

## 第 4 章 排水固结法

### 4.1 概述

排水固结法(Consolidation)是处理软粘土地基的有效方法之一。该法是对天然地基,或先在地基中设置砂井等竖向排水体,然后利用建(构)筑物本身重量分级逐渐加载,或是在建(构)筑物建造以前,在场地先行加载预压,使土体中的孔隙水排出,逐渐固结,地基发生沉降,同时强度逐步提高的方法。

排水固结法可解决以下两个问题

(1) 沉降问题。使地基的沉降在加载预压期间大部分或基本完成,使建筑物在使用期间不致产生不利的沉降和沉降差。

(2) 稳定问题。加速地基土的抗剪强度的增长,从而提高地基的承载力和稳定性。

排水固结法适用于处理淤泥质土、淤泥和冲填土等饱和粘性土地基。对沉降要求较高的建筑物,如冷藏库、机场跑道等,常采用预压法处理地基。待预压期间的沉降达到设计要求后,移去预压荷载再建造建筑物。对于主要应用排水固结法来加速地基土抗剪强度的增长、缩短工期的工程,如路堤、土坝等,则可利用本身的重量分级逐渐施加,使地基土强度的提高适应上部荷载的增加,最后达到设计荷载。

排水固结法是由排水系统和加压系统两部分共同组合而成。

排水系统:由水平排水垫层和竖向排水体构成。竖向排水体可选用普通砂井、袋装砂井或塑料排水板。设置排水系统主要在于改变地基原有的排水边界条件,增加孔隙水排出的途径,缩短排水距离。当软土层较薄、或土的渗透性较好而施工期较长时,可仅在地面铺设一定厚度的砂垫层,然后加载,土层中的水竖向流入砂垫层而排出。当工程上遇到深厚的透水性很差的软粘土层时,可在地基中设置砂井等竖向排水体,地面连以排水砂垫层,构成排水系统。

加压系统:即起固结作用的荷载,它使地基土的固结压力增加而产生固结。

工程上广泛使用且行之有效的增加固结压力的方法是堆载法,此外,还有真空法、降低地下水水位法、电渗法和联合法。采用真空法、降低地下水水位法、电渗法不会象堆载法那样有可能引起地基土的剪切破坏,所以较为安全,但操作技术比较复杂。

排水固结法的设计,主要是根据上部结构荷载的大小、地基土的性质以及工期要求、确定竖向排水体的直径、间距、深度和排列方式;确定预压荷载的大小和预压时间,使通过预压后的地基能满足建(构)筑物对变形和稳定性的要求。

### 4.2 排水固结法的原理

饱和软粘土地基在荷载作用下,孔隙中的水被慢慢排出,孔隙体积慢慢地减小,地基发生固结变形,同时,随着超静水压力消散,有效应力逐渐提高,地基土的强度逐渐增长。现以图 4-1 为例说明。当土样的天然固结压力为  $\sigma'_0$  时,其孔隙比为  $e_0$ ,在  $e \sim \sigma'_c$  座标上其相应的点为 a 点,当压力增加  $\Delta\sigma'$ ,固结终了时,变为 c 点,孔隙比减小  $\Delta e$ ,曲线  $\widehat{abc}$  称为压缩曲线。与此同时,抗剪强度与固结压力成比例地由 a 点提高到 c 点。所以,土体在受固结压力时,一方面孔隙比减小产生压缩,一方面抗剪强度也得到提高。如从 c 点卸除压力  $\Delta\sigma'$ ,则土样发生膨胀,图中  $\widehat{cef}$  为卸荷膨胀曲线,如从 f 点再加压  $\Delta\sigma'$ ,土样发生再压

缩，沿虚线变化到  $c'$ ，其相应的强度包线如下图所示。从再压缩曲线  $fgc'$  可清楚地看出，固结压力同样从  $\sigma_0'$  增加  $\Delta\sigma'$ ，而孔隙比减小值为  $\Delta e'$ ， $\Delta e'$  比  $\Delta e$  小得多。这

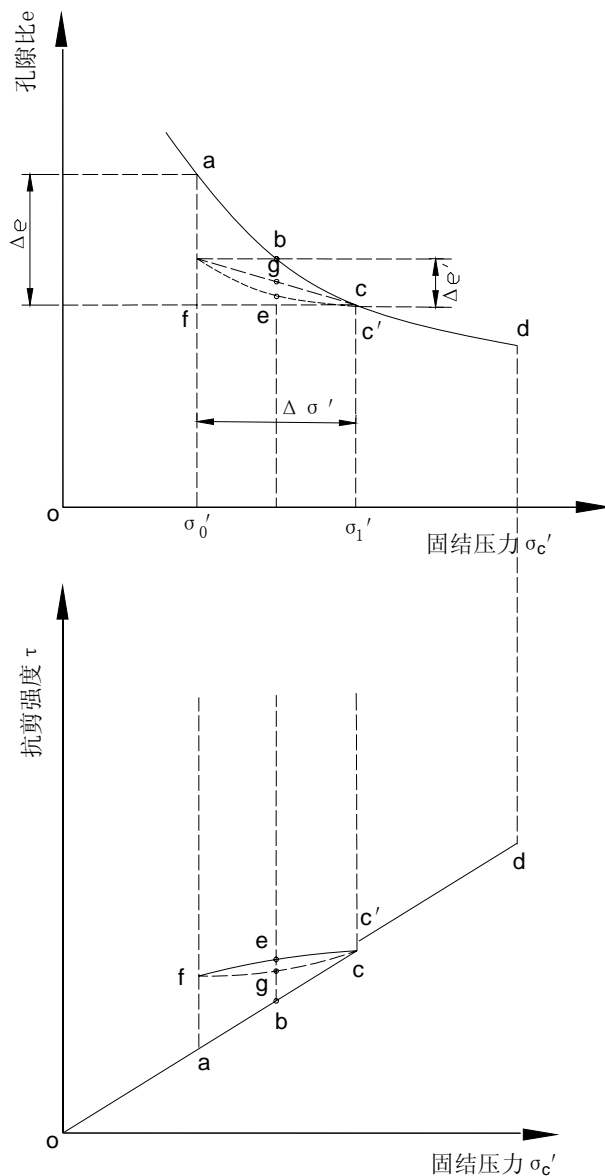


图 4-1 排水固结法增大地基土密实度的原理

说明，如果在建筑物场地先加一个和上部建筑物相同的压力进行预压，使土层固结(相当于压缩曲线上从  $a$  点变化到  $c$  点)然后卸载荷载(相当于在膨胀曲线上由  $c$  点变化到  $f$  点)再建造建筑物(相当于再压缩曲线上从  $f$  点变化到  $c'$  点)，这样，建筑物所引起的沉降即可大减小。如果预压荷载大于建筑物荷载，即所谓超载预压，则效果更好，因为经过超载预压，当土层的固结压力大于使用荷载下的固结压力时，原来的正常固结粘土层将处于超固结状态，而使土层在使用荷载下的变形大为减小。

土层的排水固结效果和它的排水边界条件有关。如图 4-2a 所示的排水边界条件，即土层厚度相对荷载宽度来说比较小，这时土层中的孔隙水向上下面透水层排出而使土层发生固结，这称为竖向排水固结。根据固结理论，粘性土固结所需的时间和排水距离的平方成正比，土层越厚，固结延续的时间越长。为了加速土层的固结，最有效的方法是增加土层的排水途

径，缩短排水距离。砂井、塑料排水板等竖向排水体就是为此目的而设置的。如图 4-2b 所示。这时土层中的孔隙水主要从水平向通过砂井和部分从竖向排出。砂井缩短了排水距离，因而大大加速了地基的固结速率(或沉降速率)，这一点无论从理论上还是从工程实践上都得到了证实。

