

软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术

付冠杰^{1,2}, 范明桥³, 李杰³, 徐锴³, 雷国辉^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:针对软土地基上吹填造陆工程中真空预压法加固软土地基和吹填淤泥工期较长、效果较差的问题,提出了堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术,将吹填淤泥加固及软土地基加固两阶段施工整合到一个真空预压周期内完成,大幅度缩短了造陆工期。试验结果表明:该技术有效解决了常规真空预压法中上部吹填淤泥变形过大,影响下部软土地基加固效果的问题,并且充分利用吹填淤泥的自重,无须额外的堆载材料,即可使软土地基处于真空联合堆载预压的加固模式,进一步提高了加固效果。

关键词:同步加固技术;软土地基;堆载预压;吹填淤泥;真空预压

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)06-0082-07

A synchronous vacuum preloading technique for treating soft ground and its overlying hydraulic surcharge fills//
FU Guanjie^{1,2}, FAN Mingqiao³, LI Jie³, XU Kai³, LEI Guohui^{1,2} (1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: In hydraulic fill reclamation projects, the construction duration is long when the vacuum preloading method is used to improve soft ground and hydraulic fill. However, the effectiveness of improvement is relatively poor. To overcome these problems, a ground treatment technique is proposed for land reclamations with hydraulic fills on soft soils. This technique utilizes the hydraulic fills as a surcharge loading for the soft soils, and then synchronously applies vacuum preloading to both the soft soils and the hydraulic fills. By using this technique, two separate construction phases of improving soft soils and hydraulic fills are merged into a single construction period. Thus, construction time can be greatly shortened. Field test results show that the proposed technique effectively eliminates the influence of excessive deformations of the upper hydraulic fills on the improvement effectiveness of the lower soft soils in the conventional vacuum preloading technique. With no recourse to any other surcharge materials, the soft soils can be improved by vacuum combined surcharge preloading. It further promotes the effectiveness of soil improvement.

Key words: synchronous soil improvement technique; soft ground; surcharge preloading; hydraulic fills; vacuum preloading;

沿海地区围海造陆工程越来越多,采用水力吹填法,将港池和航道内疏浚淤泥作为土料进行造陆成为一种经济快速的常用技术。因此,围海造陆工程中面临越来越多的沿海滩涂软土和上部吹填淤泥同时需要加固的状况,随着社会经济的快速发展,吹填造陆的工期要求越来越短,传统的加固处理技术已难以满足要求,一些新技术应运而生^[1-3]。

真空预压法和真空联合堆载预压法是常用的软土地基加固技术,加固效率高、效果好,具有良好的

经济效益^[4]。沿海滩涂海积层软土地基已经有一定的强度,采用真空联合堆载预压法能够达到更好的处理效果。新近吹填淤泥含水率很高,强度很低^[5-7],随着工期要求越来越紧,淤泥吹填完成后即希望进行加固,采用真空预压法能够很好地满足经济技术的要求。但是围海造陆工程对于地基强度要求较高,需要处理海积层软土地基和吹填淤泥两层土体,若两层土体分别施工则工期太长,无法满足实际工期需求;同时由于两层土体强度差别太大,人工

插板无法从吹填土层直接插入地基土层,通常需要吹填淤泥土体达到一定强度后,使用插板机械进行施工,工期较长,且由于上部吹填淤泥真空度沿深度衰减较快,将严重影响下部原状地基的加固效果^[8-9]。针对传统真空预压法的不足,本文提出软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术。

软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术是将上部吹填淤泥作为堆载,联合真空预压法对软土地基进行加固处理,同时淤泥吹填施工完成后即采用真空预压法对吹填淤泥进行加固,形成软土地基和吹填淤泥同步进行真空预压加固处理的情况,如图1所示。

