

# 大面积吹填陆域真空预压密封墙处理技术的应用

李 军<sup>1</sup>, 胡继业<sup>1</sup>, 邓元广<sup>2</sup>

(1.广州四航工程技术研究院, 广东 广州 510230; 2.广州港水运工程监理公司, 广东 广州 510230)

**摘 要:**针对大面积软基处理真空预压施工, 提出搅拌桩密封的必要性和可行性, 并通过工艺试验提出双排长短桩搅拌墙密封方案, 采取有效措施解决大面积真空预压共用密封墙双向抗渗沉陷开裂及周边密封的持久有效性等技术难题。通过实例分析证明共用密封墙处理技术是成功的, 对今后大面积真空预压具有借鉴和指导意义。

**关键词:**吹填陆域; 真空预压; 密封墙; 应用

中图分类号: TV52

文献标识码: B

文章编号: 1002-4972(2004)02-0044-05

## Application of Vacuum Preloading Sealing Wall Technique for Large-area Reclaimed Land

LI Jun<sup>1</sup>, HU Ji-ye<sup>1</sup>, DENG Yuan-guang<sup>2</sup>

(1.Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, Guangzhou 510230, China;

2.Port & Waterway Engineering Supervision Company of Guangzhou Port, Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** In view of vacuum preloading construction for large-area soft foundation treatment, the authors expound the necessity and feasibility of sealing of mixing piles. Through technological experiment, the authors put forward the sealing scheme of "double-row long & short piles mixing wall", taking effective measures to deal with the technical difficulties of double-way impermeable settlement crack and persistent effectiveness of peripheral sealing of large-area vacuum preloading. Through analysis of an engineering example, it is proved that common sealing wall treatment technique is successful and it may serve as a reference and direction for future large-area vacuum preloading.

**Key words:** reclaimed land; vacuum preloading; sealing wall; application

### 1 前言

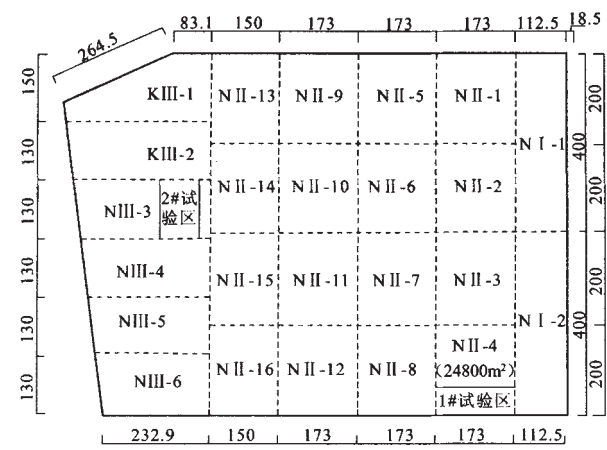
目前, 国内外经济发达地区特别是沿海地区, 均面临着发展陆域严重不足的窘况, 极大地限制着经济发展, 因此, 纷纷兴起围海造陆的热潮。围海造陆均面临着软土地基加固的课题, 特别是超软弱地基具有含水率高、压缩性大、强度及承载力低等特点, 而真空预压法可以在短期内一次性将荷载加上去, 同时节约堆载料资源, 因此目前国内大型超软弱地基基本上采用真空预压法地基处理技术。

广州港南沙护岸围堰及试挖工程北段软基处理工程(图

1)包括大面积的人工吹填造陆及真空预压, 面积达84万平方米, 是广州港南沙港区一期工程道路及堆场的地基工程。港区陆域是在原有滩涂地基上吹填淤泥、中细砂形成的。新吹填的上部软土含水率高达80%以上, 强度和承载力极低, 如此大的吹填造陆在国内尚属首次。0.5m以下为围垦造地形成的鱼塘, 土层以灰色淤泥为主, 含水率高, 强度低; 0.5~4.8m为吹填淤泥混中细砂为主。本工程采用打塑料排水板结合真空预压法进行软基处理。工程于2003年1月13日正式开工, 真空预压分为24个区域, 单块区域面积3~4.5m<sup>2</sup>, 2003年9月23