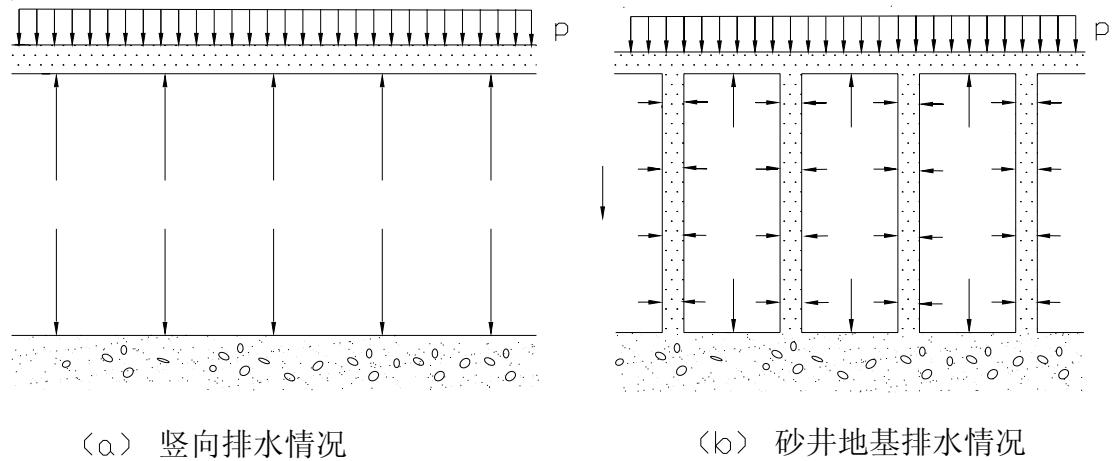


图 4-2 排水法的原理

### 4.3 堆载预压法设计计算(Preloading)

#### 4.3.1 堆载预压的计算步骤

因软粘土地基抗剪强度较低，无论直接建造建(构)筑物还是进行堆载预压往往都不可能快速加载，而必须分级逐渐加荷，待前期荷载下地基强度增加到足以加下一级荷载时才可加下一级荷载。具体计算步骤是，首先用简便的方法确定一个初步的加荷计划，然后校核这一加荷计划下地基的稳定性和沉降，其步骤如下：

1. 利用地基的天然地基土抗剪强度计算第一级容许施加的荷载  $p_1$ ，对饱和软粘土可采用下列公式估算：

$$p_1 = \frac{5.14c_u}{K} + \gamma D \quad (4-1)$$

式中  $K$ ——安全系数，建议采用 1.1~1.5；

$c_u$ ——天然地基的不排水抗剪强度(kPa)；

$\gamma$ ——基底标高以上土的重度(kN/m<sup>3</sup>)；

$D$ ——基础埋深(m)。

2. 计算第一级荷载下地基强度增长值。在  $p_1$  荷载作用下，经过一段时间预压地基强度会提高，提高以后的地基强度为  $c_{u1}'$ ：

$$c_{u1}' = \eta(c_u + \Delta c_u') \quad (4-2)$$

式中  $\eta$ ——考虑剪切蠕变的强度折减系数；

$\Delta c_u'$ —— $p_1$  作用下地基因固结而增长的强度。

3. 计算  $p_1$  作用下达到所确定固结度所需要的时间。目的在于确定第一级荷载停歇的时间，亦即第二级荷载开始施加的时间。

4. 根据第二步所得到的地基强度  $c_{u1}'$  计算第二级所能施加的荷载  $p_2$ 。 $p_2$  可近似地按

下式估算：

$$p_2 = \frac{5.52c_{u1}}{K} \quad (4-3)$$

同样，求出在  $p_2$  作用下地基固结度达 70% 时的强度以及所需要的时间，然后计算第三级所能施加的荷载，依次可计算出以后的各级荷载和停歇时间。

5. 按以上步骤确定的加荷计划进行每一级荷载下地基的稳定性验算。如稳定性不满足要求，则调整加荷计划。

6. 计算预压荷载下地基的最终沉降量和预压期间的沉降量。这一项计算的目的在于确定预压荷载卸除的时间。这时地基在预压荷载下所完成的沉降量已达到设计要求，所余的沉降量是建筑物所允许的。

### 4.3.2 超载预压

对沉降有严格限制的建筑，应采用超载预压法处理地基。经超载预压后，如受压土层各点的有效竖向应力大于建筑物荷载引起的相应点的附加总应力时，则今后在建筑物荷载作用下地基土将不会再发生主固结变形，而且将减小次固结变形，并推迟次固结变形的发生。

超载预压可缩短预压时间，如图 4-3 所示，在预压过程中，任一时间地基的沉降量可表示为

$$s_t = s_d + \bar{U}_t s_c + s_s \quad (4-4)$$

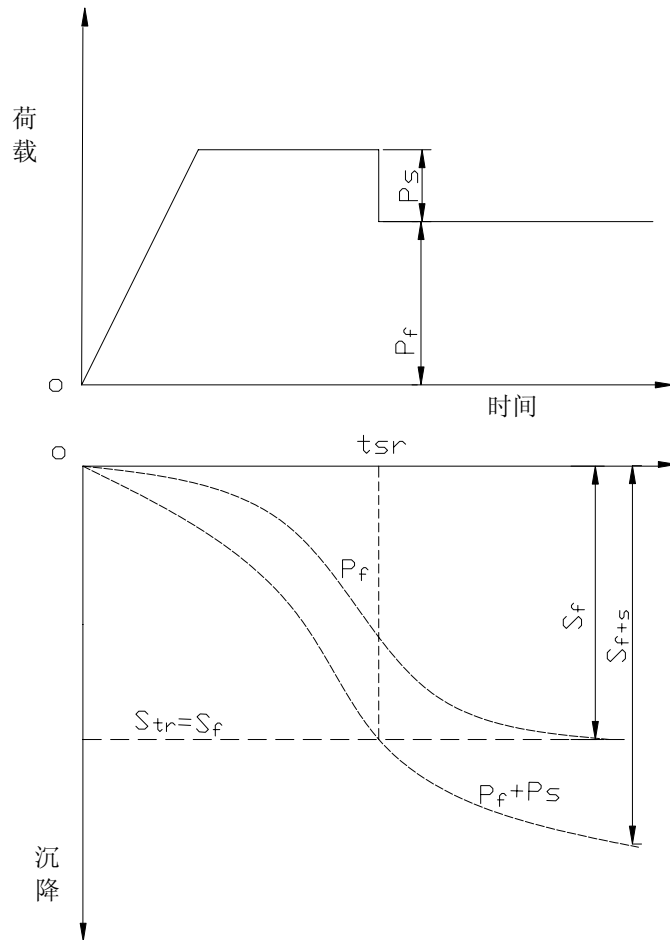


图 4-3 超载预压消除主固结沉降

式中  $s_t$ ——时间  $t$  时地基的沉降量(mm);  
 $s_d$ ——由于剪切变形而引起的瞬时沉降(mm);  
 $\bar{U}_t$ —— $t$  时刻地基的平均固结度;  
 $s_c$ ——最终固结沉降(mm);  
 $s_s$ ——次固结沉降(mm)。

上式可用于: ①确定所需的超载压力值  $p_s$ , 以保证使用(或永久)荷载  $p_f$  作用下预期的总沉降量在给定的时间内完成; ②确定在给定的超载下达到预定沉降量所需要的时间。

在永久填土或建筑物荷载  $p_f$  作用下, 地基的固结沉降采用通常的方法计算。

为了消除超载卸除后继续发生的主固结沉降, 超载应维持到使土层中间部位的固结度  $U_{z(f+s)}$  达到下式要求:

$$U_{z(f+s)} = \frac{p_f}{p_f + p_s} \quad (4-5)$$

该方法要求将超载保持到在  $p_f$  作用下所有的点都完全固结为止, 这时土层的大部分将处于超固结状态。因此, 这是一个安全度较大的方法, 它所预估的  $p_s$  值或超载时间都大于实际所需的值。

对有机质粘土、泥炭土等, 其次固结沉降是重要的, 采用超载预压法对减小永久荷载下的次固结沉降有一定的效果, 计算原则是把  $p_f$  作用下的总沉降看作为主固结沉降和次固结沉降之和。

#### 4.4 砂井排水固结设计计算(Sand Drain)

1925 年, 丹尼尔·莫兰将垂直砂井用于费城——奥克兰海湾大桥公路软土地基的加固, 1926 年获得专利。

砂井法问世以后, 因缺乏理论根据而按经验设计。1940~1942 年, 巴隆(Barron)根据太沙基的固结理论, 提出砂井法的设计计算方法。我国从 50 年代起, 开始应用砂井法。