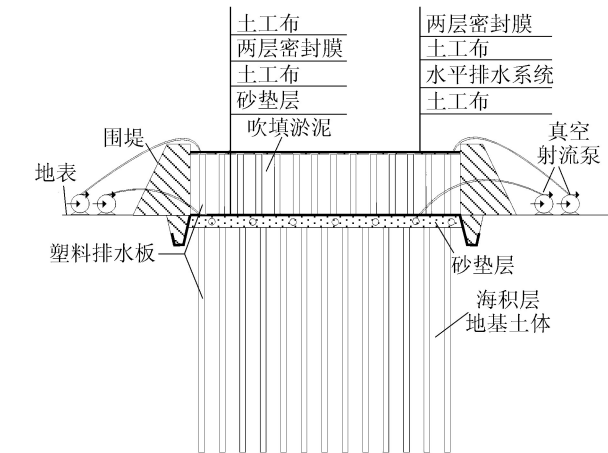


图1 同步真空预压加固示意图

软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术是对真空预压法在吹填造陆工程施工技术的有效改良,具有更合理的设计施工流程,充分利用了施工过程中的有利因素,并与堆载预压法很好地结合,其主要特点是:①软土地基开始正常真空预压加固后可立即进行吹填淤泥的施工和加固,施工工期大幅缩短;②软土地基使用真空联合堆载预压法,无须另设堆载材料;③软土地基和吹填淤泥同步处理完成,消除了分别处理时吹填淤泥施工过程中地基的再次沉降;④无须对吹填淤泥进行晾晒即可达到同时处理两层土体的目的。

1 工艺流程

软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术的主要施工工艺流程分为软土地基的加固和淤泥的吹填、加固两大部分,其中两部分施工过程的衔接期是影响整个工程最终处理效果的关键。

1.1 软土地基的真空预压法加固

常规的真空预压法处理软土地基施工工艺已经较为成熟,并已被广泛应用。根据场地工程地质资料、工程要求、周围环境和地下管线及障碍物等情

况,按照国家或行业技术规范进行设计、施工。主要工艺流程如下:①平整场地,布设仪器,测量初始数据;②铺设砂垫层至设计厚度的一半,然后打设塑料排水板;③布设水平向排水滤管;④铺设另外一半砂垫层,整平场地,布设监测仪器,施工时应将滤管完全埋设到砂垫层内部,防止上部吹填淤泥进行堆载后将滤管压扁,造成排水不畅;⑤铺设土工布;⑥铺设两层密封膜,为防止在吹填淤泥施工过程中对密封膜造成损伤,宜在密封膜上部再铺设一层土工布;⑦安装真空射流泵等抽真空装置,出膜口位置要重点保护,架空部分要堆土进行支撑,如图2所示,防止吹填淤泥后将出膜装置压坏或出膜装置翘起戳破密封膜;⑧放置沉降标,将其固定稳妥,标杆刚度、强度都应足够大,防止在吹填淤泥过程中被泥浆冲击倾斜、移位,或造成标杆弯曲、折断等,测完初始读数后开始抽真空,膜下真空度达到设计值并稳定后,再进行吹填淤泥施工。

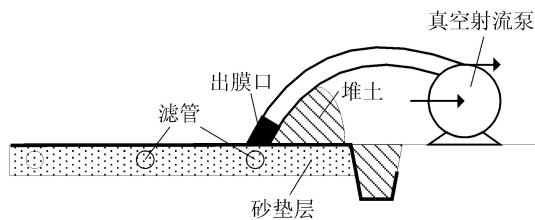


图2 出膜口支撑防护与滤管布设

1.2 衔接期施工

衔接期施工是将真空预压加固软土地基和吹填淤泥施工连接在一起的关键一环,会影响到工程质量和最终处理效果,主要包括围堤的修筑和淤泥的吹填,其工艺流程为:①施工准备;②修筑围堤;③吹填淤泥至设计高度;④淤泥自重沉积、滤水;⑤重复流程③、④至淤泥面达到设计高度。

a. 施工准备。软土地基的真空预压正常进行,吹填淤泥施工前要仔细检查密封膜及压膜沟,防止出现漏气等密封不良状况。清除膜下尖锐物,防止上部吹填淤泥堆载后将膜捅破。

b. 修筑围堤。由于修筑围堤紧邻地基真空预压场地,将不可避免地压到场地中密封膜。因此慎重采用碎石或矿渣等坚硬材料,为方便起见,可就近采用周围土源进行修筑。修筑时应分层压实,两侧边坡应满足设计要求。围堤的修筑和淤泥的吹填是对软土地基进行加载的过程。当软土地基承载力过低时,施工过程中应时刻关注地基土体沉降的发展情况,防止出现地基失稳,必要时应放缓施工速度,或推迟筑堤和吹填淤泥的施工进度。当采用场地周围软土进行围堤的修筑时,由于软土抗剪强度较低,为防止施工过程中围堤在自重或淤泥的侧压力作用