收稿日期: 2003-10-28

作者简介: 李 军(1972-), 男, 江苏徐州人, 工程师, 从事岩土工程及软基加固施工。



注:1.虚线代表共用密封墙位置;  
2.图中周边粗实线为双排搅拌桩,深度约 8m;  
3.加固区内虚线采取长短桩结合,长桩深度 8m,短桩深度 5m。

图 1 真空预压平面布置图

日竣工,膜下真空度均达到85kPa以上,加固效果良好。

加固区周边密封通常采用开挖密封沟(淤泥层较浅)和止水帷幕密封墙两种方法,密封沟施工成功与否直接关系到真空预压的成败。特别是加固区相连,相连区域施工不同步,需要解决共用密封墙施工难题及周边密封持久有效性问题。

2 工艺试验分析

由于吹填区四面环水,地下水位高,而且加固区相连,各加固区之间共用一条密封沟,为确保真空预压施工的一次成功,加固区的四周密封是最为关键的一环。由于吹填淤泥混砂层太厚(平均厚度超过6.0m),因此当表层存在良好透气(水)层(厚度大于2m),密封沟无法封堵时,采用泥浆密封搅拌墙进行封堵。根据设计,泥浆搅拌桩采取单排,直径700mm,两桩彼此搭接20cm,桩中心距50cm。泥浆搅拌桩必须穿透透气(水)层进入其下不透水层50cm,桩的平均长度约6.5m。

2.1 配合比试验

根据设计参数,取现场淤泥做了配合比试验,校核搅拌墙的密封性能,采用含水率为75%的淤泥与粉细砂和粗砂分别进行配合比试验,其结果见图2。

由图2可知,对于表层中粗砂,淤泥与砂的掺入比要达到40%,渗透系数小于 $1 \times 10^{-6}$ cm/s,掺入后含泥量( $<0.075$ )大于20%。对于粉细砂,淤泥与砂的掺入比要达到25%,渗透系数小于 $1 \times 10^{-6}$ cm/s,掺入后含泥量( $<0.075$ )大于50%。

2.2 试打工艺桩

根据配合比试验参数进行工艺桩试打,对于履带式双管搅拌桩机及步履爬行式搅拌桩机采取四喷四搅方式施工,泥浆比重 $\geq 1.35$ ,下搅速度1.2m/min,上搅速度0.8m/min。当仪

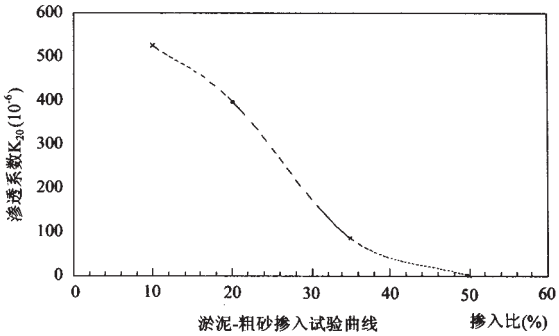
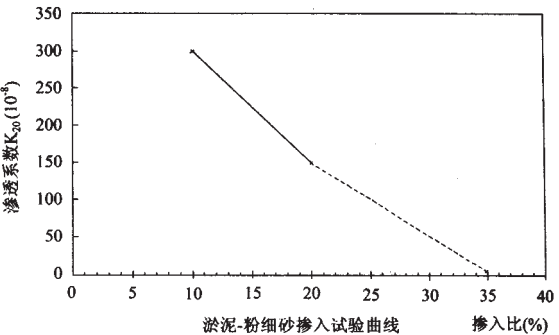


图 2 淤泥与砂掺入比试验曲线

表电流读数小于30A时,掺入比为25%,当仪表电流数大于30A时,掺入比为40%。成桩1个星期后,钻取不同深度的搅拌墙进行渗透系数和含泥量试验,其结果见表1。

表1 不同工艺搅拌桩施工质量检验

| 取样深度(m)               | 步履爬行式搅拌桩机 |       |      | 履带式双管式搅拌桩机 |       |       |
|-----------------------|-----------|-------|------|------------|-------|-------|
|                       | 2         | 5     | 8    | 2          | 5     | 8     |
| 渗透系数( $10^{-6}$ cm/s) | 0.479     | 0.727 | 1.03 | 0.656      | 0.965 | 0.596 |
| 含泥量(粒径 $<0.095$ )%    | 26.2      | 30.5  | 36.5 | 38.2       | 39.2  | 29.6  |