砂井法主要适用于没有较大集中荷载的大面积荷重或堆土荷重工程, 例如水库土坝、油罐、仓库、铁路路堤、贮矿场以及港口的土工建筑物等工程。

##### 4.4.1 砂井设计

砂井设计包括砂井直径、间距、深度、排列方式、范围、砂料选择和砂垫层厚度等。

###### 一、砂井直径和间距

主要取决于土的固结特性和施工期限的要求。“细而密”比“粗而稀”效果好。砂井直径一般为 300~400mm; 袋装砂井直径为 70~120mm。

工程上常用的井距, 一般为砂井直径的 6~8 倍, 袋装砂井一般为 15~30 倍。设计时, 可先假定井距, 再计算固结度, 若不能满足要求, 则可缩小井距或延长工期。

###### 二、砂井深度

主要根据土层的分布、地基中附加应力大小、施工期限和条件及地基稳定性等因素确定。一般为 10~25m。

(1) 当软土层不厚、底部有透水层时, 砂井应尽可能穿过软土层;

(2) 当深厚的压缩土层间有砂层或砂透镜体时, 砂井应尽可能打至砂层或砂透镜体, 而

采用真空预压时应尽可能避免砂井与砂层相连接，以免影响真空效果；

(3) 对于无砂层的深厚地基则可根据其稳定性及建筑物在地基中造成的附加应力与自重应力之比值确定(一般为 0.1~0.2)；

(4) 若砂层中存在承压水，由于承压水的长期作用，粘土中就存在着超孔隙水压力，这对粘性土固结和强度增长都是不利的，所以宜将砂井打到砂层，利用砂井加速承压水的消散；

(5) 按稳定性控制的工程，如路堤、土坝、岸坡、堆料等，砂井深度应通过稳定分析确定，砂井长度应大于最危险滑动面的深度；

(6) 按沉降控制的工程，砂井长度可从压载后的沉降量满足上部建筑物容许的沉降量来确定。

### 三、砂井排列

图 4-4 为砂井平面布置的两种形式：等边三角形和正方形，以等边三角形排列较为紧凑和有效。当砂井为正方形排列时，砂井的有效排水范围为正方形；而等边三角形排列时则为正六边形，并认为在该有效范围内的水系通过位于其中的砂井排出。在实际进行固结计算时，由于多边形作为边界条件求解很困难，巴隆建议每个砂井的影响范围由多边形改为由面积与多边形面积相等的圆来求解，等效圆的直径  $d_e$  与砂井间距  $l$  的关系如下：

$$\text{正方形排列时} \quad d_e = 1.13l \quad (4-6)$$

$$\text{等边三角形排列时} \quad d_e = 1.05l \quad (4-7)$$

$d_e$  为砂井的有效直径， $l$  为砂井间距。

### 四、砂井布置范围

砂井的布置范围一般可由基础的轮廓线向外增大约 2~4m。

### 五、砂料

宜选用中粗砂，其含泥量不能超过 3%。

### 六、砂垫层

砂井顶部铺设砂垫层，可使砂井排水有良好的通道，将水排到工程场地以外。

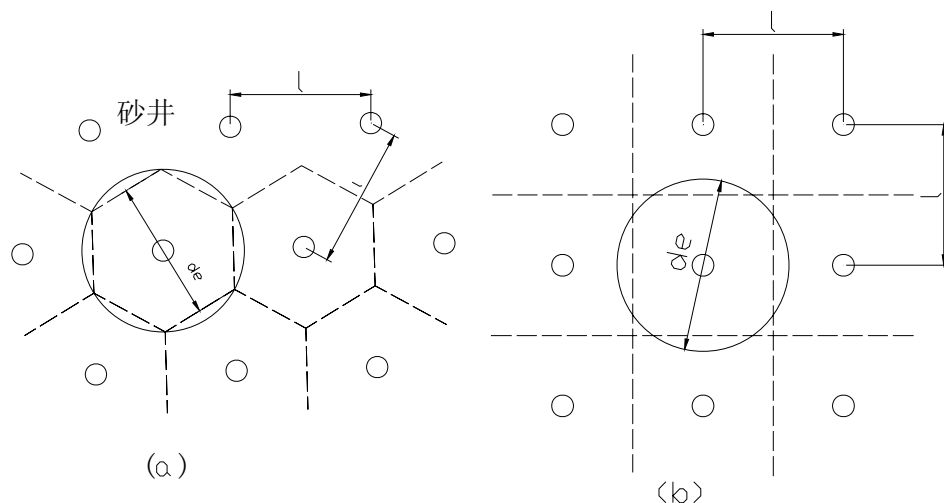


图 4-4 砂井平面布置图

#### 4.4.2 沉降计算

地基土的总沉降一般包括瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降三部分。瞬时沉降是在荷载

作用下由于土的畸变所引起，并在荷载作用下立即发生的。固结沉降是由于孔隙水的排出而引起土体积减小所造成的，占总沉降的主要部分。次固结沉降则是由于超静水压力消散后，在恒值有效应力作用下土骨架的徐变所致。

次固结大小和土的性质有关。泥炭土、有机质土或高塑性粘土土层，次固结沉降占很可观的部分，而其它土则所占比例不大。在建筑物使用年限内，次固结沉降经判断可以忽略的话，则最终总沉降量可认为瞬时沉降量与固结沉降量之和。软粘土的瞬时沉降  $S_d$  一般按弹性理论公式计算。固结沉降  $S_c$  目前工程上通常采用单向压缩分层总和法计算，这只有当荷载面积的宽度或直径大于可压缩土层或当可压缩土层位于两层较坚硬的土层之间时，单向压缩才可能发生，否则应对沉降计算值进行修正以考虑三向压缩的效应。

### 一、单向压缩固结沉降 $S_c$ 的计算

应用一般单向压缩分层总和法，将地基分成若干薄层，其中第  $i$  层的压缩量为

$$\Delta S_i = \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} \Delta h_i \quad (4-8)$$

总压缩量为

$$S_c = \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (4-9)$$

式中  $e_{0i}$  ——第  $i$  层中点之土自重应力所对应的孔隙比；

$e_{1i}$  ——第  $i$  层中点之土自重应力和附加应力之和相对应的孔隙比；

$\Delta h_i$  ——第  $i$  层厚度。

$e_{0i}$  和  $e_{1i}$  从室内固结试验所得的  $e - \sigma_c'$  曲线上查得。

### 二、瞬时沉降 $S_d$ 的计算

软粘土地基由于侧向变形而引起的瞬时沉降占总沉降相当可观的部分，特别是当荷载比较大，加荷速率比较快的情况，因为这时地基中产生了局部塑性区。

$S_d$  这一部分沉降量，目前系采用弹性理论公式计算，当粘土地基厚度较大时，作用于其上的圆形或矩形面积上的压力为均布时， $S_d$  可按照下式计算：

$$S_d = C_d p b \left( \frac{1 - \mu^2}{E} \right) \quad (4-10)$$

式中  $p$  ——均布荷载；

$b$  ——荷载面积的直径或宽度；

$C_d$  ——考虑荷载面积形状和沉降计算点位置的系数，见表 4-1；

$E$ 、 $\mu$  ——土的弹性模量和泊松比。

## 4.5 真空预压设计计算

真空预压法是先需在加固的软土地基表面铺设一层透水砂垫层或砂砾层，再在其上覆盖一层不透气的塑料薄膜或橡胶布，四周密封好，与大气隔绝，在砂垫层内埋设渗水管道，然后与真空泵连通进行抽气，使透水材料保持较高的真空度，在土的孔隙水中产生负的孔隙水压力，使土中孔隙水和空气逐渐吸出，从而使土体固结。

真空预压法适用于饱和均质粘性土及含薄层砂夹层的粘性土，特别适用于新吹填土、超软地基的加固，但不适用于在加固范围内有足够的水源补给的透水土层，以及无法堆载的倾斜地面和施工场地狭窄等场合。

真空预压在抽气后薄膜内气压逐渐下降，薄膜内外形成一个压力差（称为真空度），由于土体与砂垫层和塑料排水板间的压差，从而发生渗流，使孔隙水沿着砂井或塑料排水板上升而流入砂垫层内，被排出塑料薄膜外；地下水在上升的同时，形成塑料板附近的真空负压，使土体内的孔隙水压形成压差，促使土中的孔隙水压力不断下降，地基有效应力不断增加，从而使土体固结。随着抽气时间的增长，压差逐渐变小，最终趋向于零，此时渗流停止，土体固结完成。所以真空预压过程，实质为利用大气压差作为预压荷载，使土体逐渐排水固结的过程。

