真空预压法加固软土地基技术的新发展

苗中海　　郭树军
(天津港湾工程研究所，天津，300222)

提　要　本文结合工程实例介绍了真空预压加固技术通过工艺改进提高膜下真空度及在复杂地基、边坡地基加固中的应用情况。

一　前　言

真空预压法是排水预压加固处理软土地基的方法之一。该项技术的关键是在膜下形成并维持一定的真空度。以往由于设备能力、工艺水平的限制，设计上采用如下的标准：膜下真空度 75~80kPa（预压荷载），单台抽真空设备控制面积 600~1500m²(视不同地质条件)。经过近几年的工程实践，我们不断地总结经验，研究解决新问题，使该项技术取得了一些新发展，扩展了其应用范围，主要如下：

1.改进抽真空设备及施工工艺,膜下真空度达到 90kPa 以上，使预压荷载由 80kPa 提高到 90kPa。单台(套)抽真空装置控制面积达 2500~3600 m²。

2.开发出了粘土拌和墙真空预压技术，以加固含有透气、透水层的复杂地基。

3.临近边坡的地基加固,特别是边坡处于临界状态时采用真空预压技术。

本文拟结合工程实例对上述几点作以介绍。

二　抽真空设备及施工工艺的改进

1. 抽真空设备的改进

传统的抽真空装置多采用单级离心式水泵，其缺点是防潮性差，维修、保养量大，且射流器在高速水流冲击下材质在使用中磨损较大，使其尺寸变化，效率降低。改进后的抽真空装置采用深井泵，射流器材料采用高耐磨材质，其优点是：水泵效率提高，噪音减小，维修、保养量大大减小。

2. 抽真空装置的放置位置

为了提高抽真空效率，我们将抽真空装置中的射流喷嘴(负压源)放在箱底。箱底喷嘴与加固区表面基本持平，或放置在坑内则稍低于加固区表面，由于降低了负压源的位置，提高了抽真空的效率，减少了水头损失,有助于提高膜下真空度。

3. 施工工艺的改进

取消传统的出膜装置，直接用硬质聚乙烯塑料管穿过密封膜与抽真空装置相连，减少

了水流的弯头损失，避免了传统的弹簧胶管内层胶皮剥落、堵塞胶管的现象，有利于真空度的传递。采用薄壁且壁上带有孔眼的螺旋状尼龙管，规格为内径 60mm，长度可达 100m。滤管根据设计间距整条铺设，因此适应地基在预压过程中产生的不均匀沉降。

工程实例：

表 1 施工技术改进后单台设备控制的加固面积

工程名称	加固面积	抽真空装置(台)		单台控制加固面积	膜下真空度
	(万m^2)	实际安装	实际运行	(m^2)	(kPa)
壳牌润滑油用地	5.0	20	18	2500~2700	93
壳牌化工品仓库	1.8	6	5	3000~3600	95
壳牌乳化沥青用地	5.0	18	16	2700~3100	94
埃索用地	5.3	18	17	2900~3300	95

表 1 列出了四个工程的应用情况，从表中可以看出，采用改进后的抽真空设备及施工工艺，膜下真空度可达 90kPa 以上，最高可达 95kPa，单台(套)抽真空装置控制面积达到 2500~3600m^2。与传统的设备相比，单台泵的控制面积增加一倍。膜下真空度高出 10kPa，相对 80kPa 设计预压荷载，在达到同样加固效果下，地基土得到了超载预压，可以缩短预压工期，当预压荷载大于 80kPa 时，由于膜下真空度的提高，能相应减少堆载材料。采用改进后的施工技术能降低成本，具有明显的经济和社会效益。

三　复杂地基中采用真空预压

真空预压法是排水预压加固地基的方法，它适用于软粘土地基。为获得所需要的预压荷载，就要使膜下形成并维持一定的真空度，在通常情况下，在软粘土地基上用较简单的方法加以密封，就很容易做到。但是，在某些特殊情况下，如表层或在加固土层某一深度处存在有透气、透水砂层、抛石围埝时，如不采取一些工程措施，则难以达到并维持要求的真空度。经过几年探索及几种方案的比选，开发了一种新的密封技术，即：密封膜—粘土拌合墙系统，该施工工法主要程序如下：