试验证明:通过试打工艺桩,采用以上施工工艺满足密封要求。

2.3 墙体抗渗分析

搅拌墙在抽真空前基本上是饱和土体,土性为淤泥混砂。抽真空伊始,墙体在较低土体基质势下发生脱水现象,出现液相渗流。随后,土体基质势随着真空吸力的增大而增大,当基质势超过一定值后,也即真空吸力达到一定数值后,渗流加速,细粒有可能被带走,伴随着气液两相流的产生。如果墙体较薄,高基质势范围可能延伸至搅拌墙外砂层中,基质势不足以平衡真空吸力,造成砂层中的空气和水份进入加固区内。随着水份补给减少,出现气相流动,真空度回落到一相对稳定数值。如果墙体较厚,高基质势范围还不足以扩展到搅拌墙外,就会因搅拌墙体内饱和度降低,引起墙渗透系数减弱,同时增强了搅拌墙的抗渗能力,搅拌墙体因渗透系数

变低而维持较高的真空度。

### 2.3.1 搅拌墙体临界水力坡降

抽真空时,墙体临界水力坡降受渗透系数影响,渗透系数越小,临界水力坡降越大。而搅拌墙附近土体不均匀系数较大,墙体与砂层渗透系数差异大,墙体土粒易产生潜蚀现象,产生潜蚀的临界水力坡降估算如下:

$$I_c(G-1)(1-n)+0.5n=(2.68-1)\times(1-0.5)+0.5\times0.5=1.09$$

而抽真空后,真空度达80kPa以上时,真空预压区水位下降一般为3~7m,墙体两侧压差一般大于1m,则发生渗透时的最大水力坡降估算为:

$$I=1/0.5=2.0$$

很明显,在真空度较高的情况下,单排搅拌墙体颗粒很易流失,造成气密性降低。

### 2.3.2 水位降深在搅拌墙体内的影响半径

国内外并无文献探讨水位降深在搅拌墙体内的影响半径,暂姑且将半无限厚搅拌墙看成潜水层,潜水深度 $H=20\text{m}$ ,真空预压加固区抽水井,其水位降深 $S=3\sim7\text{m}$ ,渗透系数取搅拌墙体平均渗透系数,约为: $k=5.184\times10^{-4}\text{m/d}$ ,采用库萨金经验公式概略计算搅拌墙内影响半径为:

$$R=2s\sqrt{Hk}$$

$$R=2\times5\times(20\times5.184\times10^{-4})^{0.5}=1.02\text{m}$$

很明显,单排搅拌墙最薄处仅为0.5m,最厚处仅为0.7m,厚度小于真空预压抽水的影响半径(1.02m),即水分运移将跨越墙体延伸至加固区外,使加固区外的水、气参与运移并流向加固区内。双排搅拌墙厚度最宽处为1.2m,窄处宽度为1.0m,采用双排搅拌墙就能很好地解决抽水跨越问题。

## 3 密封墙施工难点及处理技术

### 3.1 深度探摸

由于加固面积大,地质条件存在差异,为了准确地确定搅拌墙的深度和排数,采用钻孔取土样进行探摸以确定影响真空密封的搅拌墙深度。砂层较厚处采用双排搅拌桩,而在施工过程中,相邻区域抽真空时间间隔大于15d的采用双排长短桩相结合的搅拌墙。搅拌墙探摸按50~100m一个孔的布置原则进行钻孔,根据砂层厚度,要求搅拌桩施工深度进入淤泥层不少于50cm,现场探摸深度过程中由监理工程师、设计、业主现场确认开始实施。