真空预压法加固软土地基同堆载预压法一样，完全符合有效应力原理，只不过是负压边界条件的固结过程，因此，只要边界条件与初始条件符合实际，各种固结理论（如太沙基理论、比奥理论等）和计算方法都可求解。

工程经验和室内试验表明，土体除在正、负压作用下侧向变形方向不同外，其他固结特性无明显差异。真空预压加固中竖向排水体间距、排列方式、深度的确定、土体固结时间的计算，一般可采用与堆载预压基本相同的方法进行。

真空预压的设计内容主要包括：密封膜内的真空度、加固土层要求达到的平均固结度，竖向排水体的尺寸、加固后的沉降和工艺设计等。

### 一、膜内真空度

真空预压效果和密封膜内所能达到的真空度大小关系极大。根据国内一些工程的经验，当采用合理的工艺和设备，膜内真空度一般可维持 600mmHg 左右，相当于 80kPa 的真空压力，此值可作为最大膜内设计真空度。

### 二、加固区内要求达到的平均固结度

一般可采用 80% 的固结度，如工期许可，也可采用更大一些的固结度作为设计要求达到的固结度。

表 4-1 半无限弹性表面各种均布荷载面积上各点的  $C_d$  值

形状	中心点	角点或边点	短边中心	长边中心	平均
圆形	1.00	0.64	0.64	0.64	0.35
圆形(刚性)	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
方形	1.12	0.56	0.76	0.76	0.95
方形(刚性)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
矩形					
长宽比:					
1.5	1.36	0.67	0.89	0.97	1.15
2	1.52	0.76	0.98	1.12	1.30
3	1.78	0.88	1.11	1.35	1.52
5	2.10	1.05	1.27	1.68	1.83



10	2.53	1.26	1.49	2.12	2.25
100	4.00	2.00	2.20	3.60	3.70
1000	5.47	2.57	2.94	5.03	5.15
10000	6.90	3.50	3.70	6.50	6.60

### 三、竖向排水体

一般采用袋装砂井或塑料排水带。真空预压处理地基时，必须设置竖向排水体，由于砂井(袋装砂井或塑料排水带)能将真空度从砂垫层中传至土体，并将土体中的水抽至砂垫层然后排出。若不设置砂井就起不到上述的作用和加固的目的。竖向排水体的规格、排列方式、间距和深度的确定见上一节。

抽真空的时间与土质条件和竖向排水体的间距密切相关。达到相同的固结度，间距越小，则所需的时间越短(见表 4-2)。

表 4-2 袋装砂井间距与所需时间关系表

袋装砂井间距(m)	固结度(%)	所需时间(d)
1.3	80	40~50
	90	60~70
1.5	80	60~70
	90	85~100
1.8	80	90~105
	90	120~130

### 四、沉降计算

先计算加固前在建筑物荷载下天然地基的沉降量，然后计算真空期间所完成的沉降量，两者之差即为预压后在建筑物使用荷载下可能发生的沉降。预压期间的沉降可根据设计要求达到的固结度推算加固区所增加的平均有效应力，从  $e - \sigma'_c$  曲线上查出相应的孔隙比进行计算。

对承载力要求高，沉降限制严的建筑，可采用真空——堆载联合预压法。通过实践量测证明两者是可叠加的。

真空预压的面积不得小于基础外缘所包围的面积，一般真空的边缘应比建筑基础外缘超出 2~3m；另外，每块预压的面积应尽可能大，根据加固要求彼此间可搭接或有一定间距。加固面积越大，加固面积与周边长度之比也越大，气密性就越好，真空度就越高(见表 4-3)。

表 4-3 真空度与加固面积关系表

加固面积 $F / m^2$	264	900	1250	2500	3000	4000	10000	20000
周边长度 $S / m$	70	120	143	205	230	260	500	900
$F/S$	3.77	7.5	8.74	12.2	13.04	15.38	20	22.2
真空度(mmHg)/ kPa	515/68.6	530/70.6	600/80	610/81	630/84	650/87	680/91	730/97

真空预压的关键在于要有良好的气密性，使预压区与大气层隔绝。当在加固区发现有透气和透水层时，一般可在塑料薄膜周边采用另加水泥土搅拌桩的壁式密封措施。

## 4.6 施工方法

### 4.6.1 堆载预压施工方法

要保证排水固结法的加固效果，从施工角度考虑，主要应重视以下三个环节：铺设水平垫层、设置竖向排水体和施加固结压力。

#### 一、水平垫层的施工

排水垫层的作用是使在预压过程中，从土体进入垫层的渗流水迅速地排出，使土层的固结能正常进行，防止土颗粒堵塞排水系统。因而垫层的质量将直接关系到加固效果和预压时间的长短。

##### (1) 垫层材料

垫层材料应采用透水性好的砂料，其渗透系数一般不低于  $10^{-3} \text{ cm/s}$ ，同时能起到一定的反滤作用。通常采用级配良好的中粗砂，含泥量不大于 3%。一般不宜采用粉、细砂。也可采用连通砂井的砂沟来代替整片砂垫层。排水盲沟的材料一般采用粒径为 3~5cm 的碎石或砾石，且满足下式：

$$\frac{d_{15}(\text{盲沟})}{d_{85}(\text{排水层})} < 4 \sim 5 < \frac{d_{15}(\text{盲沟})}{d_{15}(\text{排水层})} \quad (4-11)$$

式中  $d_{15}$ ——小于某粒径的含量占总重 15% 的粒径；

$d_{85}$ ——小于某粒径的含量占总重 85% 的粒径。

##### (2) 垫层尺寸

- ① 一般情况下陆上排水垫层厚度为 0.5m 左右，水下垫层为 1.0m 左右。对新吹填不久的或无硬壳层的软粘土及水下施工的特殊条件，应采用厚的或混合料排水垫层。
- ② 排水层兼作持力层，则还应满足承载力有要求。对于天然地面承载力较低而不能满足正常施工的地基，可适当加大砂垫层的厚度。
- ③ 排水砂垫层宽度等于铺设场地宽度，砂料不足时，可用砂沟代替砂垫层。
- ④ 砂沟的宽度为 2~3 倍砂井直径，一般深度为 40~60cm。
- ⑤ 盲沟的尺寸与其布置形式和数量有关，设计时可采用达西定律

$$q = \frac{kAi}{5} \quad (4-12)$$

式中  $q$ ——盲沟单位时间排水量，对于饱和土等于其负担面积单位时间土体的压缩体积( $\text{cm}^3/\text{s}$ )；

$i$ ——水力坡降，一般为 0.01~0.05；

$k$ ——材料渗透系数，取值 2.5cm/s；

$A$ ——断面面积( $\text{cm}^2$ )。

##### (3) 垫层施工

排水砂垫层目前有四种施工方法：

- ①当地基表层有一定厚度的硬壳层，其承载力较好，能上一般运输机械时，一般采用机械分堆摊铺法，即先堆成若干砂堆，然后用机械或人工摊平。

- ②当硬壳层承载力不足时，一般采用顺序推进摊铺法。
- ③当软土地基表面很软，如新沉积或新吹填不久的超软地基，首先要改善地基表面的持力条件，使其能上施工人员或轻型运输工具。
- ④尽管对超软地基表面采取了加强措施，但持力条件仍然很差，一般轻型机械上不去，在这种情况下，通常要用人工或轻便机械顺序推进铺设。

不论采用何种施工方法，都应避免对软土表层的过大扰动，以免造成砂和淤泥混合，影响垫层的排水效果。另外，在铺设砂垫层前，应清除干净砂井顶面的淤泥和其他杂物，以利砂井排水。水平排水垫层的施工与铺设方法见表 4-4。