下造成坍塌和胀裂,围堤可分多次修筑,待土体风干含水率下降、强度增大后再进行加高,同时,可采用增大围堤断面面积或减小围堤边坡坡度等措施。

c. 吹填淤泥。为了减少水力吹填过程的颗粒分选作用,形成较为均匀的吹填淤泥层,吹填施工过程中宜沿场区周边不时调整出泥口位置。

1.3 吹填淤泥的真空预压法同步加固

对新近吹填淤泥进行处理时,应首先解决淤泥表面施工问题,可采用浮动工作平台进行淤泥面上的施工作业,主要工艺流程可概括为:①铺设排水板和滤管;②铺设密封膜;③铺设抽真空装置开始抽真空。

a. 铺设排水板和滤管。浮动工作平台在人工或机械牵引下移动,由于淤泥较为黏稠,施工开始前应使淤泥表面保持一定深度的水,减小平台在移动过程中的阻力。首先在淤泥表面铺设一层土工布,一方面利于滤管的铺设及其与排水板的搭接,土工布的存在将水平排水系统同淤泥隔离开来,防止了淤泥对滤管壁的淤堵,尤其是与排水板的连接处;另一方面也是对现场施工的一种安全防护。土工布铺设的同时,应将其缝合为一个整体。土工布铺设完成后,插设排水板。塑料排水板应按照插设深度裁剪,确保插设到预定深度,淤泥表面外露的长度足够与滤管绑扎。排水板底部应进行密封,防止在抽真空过程中泥浆进入排水板内部淤堵排水通道。根据场地排水板的布置形式,插设前将裁剪好的排水板同滤管绑扎好,将排水板和滤管一起铺设到场地后,人工插设排水板。排水板的插设由施工人员在浮动平台上插设完成。

b. 铺设密封膜。密封膜铺设前应先铺设一层土工布,一方面滤管及底层土工布一起构成水平排水系统,另一方面也防止密封膜在铺设过程中被水平排水系统损坏。由于新近吹填淤泥含水率很高,仍处于流塑状态,场地四周无法开挖压膜沟,但淤泥土本身具有很好的密封性。因此,可取消压膜沟,直接将密封膜沿四周压入淤泥内 1.0 m 左右。需要注意的是,压膜时密封膜边缘应充分展开,不可成卷直接压入。采用端头接有横向圆管的钢管,沿四周连续压入,确保密封膜整条边达到预定深度。随着抽真空的进行,要防止密封膜外侧土体开裂。

c. 抽真空。真空预压法处理吹填淤泥时,由于渗流所引起的渗透变形会加重土体不均匀固结和排水板的淤堵,比如工程中较为常见的“抱团”现象。因此过大的水力梯度将会对土体的固结产生负面影响,不利于吹填淤泥持续快速的固结。为了缓解排水板的淤堵和土体的不均匀固结,可以考虑采用线性加载或分级加载等更科学的加载形式,从而提高

加固效果^[10]。

2 加固原理

2.1 吹填淤泥渗流与固结的关系

真空预压法的实质是在不施加外部荷载的前提下,降低土体表面和塑料排水板中的孔隙水压力,在土体内部与土体表面以及塑料排水板之间产生水头差,达到渗流所需的水力梯度,从而使土体中孔隙水排出,最大限度地发挥土体自重应力来加固土体^[11]。

龚晓南等^[12]提出真空渗流场理论,认为真空预压加固地基的机理由两方面作用组成:一是真空渗流场引起的土体固结;二是地下水位下降改变土体竖向自重应力,从而使土体产生固结。在真空预压加固新近吹填淤泥时,土体内部同样会形成真空渗流场并伴随着土体内部水位的下降。高志义^[11]分析认为真空预压法加固软土地基时,土体中的渗流与固结并非因果关系,固结必然伴随着渗流,渗流并非必然导致固结,而渗流是否会导致固结主要在于是否引起了土体内水量减少,进而使孔隙水压力降低。

吹填淤泥和四周围堰、上下边界共同构成了一个较为独立的系统,如图 3 所示。对于新近吹填淤泥,土体内水位面与土体表面齐平。在抽真空开始后,孔隙水在真空负压作用下产生渗流并被排出土体,由于没有外来水源的补充,抽真空所引起的渗流必然导致单元土体流进、流出的水量不等,即土体内含水量不断减少,土体中水位面下降,孔隙水压力降低,土体必然发生固结。持续地抽真空,将使土体中水位面不断下降,直至消失,并不会像一般地基那样有地下水的补充而使土体中的渗流达到动态平衡。

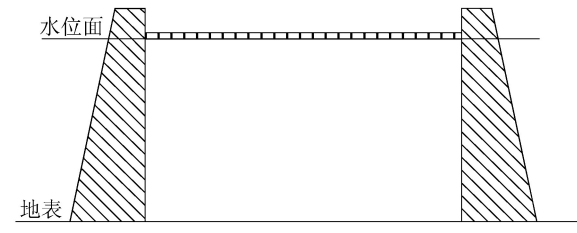


图 3 真空预压法处理吹填淤泥示意图

总之,在真空预压加固较为独立的新近吹填淤泥土体时,其真空渗流场与一般受地下水位影响的地基土体有所不同。构成独立系统的吹填淤泥的固结必然伴随着渗流的发生,同时由于没有外来水源的补充,渗流也必然导致土体固结,两者互为因果。