### 3.2 密封墙处预埋密封膜

对于区域相联结的交界处密封墙,特别是4个区域交界处的密封处理好坏直接关系到真空预压效果,故预先将后续

区域搅拌桩施工3~5m左右,以便于后续区域搅拌桩施工连接,同时也便于密封膜埋设处理。对于连接部位密封膜的埋设,采取埋设小幅密封膜,再进行粘结的办法确保密封。

从试验区施工情况看,在泥浆搅拌墙完工后,旁边砂会慢慢回填,致使搅拌墙的厚度缩小,如间隔时间过长,可能导致搅拌墙被填埋而失效,所以在不增加搅拌墙厚度的情况下,必须加快铺设密封膜的速度。NI和N II之间,或N II 1-4和N II 5-8之间等不同时施工的区域间密封墙,都存在先后铺膜的问题,可能导致后铺膜时密封沟已密实或堵塞。采取的解决方法是在铺设密封膜的同时,将1幅窄条的密封膜先埋设好,预留膜接头,后续区域的密封膜可以现场热合或用胶水粘合(图3)。

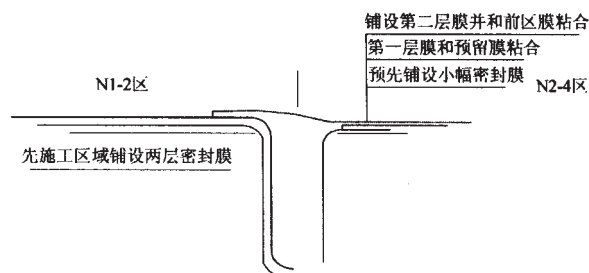


图3 密封墙处铺膜踩膜示意图

### 3.3 选择双排长短桩结合方案的理由

NI-2区真空预压施工于2003年3月20日开始,3月28日开始抽真空,至3月31日膜下真空度达到85kPa。4月2日下午膜下真空度开始下降,经过反复查漏补遗,发现真空度下降的主要原因是靠近NII区一侧的密封墙漏气。经分析,漏气的主要原因是:搅拌墙采用单排桩(NI-1区采用双排桩),抽真空过程中,密封墙体泥浆颗粒逐渐被抽走,造成密封墙渗透系数增大,同时密封墙体收缩为30cm宽左右,渗径较短,一旦真空度达到800kPa以上,外界的空气和水容易渗透,造成真空度下降。漏气示意情况见图4。

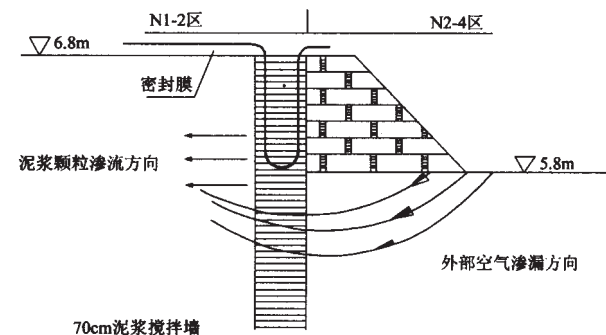


图4 密封墙漏气示意图

针对上述因素,基本认定单排搅拌桩无法满足密封要求,采取加快后续的二-4区和二-3区真空预压施工,通过整体密封确保二-2真空度不下降。

二-4区和二-3区真空预压密封膜铺设后,可以感觉到临近二-2区的密封膜迅速贴紧砂面,经检测膜下存在10kPa左右的真空压力,证实了共用密封处产生了漏气。当二-4区和二-3区整体真空度平均上升80kPa左右时,二-2区膜下真空度已经提升到85kPa。

为确保84万平方米软基真空预压施工顺利进行,施工方邀请了设计、监理、业主及有关专家进行论证,确定后续区域共用密封墙全部采取长短桩结合的双排搅拌桩施工方案,既节省工程造价,又可以增大密封墙体的宽度,增长渗径,确保密封。

### 3.4 共用密封墙双向抗渗处理

相邻区域在抽真空过程中,随着真空度的提升,共用密封墙处的密封膜经常拉裂,密封墙处形成较深的空洞,由于二区采取堆载联合真空预压的施工方法,一旦堆载后出现密封墙处拉裂漏气情况,修补将极为困难。经分析,密封墙处拉裂的主要原因是:真空预压原理是加固体内形成负压,将土体内的水、气排出加固体,使加固体得以收缩以提高加固体的强度。相邻区域收缩方向刚好相反,致使共用密封墙处土体颗粒被两侧真空压力抽走,形成空洞,横向收缩造成密封膜拉裂。共用密封墙处密封膜拉裂示意图见图5。