## 二、竖向排水体施工

竖向排水体在工程中的应用有：普通砂井、袋装砂井、塑料排水带。

### (1)普通砂井施工

砂井施工要求：①保持砂井连续和密实，并且不出现颈缩现象；②尽量减小对周围土的扰动；③砂井的长度、直径和间距应满足设计要求。

表 4-4 水平排水垫层的施工与铺设方法

施工要求	砂垫层铺设方法	
	按砂源供应情况采用	按场地情况采用
(1)垫层平面尺寸和厚度符合设计要求，厚度误差为 $\pm h/10$ ( $h$ 为垫层设计厚度)，每 100m <sup>2</sup> 挖坑检验	(1)一次铺设：砂源丰富时，可一次铺设砂层至设计厚度	(1)机械施工法：地基能承受施工机械运行时，可用机械铺砂
(2)与竖向排水通道连接好，不允许杂物堵塞或隔断连接处	(2)分层铺设：砂源供应不足时，可分层铺设，每次铺设厚度为设计厚度的 1/2，铺完第一层后，进行垂直排水通道施工，再铺第二层	(2)人工铺设法：地基较软不能承受机械碾压时，可用人力车或轻型传递带由外向里(或由一边向另一边)铺设，当地基很软施工人员无法上去施工时，可采用铺设荆笆或其他透水性好的编织物的办法
(3)不得扰动天然地基		
(4)不得将泥土或其它杂物混入垫层		
(5)真空预压垫层，其面层 4cm 厚度范围内不得有带棱角的硬物		

砂井施工一般先在地基中成孔，再在孔内灌砂形成砂井。表 4-5 为砂井成孔和灌砂方法。选用时应尽量选用对周围土体扰动小且施工效率高的方法。

砂井成孔的典型方法有套管法、射水法、螺旋钻成孔法和爆破法。

### ① 套管法

该法是将带活瓣管尖或套有混凝土端靴的套管沉到预定深度，然后在管内灌砂、拔出套管形成砂井。根据沉管工艺的不同，又分为静压沉管法、锤击静压联合沉管法和振动沉管法。

### ② 射水法

射水法是指利用高压水通过射水管形成高速水流的冲击和环刀的机械切削，使土体破坏，并形成一定直径和深度的砂井孔，然后灌砂而形成砂井。

射水法成井的设备比较简单，对土的扰动较小，但在泥浆排放、塌孔、缩颈、串孔、灌砂等方面都还存在一定的问题。

表 4-5 砂井成孔和灌砂方法

类型	成孔方法		灌砂方法	
使用套管	管端封闭	冲击打入 振动打入	用压缩空气	静力提拔套管 振动提拔套管
		静力压入	用饱和砂	静力提拔套管
	管端敞开	射水排土 螺旋钻排土	浸水自然下沉	静力提拔套管
不使用套管	旋转、射水 冲击、射水	用饱和砂		

### ③ 螺旋钻成孔法

该法以动力螺旋钻钻孔，属于干钻法施工，提钻后孔内灌砂成形。此法适用于也陆上工程、砂井长度在 10m 以内、土质较好，且不会出现缩颈、塌孔现象的软弱地基。该法所用设备简单而机动，成孔比较规整，但灌砂质量较难掌握，对很软弱的地基也不太适用。

### ④ 爆破法

此法是先用电径 73cm 的螺旋钻钻成一个达到砂井设计深度的孔，在孔中放置由引爆线和炸药组成的条形药包，爆破后将孔扩大，然后往孔内灌砂形成砂井。这种方法施工简易，不需要复杂的机具，适用于深度 6~7m 的浅砂井。

以上各种成孔方法，必须保证砂井的施工质量以防缩颈、断颈或错位现象。

砂井的灌砂量，应按砂在中密状态时的干重度和井管外径所形成的体积计算，其实际灌砂量按质量控制要求，不得小于计算值的 95%。

为了避免砂井断颈或缩颈现象，可用灌砂的密实度来控制灌砂量。灌砂时可适当灌水，以利密实。

砂井位置的允许偏差为该井的直径，垂直度的允许偏差为 1.5%。

### (2)袋装砂井施工

普通砂井是常用的施工方法，其缺点是：套管成孔法在打设套管时必将扰动其周围土，使透水性减弱(即涂抹作用)；射水成孔法对含水量高的软土地基施工质量难以保证，砂井中容易混入较多的泥砂；螺旋成孔法在含水量高的软土地基中也难做到孔壁直立，施工过程中需要排除废土，而处理废土需要人力、场地和时间，因此它的适用范围也受到一定的限制。应当注意，对含水量很高的软土，应用砂井容易产生缩颈、断颈和错位现象。

普通砂井即使在施工时能形成完整的砂井，但当地面荷载较大时，软土层便产生侧向变形，也有可能使砂井错位。

袋装砂井是用具有一定伸缩性和抗拉强度很高的聚丙烯或聚乙烯编织袋装满砂子，它基本上解决了大直径砂井中所存在的问题，使砂井的设计和施工更加科学化，保证了砂井的连续性，施工设备实现了轻型化，比较适应在软弱地基上施工；用砂量大为减少；施工速度加快、工程造价降低，是一种比较理想的竖向排水体。

### ① 施工机具和工效

袋装砂井成孔的方法有锤击打入法、水冲法、静力压入法、钻孔法和振动贯入法五种。

交通部二航局研制的 EH·Z-8 型袋装砂井打设机，一次能打设两根砂井。该机的主要施工技术能列入表 4-6。

表 4-6 EH·Z-8 型袋装砂井打设机的主要技术性能

项目	性能
起重机型号	W-501
直接接地压力(kPa)	94
间接接地压力(kPa)	30
振动锤激振力(kN)	86
激振频率(r·min <sup>-1</sup> )	960
外形尺寸(长/cm×宽/cm×高/cm)	640×285×1850
每次打设根数(根)	2
最大打设深度(m)	12.0
打设砂井间距(cm)	120, 140, 160, 180, 200
成孔直径(cm)	12.5
置入砂袋直径(cm)	7.0
施工效率(根·台班 <sup>-1</sup> )	66~80
适用土质	淤泥、粉质粘土、粘土、砂土、回填土

### ② 砂袋材料的选择

砂袋材料必须选用抗拉力强、抗腐蚀和抗紫外线能力强、透水性好、韧性和柔性好、透气、并且在水中能起滤网作用和不外露砂料的材料制作。国内采用过的砂袋材料有麻布和聚丙烯编织袋，其力学性能见表 4-7。

表 4-7 砂袋材料力学性能表

材料名称	拉伸试验		弯曲 180 度试验			渗透性 (cms <sup>-1</sup> )
	抗拉强度 (MPa)	伸长率(%)	弯心直径 (cm)	伸长率(%)	破坏情况	
麻袋布	1.92	5.5	7.5	4	完整	
聚丙烯编织袋	1.70	25	7.5	23	完整	>0.01

### ③ 施工要求

灌入砂袋的砂宜用干砂，并应灌制密实。砂袋长度应较砂井孔长度长 50cm，使其放入井孔内后能露出地面，以便埋入排水砂垫层中。

袋装砂井施工时，所用钢管的内径宜略大于砂井直径，不宜过大以减小施工过程中对地基土的扰动。另外，拔管后带上砂袋的长度不宜超过 0.50m。

#### (3) 塑料排水带施工

塑料排水带根据结构形式可分为多孔质单一结构型和复合结构型。

##### ① 插带机械

塑料排水带的施工质量在很大程度上取决于施工机械的性能,有时会成为制约施工的重要因素。

由于插带机大多在软弱地基上施工,因此要求行走装置具有:机械移位迅速,对位准确;整机稳定性好,施工安全;对地基土扰动小,接地压力小等性能。从机型分,有轨道式、滚动式、履带浮箱式、履带式 and 步履式等多种。

### ② 塑料排水带导管靴与桩尖

一般打设塑料带的导管靴有圆形和矩形两种。由于导管靴断面不同,所用桩尖各异,并且一般都与导管分离。桩尖主要作用是在打设塑料带过程中防止淤泥进入导管内,并且对塑料带起锚定作用,防止提管时将塑料带提出。

### ③ 塑料带排水的施工工艺

塑料排水带打设顺序包括:定位;将塑料带通过导管从管靴穿出;将塑料带与桩尖连接贴紧管靴并对准桩位;插入塑料带;拔管剪断塑料带等。

在施工中应注意以下几点:

- a. 塑料带滤水膜在转盘和打设过程中应避免损坏;防止淤泥进入带芯堵塞输水孔,影响塑料带的排水效果;
- b. 塑料带与桩尖连接要牢固,避免提管时脱开,将塑料带拔出;
- c. 桩尖平端与导管靴配合要适当,避免错缝,防止淤泥在打设过程中进入导管,增大对塑料带的阻力,甚至将塑料带拔出;
- d. 严格控制间距和深度,如塑料带拔起 2m 以上者应补打;
- e. 塑料带需接长时,为减小带与导管阻力,应采用滤水膜内平搭接的连接方法,为保证输水畅通并有足够的搭接强度,搭接长度需 200mm 以上。