2.2 软土地基所受荷载分析

在软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术中,软土地基所受荷载由真空荷载和上部吹填淤泥荷载两部分组成。

真空荷载沿排水板向下传递时,其衰减速度与

排水板周围的土体有密切关系。由于吹填淤泥在真空预压过程中会发生较大的压缩变形,使排水板发生扭曲、弯折甚至局部断裂,严重影响真空度的传递效率。若采用常规真空预压法同时加固吹填淤泥和软土地基,两者采用同一套真空预压系统,将使得地基土体的加固效果大打折扣。在软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术中,软土地基和吹填淤泥分属两个相对独立的真空预压系统,从而消除了上部吹填淤泥对下部软土地基真空度传递的影响,真空度与土体深度关系曲线如图 4 所示。软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固起到了分层压实的效果。

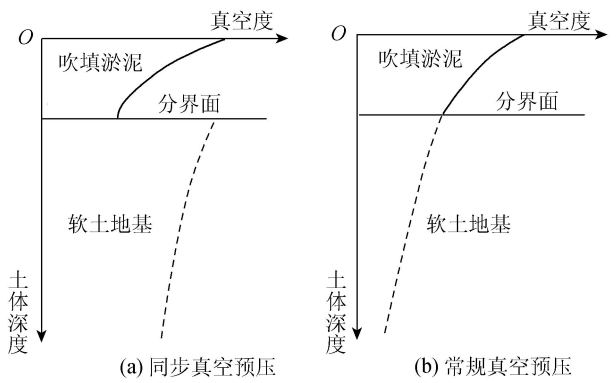


图 4 真空度与土体深度关系曲线

吹填淤泥施工开始后,即相当于开始对软土地基进行堆载。由于淤泥的吹填是一个近似匀速的过程,因此在该阶段软土地基所受荷载可视为线性增加的过程。真空预压法加固吹填淤泥时,随着抽真空的进行,淤泥中水不断排出,总质量不断减小,其对地基所施加的荷载也在不断减小。由前文分析可知,真空预压法加固吹填淤泥时,渗流与固结互为因果关系,淤泥中孔隙水的渗流必然引起固结,每排出一定体积的水,即会引起吹填淤泥等体积的固结变形。由此可采用吹填淤泥的体积改变量估算排出水的体积,继而推求出吹填淤泥的质量改变量,也就反映了软土地基所受荷载随时间的变化。在外侧围堤约束作用下吹填淤泥的固结,可视为一维固结问题,即只考虑竖向变形,忽略侧向变形。假设吹填淤泥内同一水平面上各点变形相同,不产生差异沉降,某时刻排出水的体积即可由吹填淤泥水平截面面积与该时刻竖向压缩量的乘积表示,排出水的质量即为吹填淤泥施加在软土地基上的荷载减小量。

由此可知,吹填淤泥总质量的变化可由其竖向压缩量表示,则软土地基所受上部吹填淤泥荷载也可采用吹填淤泥的压缩量来表示。吹填淤泥施加在软土地基上的荷载变化曲线如图 5 所示。吹填淤泥施工开始后,地基所受荷载线性增加,抽真空开始后

随吹填淤泥压缩量的增大而逐渐减小,并最终趋于稳定。软土地基堆载来自于上部吹填淤泥,因此可通过控制淤泥吹填的速率,调整地基加载速率,加载过程更趋近于线性。但地基土体所受堆载的大小由吹填淤泥质量决定,不可随意设定,不同于常规真空联合堆载预压法。

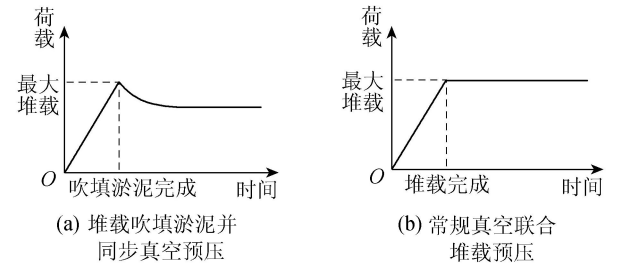


图 5 荷载变化曲线

2.3 缺点与不足

- a. 由于两层土体同步真空预压,因此,必须布设两套真空预压系统,相对传统真空预压经济成本增加。
- b. 将吹填淤泥施工融入地基真空预压过程中,增加了施工难度。
- c. 地基所受吹填淤泥的堆载,由实际淤泥吹填厚度决定,堆载大小不能随意增减。