——采用深层水泥拌合设备，在加固区周围透气、透水层中拌制连续粘土密封墙，墙宽 1.2m，如处理表层透气、透水层时，墙底要进入下卧粘土层 0.5~1.0m；

——在地基表面铺设密封膜，然后将密封膜周边插入粘土拌合墙中，其它工序同一般的真空预压。

该工艺的关键就是粘土密封墙的施工质量，施工质量控制一般采用如下标准：

1. 粘土的粘粒含量>20%，也可适当加膨润土。
2. 泥浆密度控制在 1.25~1.3 之间(用比重计测量)。
3. 每根桩搭接 20cm，误差在±50mm 范围。
4. 粘土拌合墙的渗透系数小于 1×10^{-5}cm/s。

施工过程中在拌合墙中取样进行粘粒含量测试及渗透试验。一般情况下现场粘土掺量按25%控制，基本可以满足抽真空密封的技术要求。取样间距视现场施工情况而定。

到目前为止，我们已先后在六个真空预压工程中采用粘土拌合墙技术，总加固面积达到40万平方米，证明了该技术的可靠性(见表2)。

表2 地基表面覆盖砂层的真空预压加固工程

编号	工程名称	加固区面积 (m^2)	砂土层厚度 (m)	软土层厚度 (m)	拌合墙厚度 (m)	拌合墙深度 (m)	加固日期
1	济南遥墙机场跑道	145000	3	8	1.2	3.5	1990.9.1
2	汕头港后方堆场	57248	8	17	1.2	8.5	1994.9.5
3	妈湾港一期工程	20184	4	12	1.2	4.5	1995
4	妈湾港二期工程	12028	3.5	12	1.2	4.0	1997
5	珠海发电厂	70000	6	10	1.2	6.5	1997
6	天津港南疆非矿码头	7433	地表下2m 0.5~2.0	14	1.2	5.0	1999

工程实例：

粘土拌合墙在广东汕头港的应用

该地基处理工程位于广东省汕头港深水泊位后方，总面积57248平方米，地基加固后用于建造堆场。加固区的表层有吹填及回填的细砂及中粗砂，其下部是原海底粘土。砂层厚度由4.0m至12.5m不等。主要加固处理土层是原海相沉积软粘土，平均厚度20m，最大厚度25m。

采用真空联合堆载法处理海相软粘土地基，预压荷载由两部分组成：(1)真空预压荷载80kPa；(2)在真空预压密封膜上堆填4.3~4.5m砂土。总预压荷载为140kPa。

为密封加固地基表层，采用了密封膜—粘土拌合墙技术。其主要参数如表2所示。在进行粘土—砂密封墙施工之前，已注意到本工程的以下特点：(1)表层砂为粗砂，其渗透系数高达 2×10^{-2}cm/s,难以密封；(2)最大粗砂层厚度达12.5m；(3)加固区靠近海边，水的补给来源充足。因此，拌制高质量密封墙使之在加固过程中始终保持良好的密封性，保证加固过程中一直维持加固区的较高的真空度是较困难的。一旦密封墙的某一区段未拌入足够的粘土，出现“漏洞”，则在抽真空过程中就会漏水，引起密封墙的迅速冲刷破坏，最终使真空度难以维持，导致真空预压以失败而告终。

为保证粘土—砂密封墙的质量，对所有拌合工序进行了严格控制。而且，密封墙的质量与连续性还通过现场定水头渗透试验、现场钻孔及扰动土样室内土工试验等方法进行了监测检验。检验点间距控制在60m，渗透系数控制标准为 $k\leqslant10^{-6}$cm/s。为便于加固处理，本工程分为两个小加固区进行施工，其面积分别为28000m^2、29000m^2。由于密封墙施工质量较好，预压荷载在抽真空后半个月达到80kPa。整个加固区在回填砂荷载满载后维持125d，加固效果如下。