## 三、预压荷载的施工

### (1) 利用建筑物自重加压

利用建筑物本身重量对地基加压是一种经济而有效的方法。此法一般应用于以地基的稳定性为控制条件,能适应较大变形的建筑物,如路堤、土坝、贮矿场、油罐、水池等。特别是对油罐或水池等建筑物,先进行充水加压,一方面可检验罐壁本身有无渗漏现象,同时,还利用分级逐渐充水预压,使地基土强度得以提高,满足稳定性要求。对路堤、土坝等建筑物,由于填土高、荷载大,地基的强度不能满足快速填筑的要求,工程上都采用严格控制加荷速率,逐层填筑的方法以确保地基的稳定性。

利用建筑物自重预压处理地基,应考虑给建筑物预留沉降高度,保证建筑物预压后,其标高满足设计要求。

在处理油罐容器地基时,应保证地基沉降的均匀度,保证罐基中心和四周的沉降差异在设计许可范围内,否则应分析原因,在沉降同时采取措施进行纠偏。

### (2) 堆载预压

堆载预压的材料一般以散料为主,如石料、砂、砖等。大面积施工时通常采用自卸汽车与推土机联合作业。对超软地基的堆载预压,第一级荷载宜用轻型机械或人工作业。

施工时应注意以下几点:

- ① 堆载面积要足够大。堆载的顶面积不小于建筑物底面积。堆载的底面积也应适当扩

大，以保证建筑物范围内的地基得到均匀加固。

② 堆载要求严格控制加荷速率，以保证在各级荷载下地基的稳定性，同时要避免部分堆载过高而引起地基的局部破坏。

③ 对超软粘性土地基，荷载的大小、施工工艺更要精心设计，以避免对土的扰动和破坏。

#### 4.6.2 真空预压施工方法

##### 一、真空预压

###### (1) 加固区划分

加固区划分是真空预压施工的重要环节，理论计算结果和实际加固效果均表明，每块真空预压加固场地的面积宜大不宜小。目前国内单块真空预压面积已达  $30000\text{m}^2$ 。但如果受施工能力或场地条件限制，需要把场地划分几个加固区域，分期加固，划分区域时考虑以下几个因素：

① 按建筑物分布情况，应确保每个建筑物位于一块加固区域之内，建筑边线距加固区有效边线根据地基加固厚度可取  $2\sim 4\text{m}$  或更大些。应避免两块加固区的分界线横过建筑物。否则将会由于两块加固区分界区域的加固效果差异而导致建筑物发生不均匀沉降。

② 应考虑竖向排水体打设能力，加工大面积密封膜的能力，大面积铺膜的能力和经验和射流装置和滤管的数量等方面的综合指数。

③ 应以满足建筑工期要求为依据，一般加固面积  $6000\sim 10000\text{m}^2$  为宜。

④ 在风力很大地区施工时，应在可能情况下适当减小加固区面积。

⑤ 加固区之间和距离应尽量减小或者共用一条封闭沟。

###### (2) 工艺设备

抽真空工艺设备包括真空源和一套膜内、膜外管路。

① 真空源目前国内大多采用射流真空装置，射流真空装置由射流箱和离心泵组成，见图 4-5。抽真空装置的布置视加固面积和射流装置的能力而定，一套高质量的抽真空装置在施工初期可负担  $1000\sim 1200\text{m}^2$  的加固面积，后期可负担  $1500\sim 2000\text{m}^2$  的加固面积。抽真空装置设置数量，应以始终保持密封膜内高真空度为原则。膜下真空值一般要求大于  $80\text{kPa}$ 。

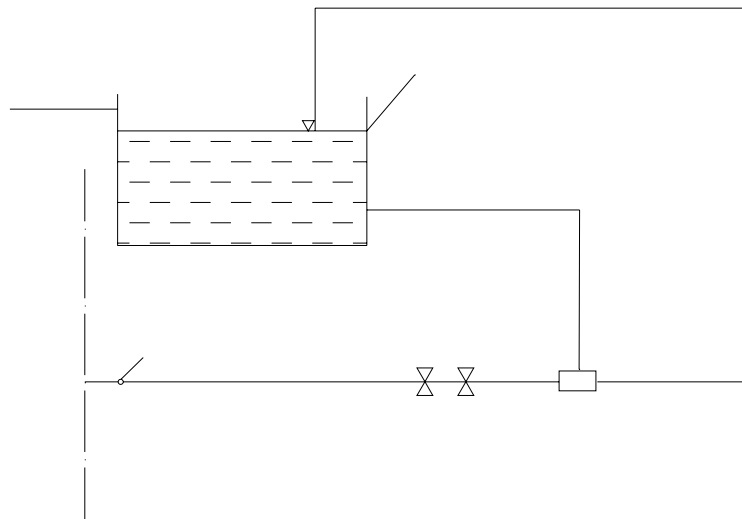


图 4-5 射流真空装置示意图

② 膜外管路连接着射流装置的回阀、截水阀、管路。过水断面应能满足排水量，且能承受 100kPa 径向力而不变形破坏的要求。

② 膜内水平排水滤管，目前常用直径为  $\phi 60\sim 70\text{mm}$  的铁管或硬质塑料管。为了使水平排水滤管标准化并能适应地基沉降变形，滤水管一般加工成长 5m 一根，滤水部分钻有  $\phi 8\sim 10\text{mm}$  的滤水孔，孔距 5cm，三角形排列，滤水管外绕直径为 3mm 铅丝(圈距 5cm)，外包一层尼龙窗纱布，再包滤水材料构成滤水层。目前常用的滤水层材料为土工聚合物，其性能见表 4-8。

表 4-8 常用滤水层材料性能表

项 目		参考数值
渗透系数( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		$0.4 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3}$
抗拉强度( $\text{N} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	干态	20~44
	湿态	15~30
隔土性(mm)		$< 0.075$

③滤水管的布置与埋设，滤水管的平面布置一般采用条形或鱼刺形排列，遇到不规则场地时，应因地制宜地进行滤水管排列设计，保证真空负压快速而均匀地传至场地各个部位。

滤水管的排距  $l$  一般为 6~10m,最外层滤水管距场地边的距离为 2~5m。滤水管之间的连接采用软连接，以适应场地沉降。

滤水管埋设在水平排水砂垫层的中部，其上应有 0.10~0.20m 砂覆盖层，防止滤水管上尖利物体刺破密封膜。

#### (1) 密封系统

密封系统由密封膜、密封沟和辅助密封措施组成。一般选用聚乙烯或聚氯乙烯薄膜，其性能见表 4-9。

表 4-9 密封膜性能表

抗拉强度(MPa)		伸长率(%)		直角断裂强度 (MPa)	厚度(mm)	微孔(个)
纵向	横向	断裂	低温			
$\geq 18.5$	$\geq 16.5$	$\geq 220$	20~45	$\geq 4.0$	$0.12 \pm 0.02$	$\leq 10$

加工好的密封膜面积要大于加固场地面积，一般要求每边应大于加固区相应边 2~4m。为了保证整个预压过程中的密实性，塑料膜一般宜铺设 2~3 层，每层膜铺好后应检查和粘补漏处。膜周边的密封可采用挖沟折铺膜，见图 4-6，在地基土颗粒细密、含水量较大、地下水位浅的地区采用平铺膜，见图 4-7。

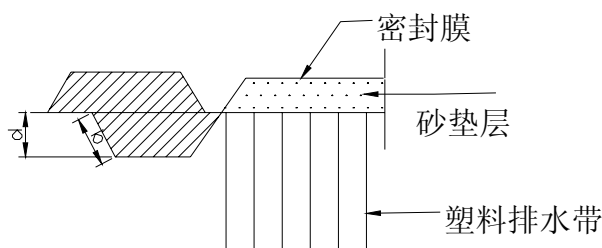


图 4-6 密封沟示意图

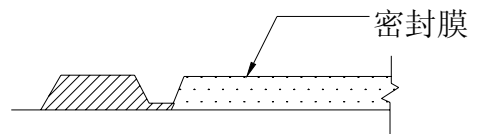


图 4-7 平铺膜示意图



密封沟的截面尺寸应视具体情况而定，密封膜与密封沟内坡密封性好的粘土接触，其长度  $a$  一般为 1.3~1.5m，密封沟的密封长度  $b$  应大于 0.8m，其深度  $d$  也应大于 0.8m，以保证周边密封膜上的足够的覆土厚度和压力。

