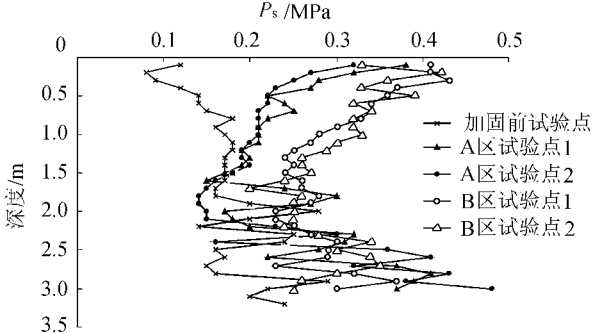


图10 静力触探 P_s 曲线

Fig. 10 P_s curve of CPT

由图10可知,A区与B区在加固后比贯入阻力 P_s 值均有较大幅度增长,B区相对增长幅度更大,有效深度也更大.如果以 $P_s > 0.2$ MPa为硬壳层判断依据,则A区的硬壳层厚度在1.1 m左右,B区硬壳层厚度超过1.7 m,且土体范围内强度较均匀.到1.7 m深度以下,A区和B区的 P_s 值就比较接近了.

根据静力触探结果推求地基承载力的公式很多,本文根据上海市工程建设规范 DGJ08-37—2002《岩土工程勘察规范》中提供的淤泥质土地基承载力计算公式 $f_0 = 32 + 0.070 P_s$, 换算后的 A 区地基承载力特征值在地表下 0.5 m 范围内大于 50 kPa, 再往下就不能满足设计要求了, B 区在地表下 1.5 m 范围内的地基承载力均大于 50 kPa, 达到前述的设计要求。

2.5 载荷板试验

抽真空结束后, 在现场进行了载荷板试验。载荷板为圆形, 面积为 0.5 m^2 , 每个区选择了 2 个试验点分别进行静载荷试验, 得到地基承载力极限值。A 区和 B 区的地基承载力极限值均达到了设计要求: A 区试验点 1 和 2 的地基承载力极限值分别为 108 kPa 和 111 kPa; B 区试验点 1 和 2 的地基承载力极限值分别为 116 kPa 和 121 kPa。

3 结 论

a. 双层滤管无砂垫层真空预压加固区的沉降大于常规无砂垫层真空预压区, 其中部沉降大于边缘沉降的幅度由常规无砂垫层真空预压的 16% 降低到 11%, 这表明双层滤管无砂垫层真空预压的加固效果更好且更均匀。

b. 分层沉降数据分析表明, 双层滤管无砂垫层真空预压在 2.0 m 处增加了一层滤管和向上的塑料排水板, 使 0~2.0 m 之间的土体受到的真空作用比较均匀, 整个土层中的加固效果要好于常规无砂垫层真空预压, 尤其是对深度 1.0 m 以下、地下滤层以上的土层, 其加固效果更要显著好于常规方法, 双层滤管无砂垫层真空预压在地下 1.1~2.0 m 范围内土体压缩量比常规无砂垫层真空预压大 83%。

c. 双层滤管无砂垫层真空预压土体深层的孔压下降幅度和均匀度都明显好于常规无砂垫层真空预压。

d. 静力触探结果表明, 双层滤管无砂垫层真空预压加固后形成的硬壳层厚度大于常规无砂垫层真空预压, 换算的地基承载力能达到设计要求, 常规无砂垫层真空预压则不能完全达到设计的加固要求。

e. 由于地下滤层的施工是由人工将绑扎好塑料排水板的透水软管压入地基中, 因此双层滤管无砂垫层真空预压法不适用于厚度较大或初始强度较大的软基处理, 但是对于沿海吹填厚度不大的超软淤泥处理, 则显得有效而经济。

参考文献:

- [1] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, KELLY R, et al. Sustainable soil improvement via vacuum preloading[J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement 2010, 163(1): 31-42.
- [2] CHU J, BO M W, CHOA V. Improvement of ultra-soft soil using prefabricated vertical drain[J]. Geotextiles and Geomembranes 2006, 24(6): 339-348.
- [3] INDRARATNA B. Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilization[J]. Australian Geomechanics Journal 2010(1): 1-44.
- [4] 彭劼, 刘汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(5): 560-563. (PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Mechanism of foundation strengthening by vacuum-surcharge preloading method[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences 2003, 31(5): 560-563. (in Chinese))
- [5] 孙田磊, 林涌潮, 杨福麟, 等. 真空预压超软弱土下卧透土层新密封方法探讨[J]. 水利水电科技进步, 2009, 29(5): 74-77. (SUN Tian-lei, LIN Yong-chao, YANG Fu-lin, et al. Discussion of new sealing method of deep water-permeable stratum under super soft ground in vacuum pre-loading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2009, 29(5): 74-77. (in Chinese))
- [6] 徐猛, 黄家青, 唐彤芝. 软式透水管在高速公路真空预压工程中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(2): 22-26. (XU Meng, HUANG Jia-qing, TANG Tong-zhi. Application and study on flexible permeable hose in vacuum preloading engineering of express highway[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering 2007, 5(2): 22-26. (in Chinese))
- [7] GAO C. Vacuum preloading method for improving soft soils of higher permeability[J]. Ground Improvement 2004, 8(3): 101-108.
- [8] 梅国雄, 徐锴, 宰金珉, 等. 真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1168-1172. (MEI Guo-xiong, XU Kai, ZAI Jin-min, et al. Deformation mechanism of soft foundation under vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2006, 28(9): 1168-1172. (in Chinese))
- [9] CHAI J C, CARTER J P, HAYASHI S. Ground deformation induced by vacuum consolidation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2005, 131(12): 1552-1561.

[10] 张功新 ,莫海鸿 ,董志良 ,等 .真空预压中真空度与孔隙水压力的关系分析[J].岩土力学 ,2005 ,26(12) :1949-1952.(ZHANG Gong-xin ,MO Hai-hong ,DONG Zhi-liang ,et al . Analysis of relationship between vacuity and pore-water pressure in vacuum preloading [J]. Rock and Soil Mechanics ,2005 ,26(12) :1949-1952.(in Chinese))

[11] 李琳 ,王清 .大面积吹填软土地基处理效果评价[J].水利水电科技进展 ,2008 ,28(1) :78-81.(LI Lin ,WANG Qing . Evaluation of consolidation effects of soft soil foundation by large-area hydraulic filling[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources , 2008 ,28(1) :78-81.(in Chinese))

[12] 艾英钵 ,刘兵 ,刘加才 .真空预压加固地基固结简化计算方法[J].水利水电科技进展 ,2005 ,25(6) :60-62.(AI Ying-bo ,LIU Bing ,LIU Jia-cai . Simplified calculation method for consolidation of soft ground improved by vacuum preloading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2005 ,25(6) :60-62.(in Chinese))

[13] 宗国庆 ,蒋慧 .真空(堆载)预压法在高速公路软土地基处理中的应用[J].水利水电科技进展 ,2002 ,22(6) :41-43.(ZONG Guo-qing ,JIANG Hui . Study on strengthening of soft foundations of express highway by vacuum-surcharge preloading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2002 ,22(6) :41-43.(in Chinese))

Application of vacuum preloading method with double-layer filter pipe in non-sand-mat layer to ultra-soft seabed silt hydraulic filling

PENG Jie¹ , SU Bo¹ , DONG Jiang-ping² , WANG Bai-huan²

(1. College of Civil and Transportation Engineering , Hohai University , Nanjing 21098 , China ;
2. SDC Waterway Construction Co. , Ltd. , Ningbo 315200 , China)

Abstract : With consideration of the low bearing capacity of the ultra-soft seabed silt hydraulic fill sites in coastal areas and the huge challenge of continuing follow-up construction , the vacuum preloading method with a double-layer filter pipe in the non-sand-mat layer was applied and studied in these sites through contrastive field tests . The measured results from the tests show that the consolidation effect indices , including the size and uniformity of settlement , decline and uniformity of the pore water pressure , and bearing capacity of the foundation obtained by the vacuum preloading method with a double-layer filter pipe in the non-sand-mat layer are significantly superior to those obtained by the conventional non-sand-mat vacuum preloading method . Therefore , the proposed method is an effective and economical method for ultra-soft silt hydraulic filling .

Key words : ultra-soft seabed silt ; vacuum preloading ; double-layer filter pipe ; non-sand-mat layer ; soft soil foundation ; foundation strengthening