在整个预压荷载下平均地面沉降量达1.73m，平均固结度89%，残余沉降量估计为22cm。

地基处理后加固土的物理力学指标变化十分显著，见表3。

表3

名　　称	加固前指标	加固后指标
含水量 ω (%)	64~77	49~51
重度　γ(kN/m^3)	15.4~16.1	16.9
孔隙比　e	1.7~2.1	1.3~1.4
液性指数　I_L	2.3	1.2
十字板强度　C_U(kPa)	8~24	54~62
SPT　N	1~2	4

上述加固处理结果表明，在表面覆盖厚砂层地基中密封膜—粘土砂拌合墙系统是保证真空预压达到高真空度的可靠方法。

四　临近边坡的地基加固

在软土地区进行港口工程建设，码头接岸部位往往需要进行地基加固处理，特别是当由于挖泥或采用堆载预压时，由于土质软弱土体产生位移，边坡处于临界状态，需采取各种补救措施并严密观测位移情况而对整个工期造成很大影响，同时由于采取各种措施造成工程费用提高。因此，选择合适的软基加固方法对工程建设是十分重要的。近几年我们在天津港东突堤南侧码头、天津港南疆非矿码头接岸部位 30~40m 范围内采用真空预压加固技术，在深圳妈湾港堆场软基加固边坡滑动过程中采用真空预压加固技术，取得了很好效果，现对其中二项工程施工情况做以下介绍：

工程实例：

1. 天津新港高桩码头接岸带真空预压加固工程

天津新港东突堤南端高桩码头长 970m，码头断面如图 1 所示。

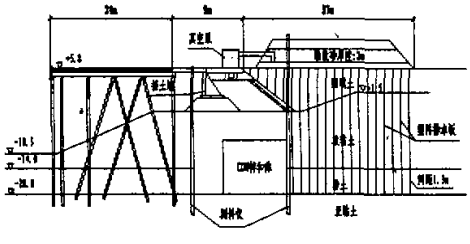


图 1 码头接岸部分地基处理

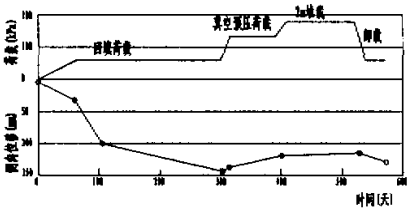


图 2 荷载—水平位移曲线

由于原地基强度低，L 型挡土墙下部软粘土采用 CDM 工法(水泥深层拌合工法)进行处理。采用该法处理地基使码头承台宽度缩短一半。

根据码头整体稳定分析，CDM 处理土之后的软土地基需要进行堆载预压加固处理。

为控制稳定性，在 CDM 拌合体的前后都埋设了测斜仪，用以观测施工过程中 CDM 拌合体的水平位移(图 2)。位于东突堤中部的 C-C 区(长度 150m，宽度 37m)，由于软土层厚度大，CDM 拌合体前方-3.5m 处在其后方刚刚回填时即发生 114mm 的水平位移。为防止更大位移及可能继之发生的码头整体破坏，决定用真空联合堆载法(预压荷载为真空预压 80kPa 及堆载 2m，总荷载约 114kPa)代替原定的常规堆载预压法。

真空联合堆载加固处理工程面积为 5500m²。原塑料排水板间距 1.3m，正方形布置，深度至 - 14m；后在塑料板中心部位增设塑料排水板并打设至 - 20m，目的是加速新发现的深部粘土层的固结，提高码头的整体稳定性。

图 2 给出了施工过程中测斜仪测得的 CDM 拌合体 - 3.5m 处的水平位移。

由以上曲线可以看出，真空预压后水平位移立即变为向岸方向，有效地控制了整体滑动的发展。

真空联合堆载共 200d，平均沉降量 1.8m，固结度 94%；加固后的物理力学指标变化很大，含水量 ω 由 35%~61%降低至 34%~48%，重度由 16.5~18.5kN/m³ 增至 17.5~19.0kN/m³，十字板强度由 21~40kPa 增至 56~65kPa。