如果密封沟底或两侧有碎石或砂层等渗透性好的夹层存在，应将该夹层挖除干净，回填 40cm 厚的软土。

由于某种原因，密封膜和密封沟发生漏气现象时，施工中必须采用辅助密封措施。如膜上沟内同时覆水、封闭式板桩墙或封闭式板桩墙内覆水等。

## (2) 抽气阶段施工要求与质量要求

① 膜上覆水一般应在抽气后，膜内真空度达 80kPa，确信密封系统不存在问题方可进行，这段时间一般为 7~10 天；

② 保持射流箱内满水和低温，射流装置空载情况下均应超过 96kPa；

③ 经常检查各项记录，发现异常现象，如膜内真空度值小于 80kPa 等，应尽快分析原因并采取措施补救；

④ 冬季抽气，应避免过长时间停泵，否则，膜内、外管路会发生冰冻而堵塞，抽气很难进行；

⑤ 下料时应根据不同季节预留塑料膜伸缩量；热合时，每幅塑料膜的拉力应基本相同。防止密封膜形状不正规，不符合设计要求；

⑥ 在气温高的季节，加工完毕的密封膜应堆放在阴凉通风处；堆放时给塑料膜之间适当撒放滑石粉；堆放的时间不能过长，以防止互相粘连；

⑦ 在铺设滤水管时，滤水管之间要连接牢固，适用合适滤水层且包裹严实，避免抽气后进入射流装置；

⑧ 铺膜前应用砂料把砂井填充密实；密封膜破裂后，可用砂料把井孔填充密实至砂垫层顶面，然后分层把密封膜粘牢，以防止砂井孔处下沉密封膜破裂；

⑨ 抽气阶段质量要求达到膜内真空大于 80kPa；停止预压时地基固结度要求大于 80%；预压的沉降稳定标准为连续 5 天，实测沉降速率不大于 2mm/d。

在真空预压法的施工中，根据实测资料表明：

① 在大面积软基加固工程中，每块预压区面积尽可能大，因为这样可加快工程进度和消除更多的沉降量。目前采用最大的是 3 万  $m^2$ 。

② 两个预压区的间隔不宜过大，需根据工程要求和土质决定，一般以 2~6m 较好。

③ 膜下管道在不降低真空度的条件下尽可能少，为减少费用可取消主管，全部采用滤管，由鱼刺形排列改为环形排列。

④ 砂井间距应根据土质情况和工期要求来定。当砂井间距从 1.3m 增至 1.8m 时，达到相同固结度所需时间增率与堆载预压法相同。

⑤ 当冬季的气温降至  $-17^{\circ}C$  时，如对薄膜、管道、水泵、阀门及真空表等采取常规保温措施，则可照常作业。

⑥ 为了保证真空设备正常安全运行，便于操作管理和控制间歇抽气，从而节约能源，现已研制成微机检测和自动控制系统。

⑦ 直径 7cm 的袋装砂井和塑料排水带都有较好的透水性能。实测表明，在同等条件下，

达到相同固结度所需的时间接近。采用何种排水通道，主要由它的单价和施工条件而定。

#### 4.7 真空联合堆载预压

当地基预压荷载大于 80kPa 时，应在真空预压抽真空的同时再施加定量的堆载，这种方法称为真空预压联合堆载法。真空预压与堆载预压联合加固，其加固效果可以叠加，是由于它们符合有效应力原理，并且已经过工程实践证明。真空预压是逐渐降低土体的孔隙水压力，不增加总应力，而堆载预压是增加土体总应力，同时，使孔隙水压力增大，然后逐渐消散。

两者叠加既抽真空降低孔隙水压力又堆载增加总应力，使孔隙水压力增大，然后消散。开始时抽真空使土中孔隙水压力降低，有效应力增大，经不长时间（7~10d）在土体保持稳定的情况下堆载，使土体产生正孔隙水压力，并与抽真空产生的负孔隙水压力叠加。正、负孔隙水压力叠加，转化的有效应力为消散的正、负孔隙压力绝对值之和。现以瞬间加荷为例，对土中任一点  $m$  的应力转换加以说明。 $m$  点的深度为地面下  $h_m$ ，地下水位与地面齐平，堆载量为  $\Delta\sigma_1$ ，土的有效重度为  $\gamma'$ ，水的重度为  $\gamma_w$ ，大气压力为  $p_a$ ，抽真空土中  $m$  点大气压力逐渐降至  $p_n$ ， $t$  时的固结度为  $U_t$ ，不同时间土中  $m$  点总应力和有效应力见表 4-10。

对一般软粘土，当膜下真空度稳定地达到 80kPa 后，抽真空 10 天左右可进行上部堆载施工，即边抽真空，边连续施加堆载。对高含水量的淤泥类土，当膜下真空度稳定地达到 80kPa 后，一般抽真空 20~30 天可进行堆载施工，荷载大时可分级施加，分级数通过稳定计算确定。

在进行上部堆载之前，必须在密封膜上铺设防护层，保护密封膜的气密性。防护层可采用编织布或无纺布等，其上铺设 100~300mm 厚的砂垫层，然后再行堆载。堆载时宜采用轻型运输工具，并不得损坏密封膜。在进行上部堆载施工时，应密切观察膜下真空度的变化，发现漏气，应及时处理。

表 4-10 土中任意点 ( $m$ ) 应力与时间转换关系

情况	总应力 $\sigma$	有效压力 $\sigma'$	孔隙水压力 $u$
$t = 0$ (未抽真空 未堆载)	$\sigma_0$	$\sigma'_0 = \gamma' h_m$	$u_0 = \gamma_w h_m + p_a$
$0 \leq t \leq \infty$ (既抽真空 又堆载)	$\sigma_t = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$	$\sigma'_t = \gamma' h_m + [(p_a - p_n) + \Delta\sigma_1] U_t$	$u_t = \gamma_w h_m + p_a + [(p_a - p_n) + \Delta\sigma_1] (1 - U_t)$
$t \rightarrow \infty$ (既抽真空 又堆载)	$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$	$\sigma' = \gamma' h_m + (p_a - p_n) + \Delta\sigma_1$	$u = \gamma_w h_m + p_a$

采用真空预压联合堆载预压法，既能加固软土地基，又能较高地提高地基承载力，其工艺流程为：



真空联合堆载预压施工时，除了要按真空预压和堆载预压的要求进行以外，还应注意以下几点：

- ① 堆载前要采取可靠措施保护密封膜，防止堆载预压时刺破密封膜；

- ② 堆载底层部分应先颗粒较细且不含硬块状的堆载物，如砂料等；
- ③ 选择合适的堆载时间和荷重。

## 4.8 质量检验

排水固结法加固地基施工中经常进行的质量检验和检测项目有孔隙水压力观测、沉降观测、侧向位移观测、真空度观测、地基土物理力学指标检测等。

### 4.8.1 现场检验

#### 一、孔隙水压力观测

孔隙水压力现场观测时，可根据测点孔隙水压力—时间变化曲线，反算土的固结系数、推算该点不同时间的固结度，从而推算强度增长，并确定下一级施加荷载的大小，根据孔隙水压力和荷载的关系曲线可判断该点是否达到屈服状态，因而可用来控制加荷速率，避免加荷过快而造成地基破坏。

现场观测孔隙水压力的仪器，目前常用钢弦式孔隙水压力计和双管式孔隙水压力计。

在堆载预压工程中，一般在场地中央、载物坡顶处及载物坡脚处不同深度处设置孔隙水压力观测仪器，而真空预压工程则只需在场内设置若干个测孔。测孔中测点布置垂直距离为1~2m,不同土层也应设置测点，测孔的深度应大于待加固地基的深度。