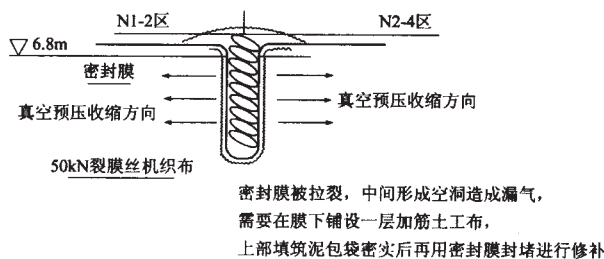


图5 共用密封墙拉裂及修补示意图

对后续真空预压施工,采取如下措施解决共用密封墙双向抗渗难题:在铺设密封膜过程中,将3m宽的土工布先踩压在密封墙体内,再将密封膜踩入,同时将相邻区域密封膜间填筑泥包袋,顶部采用密封膜粘结封堵。

通过上述措施,较好地解决了共用密封墙处漏气的难题,后续真空预压施工顺利,膜下真空度稳定在85kPa,监测数据表明加固效果良好。整个区域平均固结度达到93%以上,残余沉降小于20cm。

## 4 加固效果评价

密封墙质量的好坏直接关系到真空预压的成败,而检验加固效果的最好办法就是在施工过程中对加固区域进行实时监测。本工程设计了大量的监测(检测)项目,包括:真空度检测、表层沉降监测、孔隙水压力监测、水位监测、分层沉降监测、深层位移监测,以及加固前后土工试验、加固前后现场十字板剪切试验等。现以二区监测资料分析评价密封墙处理后的加固效果。

### 4.1 真空度评价

加固过程中真空度的高低及其在加固过程中稳定与否,是取得良好加固效果的关键因素。本工程所有区域膜下真空度长期维持在85kPa以上,真空度深层传递效果明显,通过在不同深度及密封墙外侧埋设真空测头显示:加固区内部分点15m深度处真空度约为30kPa,双排搅拌桩外侧真空度基本为0,证明搅拌桩施工是成功的,密封效果良好。

### 4.2 地表沉降评价

区内的平均沉降量为1.8m,最大沉降2.933m,回弹量为21mm,根据典型区域二-2区沉降—时间曲线(图6)推算的卸载前固结度为93%以上,卸载前实测地面沉降速率连续5~10d平均沉降速率为1.0mm/d左右,计算工后沉降平均为0.146m,从地表沉降监测数据分析来看,加固效果达到设计要求。

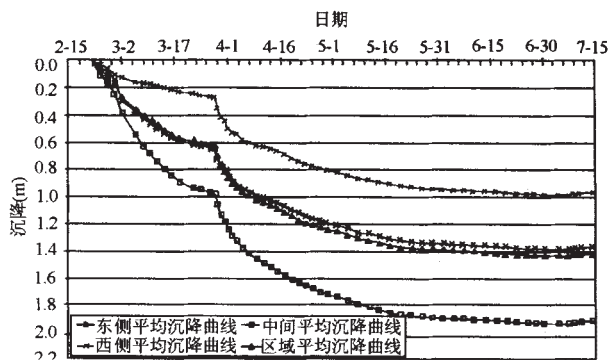


图6 NI-2区真空预压期沉降-时间曲线

### 4.3 孔隙水压力消散评价

从监测数据可以看出在抽真空第一周内,孔隙水压力下降较快,达到65kPa,然后孔隙水压力缓慢下降。到5月初二-2区孔压基本消散稳定,到卸载前孔压一直比较平稳80kPa左右,二-2区最大孔压差达到93.8kPa。受二-2区密封墙密封效果影响,二-2区孔隙水压力4月上旬出现上升,从一定程度上影响了加固效果。孔压消散曲线