3 现场试验

3.1 工程地质条件

采用软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术对浙江省玉环县漩门湾围垦工程三期围垦区中的一块 50 m×80 m 海滩进行加固。该加固区位于漩门三期南部,属潮滩,是明显受到周期性潮汐涨落影响的平缓海岸泥质沉积环境,地下水位 0.20 m。加固区海积层厚度为 30 ~ 40 m,地基软土最深达 45 m,绝对标高约为 1.0 m,涨潮时部分位于水下。为保证场地施工条件,在场地外围修筑了一条高约 1.5 m 的海堤,防止潮水侵入。

海积层土体物理力学性质很差,含水率在 50% ~ 60% 之间,孔隙比为 1 ~ 1.8,为淤泥或淤泥质土。液性指数普遍大于 1,呈软塑-流塑状态,强度较低。渗透系数较小,尤其是上部水平渗透系数仅为 10^{-7} cm/s 量级,渗透性极差。地基软土的物理力学性质指标如表 1 所示。

加固前在海积层软土地基上做十字板剪切试验,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,地基层土体经多年晾晒,已经形成强度相对稍好的硬壳层,十字板剪切强度随着地基深度的增加逐渐降低,7.5 m 深度处强度最低;7.5 m 深度以下土体剪切强度随地基深度增加而逐渐增大。由此可见,地基中 10 m

表 1 地基软土的物理力学性质指标

深度/m	密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	分类
3	1.72~1.81	44.6~47.6	22.6~25.0	2.1~2.9	4.8~10.1	1.1~2.5	黏土
6	1.65~1.76	50.1~55.2	25.1~30.3	1.9~2.5	1.2~5.4	0.9~3.7	黏土
9	1.64~1.66	53.5~56.8	25.9~30.2	2.1~2.3	1.7~3.6	0.2~0.4	黏土
12	1.65~1.88	41.3~56.2	21.1~31.0	1.4~3.3	3.8~16.3	0.2~2.3	黏土
15	1.62~1.63	54.7~56.2	29.0~31.0	1.6~2.0	1.4~3.7	0.4~1.2	粉土
18	1.61~1.71	49.0~58.7	27.3~33.7	1.5~1.9	2.6~3.6	0.6~1.9	黏土

深度以上土体为主要加固对象,加固重点在于提高硬壳层以下 3~9 m 土体的强度。

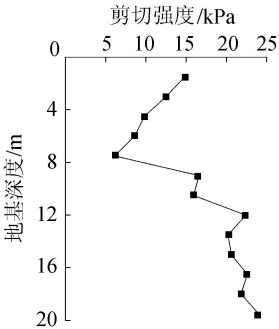


图 6 剪切强度与地基深度关系曲线

为开展现场试验研究,吹填淤泥就近取自现场海积层地基土体,土源的物理力学性质可参看表 1 中 3 m 深度处土体的性质。吹填完成后,新近的吹填淤泥层厚约 2.5 m,呈流态,强度几乎为零。从输泥管出来的淤泥含水率约为 260%~300%。经过一个月左右的自然沉积,含水率下降为 100%~150%,平均含水率约为 110%,其物理性质见表 2。

表 2 吹填淤泥的物理性质指标

深度/m	粒组质量分数/%			液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
	<0.005 mm	0.005 ~ 0.075 mm	>0.075 mm			
0.4				40.7	24.8	15.9
0.8	26.0	68.2	5.8	38.8	18.1	20.7
1.4				43.8	23.9	19.9

3.2 施工简况

地基土体排水板间距为 1 m,正方形布置,打设深度为 15 m。软土地基沉降标的平面布置如图 7 所示。2012 年 8 月 20 日开始抽真空,2012 年 8 月 25 日膜下真空度达到 80 kPa。2012 年 9 月 1 日由于潮水突然上涨,漫过外侧海堤,淹没场地,抽真空因故暂停。2012 年 9 月 12 日潮水退去后重新开始抽真空,但由于海水浸泡造成电线线路损坏,真空泵无法全部开启,直至 2012 年 9 月 26 日抽真空才恢复正常,2012 年 9 月 28 日真空度达到 80 kPa,此后除几次停电事故外,真空度一直维持在 80 kPa 以上,如图 8 所示。2013 年 3 月 5 日卸载结束,有效加载时间 150 d。