采取以上加固措施后，天津新港东突堤南侧码头工程如期顺利完成。该工程实例表明，真空预压法与常规堆载预压法相比具有独特的优越性，它尤其适用于临界边坡附近的软土地基处理。

2. 妈湾港堆场真空预压加固工程

该工程位于广东省妈湾港深水泊位后方，加固面积 12028m²，地基处理后用做码头后方堆场。

由于工期的限制，该加固工程与前方深水泊位开挖同时进行。因此，临近加固区的开挖边坡的稳定性受到普遍关注。为确保该边坡的稳定性，决定采用最适于危险边坡附近软基处理的真空预压法。为满足场地标高要求，真空膜上需要堆填 5.7m 厚砂土，加上水下部分填土的影响，原软土地基增加的总荷载为 145kPa。

加固处理地基由厚 12m 的海相沉积软粘土及 3.5m 厚回填中粗砂组成。塑料排水板间距 1.0m，正方形布置，长度 15.5m。

为密封上部砂层，采用了密封膜—粘土砂拌合墙系统技术，粘土砂密封墙平均厚度 4.0m，墙厚 1.2m。

临近边坡部分的加固区断面如图 3 所示。

根据原加固设计，码头泊位边坡开挖应在真空预压加固抽真空后开始进行。由于各种原因，边坡开挖提前进行。因此，在开挖后不久发生了边坡滑动，部分打设于加固区边部的塑料排水板亦遭破坏。根据以上情况，对原设计进行了以下调整。

1. 系数 $K_{min}\approx 1$，边坡开挖必须按设计坡度审慎进行，决不允许超挖。

2.开挖边坡须待真空预压开始抽真空后进行。

1997 年 1 月 10 日开始抽真空，随后重新开始进行边坡开挖。由于真空预压对边坡的稳定作用，前方港池开挖按设计边坡与深度于 1997 年 1 月底安全顺利完成。整个地基加固工程亦于 1997 年 8 月 22 日顺利完成。

由于采用真空预压法，使该码头前方的边坡开挖与其后方的陆地回填及软土地基处理

工程得以同时进行，充分显示出真空预压法在临界边坡地带地基处理方面的优越性。

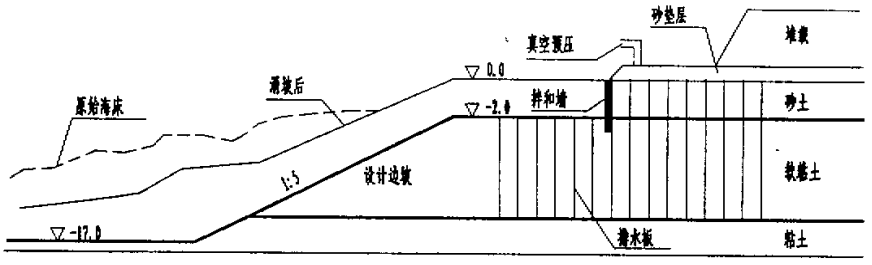


图 3　临近边坡部分的加固区断面图

加固后地基总沉降达 2.7m，加固土的物理力学指标也发生了明显变化。含水量 ω 由 64%~73%降低至 39%~56%，重度由 15.5~16.3kN/m³ 增至 16.7~18.3kN/m³，十字板强度由 10~23kPa 增至 39~53kPa。

五　结束语

真空预压加固软土地基技术自 1985 年 12 月通过国家技术鉴定后，又分别被国家计委与交通部列为重点推广新技术。在十多年的推广应用中，真空预压技术取得了一些新的进展，使该项技术日趋成熟完善，在港口、公路、机场、电厂、油罐工程建设中得到了广泛的应用。截止目前，据不完全统计，采用真空预压技术加固软土地基达 350 万平方米以上，取得了巨大的经济效益和社会效益。我们深信，随着我国经济建设的迅猛发展，该项技术在其它领域还会得到进一步的开发和利用，同时该项技术还会得到进一步的完善与提高，使加固成本进一步降低，使其发挥更大的经济效益和社会效益。