见图7。

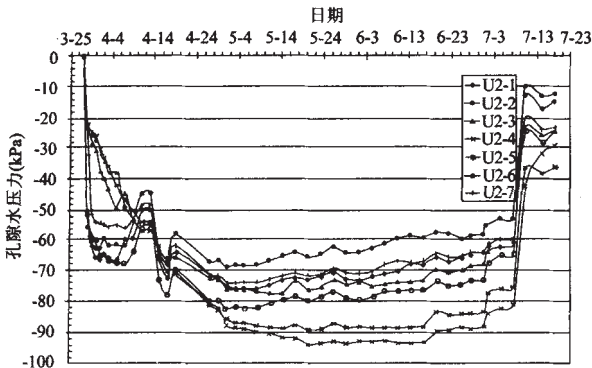


图 7 NI-2 区真空预压期孔压—时间关系曲线

4.4 十字板剪切试验及钻探取样土工试验

从NI区加固前后十字板剪切试验数据可知:加固后土体抗剪强度有较大提高,土体灵敏度稍有降低,加固效果非常明显。NI-2区加固前后十字板抗剪强度资料见表2。

表 2 NI-2 区加固前后十字板抗剪强度

| 试点<br>深度<br>(m) | 原状土           |               | 重塑土           |               | 土体灵敏度  |        |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|--------|
|                 | 加固前           | 加固后           | 加固前           | 加固后           | 加      | 加      |
|                 | 抗剪强度<br>(kPa) | 抗剪强度<br>(kPa) | 抗剪强度<br>(kPa) | 抗剪强度<br>(kPa) | 固<br>前 | 固<br>后 |
| 11.0            | 5.06          | 29.79         | 1.35          | 12.18         | 3.73   | 2.4    |
| 12.0            | 5.60          | 31.45         | 1.26          | 11.02         | 4.43   | 2.9    |
| 13.0            | 12.91         | 42.30         | 7.77          | 20.20         | 1.66   | 2.1    |
| 14.0            | 14.90         | 36.73         | 11.02         | 19.93         | 1.35   | 1.8    |
| 15.0            | 15.71         | 35.73         | 10.11         | 19.20         | 1.55   | 1.9    |
| 16.0            | 13.82         | 40.63         | 9.12          | 22.32         | 1.51   | 1.8    |
| 17.0            | 19.14         | 41.47         | 13.64         | 25.86         | 1.40   | 1.6    |
| 18.0            | 15.80         | 49.09         | 7.49          | 25.47         | 2.11   | 1.9    |
| 19.0            | 14.99         | 46.81         | 10.29         | 22.59         | 1.46   | 2.07   |
| 平均              | 13.10         | 39.33         | 8.01          | 19.86         | 2.13   | 2.06   |

土工试验结果反映出NI-2区下卧土层在真空预压完成后由于土体固结排水,降低了土体的含水率和压缩性,同时提高了土体的承载力和抗剪强度。

5 结语

综上所述,本工程真空预压施工中真空度能平稳保持在85kPa以上,真空度能有效传递到下卧土层中,卸载前地表沉降稳定,土体固结度达到93%左右,卸载后土体工后沉降小于20cm,卸载后电测十字板剪切试验和钻探取土土工试验均表明土体在加固后强度有较大提高。加固效果较好的关键是用密封墙施工技术措施处理得当,确保了加固区域的密封性。

在2003年10月举行的广州港南沙港区一期工程陆域软基处理科研成果评议会上,与会交通部专家委员会评议认为:本工程采用真空预压软基处理技术的加固效果良好,缩短了工期,经济效益十分显著,充分体现我国真空预压加固技术的高水平。

实践证明我们对大面积真空预压共用密封墙的处理措施得当,一是后续施工区域预埋窄幅密封膜,二是抽真空前在密封墙内铺设一层窄幅土工布并填筑袋装泥沙以减轻双向抗渗造成的密封墙开裂,三是长短桩结合确保密封墙有足够厚度。这对今后的大面积真空预压施工起到一定的指导作用。

参考文献:

[1] 广州港南沙护岸围堰及试挖工程陆域软基处理试验研究报告[R].广州:中交四航设计院,南京:河海大学,2003.

[2] 真空预压施工技术的改进及地基加固效果分析[J].港口工程,1997(6).

[3] 董志良.真空预压法加固软基技术的理论和实践[M].广州:交通部四航科研所,1998.

[4] 李 军.影响真空预压效果因素分析[J].华南港工,2000,(2).

[5] 真空预压处理软土地基技术的研究及应用[M].广州:广州四航工程技术研究院,2000.