2012 年 9 月 20—25 日加固区四周修筑围堤,

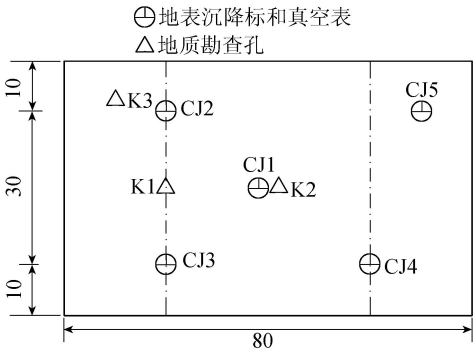


图 7 软土地基沉降标和地质勘察孔布置平面示意图(单位:m)

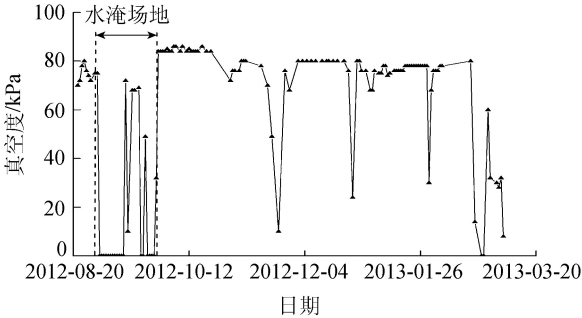


图 8 软土地基真空度变化曲线

为吹填淤泥做准备。修筑围堤所用材料为邻近地表强度较好的土,围堤外围修筑栅栏并填筑砂袋进行加固。9 月 26 日开始向场地中吹填泥浆,至 11 月 23 日吹填完成。采用水力冲填法,即高压水枪将土源区土体打散,制成泥浆,然后用大口径泥浆泵经管路输送至场地中。在远离出口一侧设出水口,用以排出吹填尾水,出水口标高随着淤泥面的升高逐渐提高。排出淤泥表层的析出水后,泥浆面较初始冲填高度会有较大的下降。12 月 31 日吹填淤泥开始抽真空,2013 年 1 月 2 日达到 70 kPa 以上,直至 3 月 20 日结束,有效加载时间为 60 d。

3.3 试验结果及分析

抽真空结束后,软土地基主要物理力学性质指标变化如表 3 所示,加固效果明显,地基软土已基本由流动状态变为了可塑状态。软土地基的最大沉降量达到 1 169 mm,平均沉降量达到 1 161 mm 以上。扣除因地基沉降引起的吹填淤泥下沉,吹填淤泥层的净沉降量,即压缩量达到 756 mm,如图 9 所示。海积层软土地基各点沉降较为均匀,各测点沉降量

和沉降速率基本一致。由此可以看出,地基土质较为均匀,吹填淤泥施加在软土地基上的荷载也较为均匀。由图 9 可以看出,在抽真空开始阶段,地基处于常规真空预压状态,沉降速率很快,几乎呈线性发展的趋势。

表 3 加固前、后软土地基物理力学指标对比						
取土深度 /m	平均湿密度/(g·cm ⁻³)		液性指数		压缩模量/MPa	
	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
3	1.77	1.86	0.94	0.65	2.6	3.3
6	1.70	1.72	1.06	0.72	2.2	3.2
9	1.65	1.71	1.20	0.81	2.2	2.1
12	1.70	1.75	0.95	0.83	2.4	2.1
15	1.62	1.64	1.30	1.09	1.8	2.4

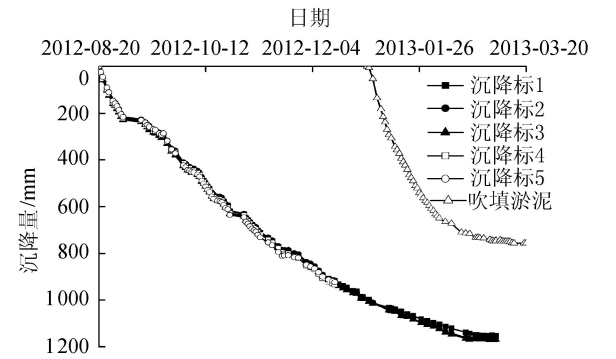


图 9 软土地基和吹填淤泥沉降量变化曲线

图 10 为软土地基沉降速率曲线,可看出抽真空初期地基的沉降速率很大,但随着抽真空的进行其迅速下降,这符合真空预压加固土体的基本特征。淤泥吹填开始后,即开始在地基上施加堆载。淤泥吹填过程中,软土地基的沉降速率有一个明显的持续增大过程,即随着堆载的增加地基在较长一段时间内处于加速沉降的状态。上部吹填淤泥插板施工期间,地基沉降速率变化平缓。吹填淤泥抽真空期间,地基沉降速率随时间逐渐减小,直至沉降达到稳定。