#### 二、沉降观测

沉降观测是最基本、最重要的观测项目之一。观测内容包括：荷载作用范围内地基的总沉降，荷载外地面沉降或隆起，分层沉降以及沉降速率等。

堆载预压工程的地面沉降标应沿场地对称轴线上设置，场地中心、坡顶、坡脚和场外10m范围内均需设置地面沉降标，以掌握整个场地的沉降情况和场地周围场面隆起情况。

真空预压工程地面沉降标应在场内有规律地设置，各沉降标之间距离一般为20~30m,边界内外适当加密。

深层沉降一般用磁环或沉降观测仪在场地中心设置一个测孔，孔中测点位于各土层的顶部。

#### 三、水平位移观测

水平位移观测包括边桩水平位移和沿深度的水平位移两部分。它是控制堆载预压加荷速率的重要手段之一。

真空预压的水平位移指向加固场地，不会造成加固地基的破坏。

地表水平位移标一般由木桩或混凝土制成，布置在预压场地的对称轴线上于场地边线不同距离处，深层水平位移则由测斜仪测定，测孔中测点距离为1~2m。

#### 四、真空度观测

真空度观测分为真空管内真空度、膜下真空度和真空装置的工作状态。膜下真空度则能反映整个场地“加载”的大小和均匀度。膜下真空度测头要求分布均匀，每个测头监控的预压面积为1000~2000m<sup>2</sup>，抽真空期间一般要求真空管内真空度值大于90kPa,膜下真空度值大于80kPa。

#### 五、地基土物理力学指标检测

通过对比加固前、后地基土物理力学可更直观地反映出排水固结法加固地基的效果。

现场观测的测试要求见表4-11。

表 4-11 动态观测的测试要求

观测内容	观测目的	观测次数(次/日)	备注
沉降	推算固结程度 控制加荷速率	1. 4	1——加荷期间,加荷后一星期内观测次数 2——加荷停止后第二个星期至一个月内观测次数 3——加荷停止一个月后观测次数 4——若软土层很厚,产生次固结情况
		2. 2	
		3. 1	
		4. 4次/年	
坡趾侧身位移	控制加荷速率	1, 2. 1次/日 3. 1次/2日	
孔隙水压	测定孔隙水压增长和消散情况	1. 8	
		2. 2	
		3. 1	
地下水位	了解水位变化 计算孔隙水压	1	

#### 4.8.2 竣工质量检验

预压法竣工验收检验应符合下列规定:

(1)排水竖井处理深度范围内和竖井底面以下受压土层,经预压所完成的竖向变形和平均固结度应满足设计要求。

(2)应对预压的地基土进行原位十字板剪切试验和室内土工试验。必要时,尚应进行现场载荷试验,试验数量不应少于3点。

### 4.9 工程实例

#### 4.9.1 工程概况

浙江炼油厂位于浙江省镇海县境内,整个厂区座落在杭州湾南岸的海涂上,厂区大小油罐60余个,其中1万m<sup>3</sup>的油罐10个,罐体采用钢制焊接固定拱顶的结构型式。1万m<sup>3</sup>的油罐直径D=31.28m,采用钢筋混凝土环形基础,环基高度取决于油罐沉降大小和使用要求,本设计环基高h=2.30m,其中填砂。

罐区地基土属第四纪滨海相沉积的软粘土,土质十分软弱,而油罐基底压力达p=191.4kN/m<sup>2</sup>,所以油罐地基采用砂井并充水预压处理。

#### 4.9.2 土层分析和各土层物理力学性质

场地地基土层自上而下分为以下几层:第一层为黄褐色粉质粘土硬壳层,为超固结土,厚度在1m左右;第二层为淤泥质粘土,厚度约3.20m;第三层为淤泥质粉质粘土,其中夹有薄层粉砂,平均厚度为4.0m;第四层为淤泥质粘土,其中含有粉砂夹层;下部粉砂夹层逐渐增多而过渡到粉砂层,此层平均厚度为9.30m;第五层为粉、细、中砂混合层,其中以细砂为主并混有粘土,平均厚度为8.0m;第五层以下为粘土、粉质粘土及淤泥质粘土层,距地面50.0m左右为厚砂层,基岩在80m以下。各土层的物理力学性质指标见表4-12。从土工试验资料来看,主要持力层土含水量高(超过液限),压缩性高,抗剪强度低。第三、四层由于含有薄砂层夹层,其水平向渗透系数大于竖向渗透系数,这对加速土层的排水固结是有利的。

### 4.9.3 砂井设计

砂井直径 40cm、间距 2.5m，采用等边三角形布置，井径比  $n$  为 6.6。考虑到地面下 17m 处有粉细中砂层，为便于排水，砂井长度定为 18m，砂井的范围一般比构筑物基础稍大为好，本工程基础外设两排砂井以利于基础外地基土强度的提高，减小侧向变形。砂井布置见图 4-8。

### 4.9.4 砂井施工

本工程采用高压水冲法施工，即在普通钻机杆上接上喷水头，外面罩上一定直径的切土环刀，由高压水和切土环刀把泥浆泛出地面从排水沟排出，当孔内水含泥量较少时倒入砂而形成砂井。该法机具简单、成本低、对土的结构扰动小，缺点是砂井的含泥量较其他施工方法为大。施工时场地上泥浆多，在铺砂垫层前必须进行清理。

表 4-12 各层土的主要物理力学性质指标

层序	土层名称	含水量 (%)	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	孔隙比	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	液性指数	压缩系数 (cm <sup>2</sup> /kg)	固结系数 /10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /s/		三轴固结快剪		十字板强度 / kN/m <sup>2</sup>
										竖向 C <sub>v</sub>	径向 C <sub>h</sub>	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	
1	粉质粘土	31.3	19.1	0.87	34.7	19.3	15.5	0.78	0.036	1.57	1.82			
2	淤泥质粘土	46.7	17.7	1.28	40.4	21.3	19.1	1.33	0.114	1.12	0.91	0	26.1	17.5
3	淤泥质粉质粘土	39.1	18.1	1.07	33.1	19.0	14.1	1.42	0.066	3.40	4.81	11.4	28.9	24.8
4	淤泥质粘土	50.2	17.1	1.40	41.4	21.3	20.1	1.43	0.102	0.81	3.15	0	25.7	41.0
5	细粉中砂	30.1	18.4	0.90	23.5	16.3	7.2	1.91	0.023					
6a	粉质粘土	32.3	18.4	0.90	29.0	17.9	11.1	1.29	0.038	3.82	6.28			
6b	淤泥质粘土	41.2	17.6	1.20	41.0	21.3	19.7	1.01	0.061					
7	粘土	44.4	17.3	1.28	46.7	25.3	21.4	0.89	0.045					
8	粉质粘土	32.4	18.3	0.97	33.8	20.7	13.1	0.89	0.028					

#### 4.9.5 效果评价

本工程经现场沉降观测和孔隙水压力观测。根据观测结果，从稳定方面看，在充水预压过程中，除个别测点外，孔隙水压力和沉降速率实测结果均未超过控制标准，罐外地面无隆起现象，说明在充水过程中地基是稳定的。从固结效果来看，当充水高度达罐顶后 30 天(即充水开始后 110 天)孔隙水压力已经基本消散。放水前实测值已接近最终值，说明固结效果是显著的。因此，可认为该工程采用砂井充水预压，在技术上效果是好的。

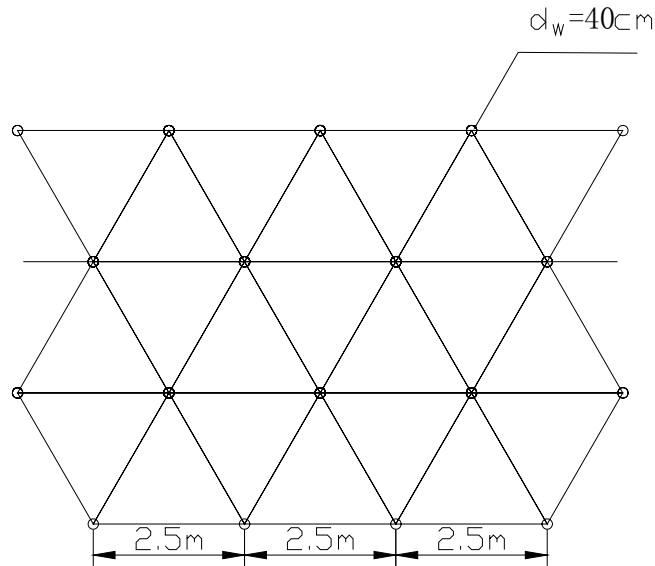


图 4-8 砂井布置平面图