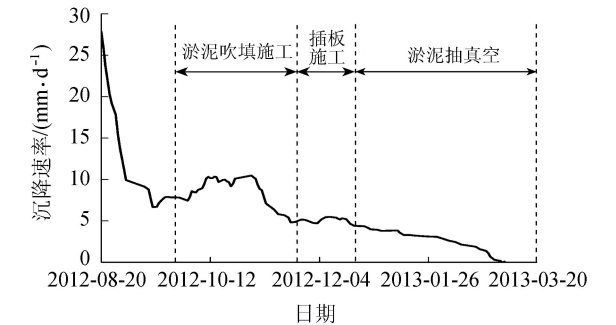


图 10 软土地基沉降速率变化曲线

在地基抽真空基本结束时,即 2013 年 2 月 21 日,开展了现场静力触探试验,此时吹填淤泥尚处于真空预压中期。加固前、后静力触探试验所得软土地基的比贯入阻力与地基深度关系曲线如图 11 所示。可以看出,地基承载力明显增大,取得了良好的

加固效果,尤其在 6 m 深度以上土体强度平均增长超过了 80%,4 m 深度以上土体强度平均增长达到 95% 以上。但随着深度的增加,强度的增量逐渐减小,10 m 深度以下土体强度增加已经很少。

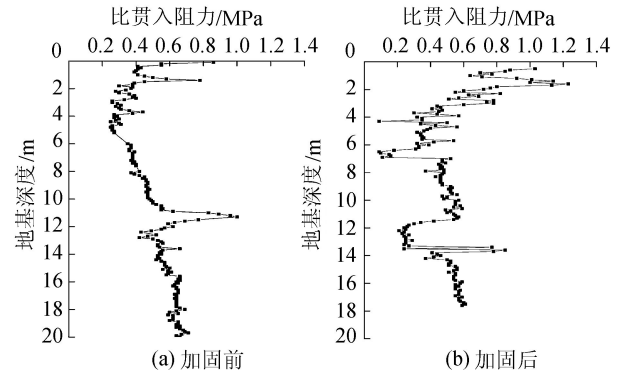


图 11 软土地基比贯入阻力与地基深度关系曲线

现场进行了吹填淤泥加固中期的静力触探试验,比贯入阻力与淤泥深度关系曲线如图 12 所示。此时土体已经具备了一定的强度,真空预压取得了阶段性的成果。1 m 深度以上土体强度变化相对均匀,沿深度方向逐渐减小,符合真空预压加固吹填淤泥的基本规律。1 m 深度处发生了突变,疑似碰到贝壳、石块等坚硬物体。1 m 深度以下土体强度的陡然增加,也反映了吹填淤泥土体的不均匀性。

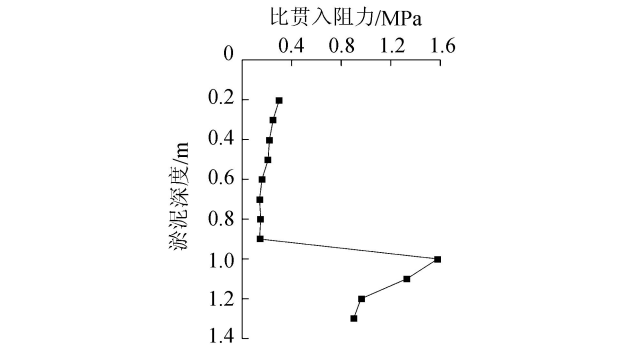


图 12 吹填淤泥比贯入阻力与淤泥深度关系曲线

为了测定真空预压法对吹填淤泥的最终处理效果,在现场进行了平板载荷试验。根据每级荷载所对应的沉降量,绘制荷载与沉降量关系曲线,如图 13 所示。从荷载与沉降量关系曲线上可确定极限荷载

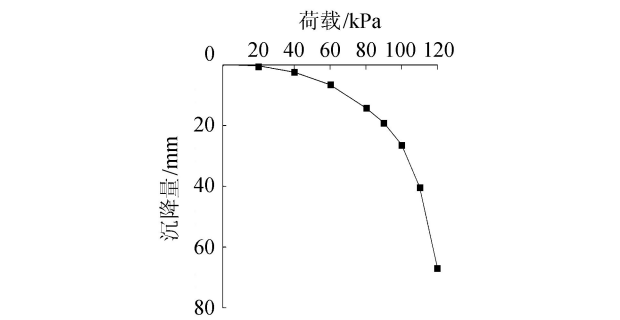


图 13 荷载与沉降量关系曲线

$p_u=110\text{ kPa}$,取 p_u 的一半作为地基承载力,则未经基础埋置深度和宽度修正的地基承载力 $f=55\text{ kPa}$,达到了试验要求的 50 kPa 。

加固区是沿海滩涂,采用软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术取得了良好的加固效果。软土地基2012年8月20日开始抽真空,2013年3月5日卸载,抽真空结束,历时197 d。2012年9月20日开始在加固区四周修筑围堤吹填淤泥造陆,至2013年3月20日吹填淤泥真空预压加固结束,历时181 d。两阶段总计378 d的抽真空时间,被整合到同一加固周期进行施工,缩短到212 d,大幅度缩短了造陆工期,取得了较好的经济效益。地基土体强度增长明显,产生了较大的预压沉降量,整体加固效果显著。同时,吹填淤泥土体的处理也取得了较为明显的加固效果,达到了试验的要求。

4 结 语

本文提出了软土地基堆载吹填淤泥并同步真空预压加固技术,将吹填淤泥加固及软土地基加固两阶段施工整合到一个真空预压周期内进行,无须对吹填淤泥进行晾晒或先期处理,预计378 d的抽真空时间,缩短为212 d,大幅缩短了造陆工期。现场试验结果表明,软土地基承载力明显增大,取得了良好的加固效果,6 m深度以上土体强度平均增加80%以上,4 m深度以上土体强度平均增加95%以上,取得了良好的加固效果。

参考文献:

[1] 章定文,韩文君,刘松玉,等. 劈裂真空法加固软土地基的效果分析[J]. 岩土力学,2012,33(5): 1467-1472. (ZHANG Dingwen, HAN Wenjun, LIU Songyu, et al. Effect analysis of a soft ground reinforced by a combined vacuum preloading and pneumatic fracturing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1467-1472. (in Chinese))

[2] 曹永华,李卫,刘天韵. 浅层超软土地基真空预压加固技术[J]. 岩土工程学报,2011,33(1): 234-238. (CAO Yonghua, LI Wei, LIU Tianyun. Surface-layer improvement technology for ultra soft soil by vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 234-238. (in Chinese))

[3] 胡珩,王保田. 真空法作用面位置对加固效果影响的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(5): 1287-1290. (HU Heng, WANG Baotian. Experimental study of effect of vacuum location on improvement of subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1287-1290. (in Chinese))

[4] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京:人民

交通出版社,2002.

[5] 彭涛,武威,黄少康,等. 吹填淤泥的工程地质特性研究[J]. 工程勘察,1999,27(5): 1-5. (PENG Tao, WU Wei, HUANG Shaokang, et al. Research on engineering geologic properties of hydraulically filled muck[J]. Journal of Geotechnical Investigation and Surveying, 1999, 27(5): 1-5. (in Chinese))

[6] 刘莹,王清. 江苏连云港地区吹填土室内沉积试验研究[J]. 地质通报,2006,25(6): 762-765. (LIU Ying, WANG Qing. Laboratory tests for the sedimentation of dredger fill in the Lianyungang area, Jiangsu, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(6): 762-765. (in Chinese))

[7] 吴正友. 连云港吹填泥浆沉积和固结性质的现场观测与分析[J]. 水运工程,1990,19(4): 1-6. (WU Zhengyou. The field observation and analysis of sedimentation and consolidation of hydraulic fills in Lianyungang Port[J]. Port and Waterway Engineering, 1990, 19(4): 1-6. (in Chinese))

[8] 孙立强,闫澍旺,李伟,等. 超软土真空预压室内模型试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(4): 984-990. (SUN Liqiang, YAN Shuwang, LI Wei, et al. Study of super-soft soil vacuum preloading model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 984-990. (in Chinese))

[9] 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,2010,32(9): 1429-1433. (ZHU Qunfeng, GAO Changsheng, YANG Shouhua, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1429-1433. (in Chinese))

[10] 武亚军,杨建波,张孟喜. 真空加载方式对吹填流泥加固效果及土颗粒移动的影响研究[J]. 岩土力学,2013,34(8): 2129-2135. (WU Yajun, YANG Jianbo, ZHANG Mengxi. Study of impact of vacuum loading mode on dredger fill flow mud consolidation effect and soil particles moving[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2129-2135. (in Chinese))

[11] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报,1989,11(4): 45-56. (GAO Zhiyi. Analysis on mechanics of vacuum preloading method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(4): 45-56. (in Chinese))

[12] 龚晓南,岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报,2002,35(2): 7-10. (GONG Xiaonan, CHEN Yangrun. Mechanism of vacuum preloading[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(2): 7-10. (in Chinese))

(收稿日期:2013-11-13 编辑:周红梅)