

·综合·

# 真空预压中地下水位变化的研究

明经平, 赵维炳

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 分析真空预压中地下水位变化的研究现状, 指出目前研究存在的问题。在土水势概念的基础上, 以工程应用为目的, 定义了地下水位。从真空预压加固地基的机理出发, 分析了不同水流边界和不同渗透性的地基土在真空预压处理中地下水位变化的可能情况。通过分析指出, 真空预压过程中, 地下水位不可能下降, 地下水位不变和上升是可能的; 认为真空预压兼有降水预压的双重效果是不合理的。在此基础上进一步总结了真空预压法的加固机理。最后探讨了真空预压中地下水位的量测方法。

**关键词:** 真空预压; 地下水位; 土水势; 加固机理; 量测

中图分类号: TU472.33

文献标识码: A

文章编号: 1002-497X(2005)01-0001-06

## Study on Groundwater Level in Vacuum Preloading

MING Jing-ping, ZHAO Wei-bing

(Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The current study on groundwater level in vacuum preloading is analyzed, and some problems are listed. To serve for engineering, ground water level in vacuum preloading is defined on the basis of conception of soil water potential. According to the mechanism of vacuum preloading, groundwater level under different water current boundary and different penetrability conditions is analyzed, based on which, it is pointed out that it is possible to keep or increase groundwater level while impossible to decrease during vacuum preloading, and it is unreasonable to consider that vacuum preloading contributes to dewatering. Then, the mechanism of vacuum preloading is concluded, and the measurement method of groundwater level in vacuum preloading is discussed.

**Key words:** vacuum preloading; groundwater level; soil water potential; mechanism of consolidation; measurement

真空预压法地基处理是排水法地基处理中的一种。研究真空预压过程中土体中水流的变化情况, 特别是地下水位的变化情况, 有利于进一步认识真空预压法加固地基的机理, 更有利于对真空预压加固地基效果的评价和分析。

如果真空预压加固地基过程中地下水位下降, 那么加固后地基中的有效应力增量不仅包括真空负压作用直接转化的有效应力增量, 还包括地下

水位下降导致的有效应力增量; 如果地下水位不变, 即地下水位既不上升也不下降 (或下降和上升的影响很小, 以至于基本上可以忽略不计), 那么地基加固后的有效应力增量只是真空负压作用直接转化的; 如果地基加固后地下水位是上升的, 那么加固后地基中的有效应力增量等于真空负压作用直接转化的有效应力增量减去因地下水位上升导致的有效应力的变化量。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (58800024)。

收稿日期: 2004-08-13

作者简介: 明经平 (1970-), 男, 工程师, 博士研究生, 研究方向为软土地基处理。

由此可见,确定地下水位是上升、下降,还是不变,对真空预压效果的评价具有非常重要的意义。而掌握了地下水位在真空预压过程中的真实变化情况,反过来又可以验证和进一步解释真空预压地基处理的机理。

## 1 真空预压过程中地下水位变化研究现状

真空预压过程中地下水位的变化只有三种可能,即下降、上升和不变。目前持这三种观点的人都有,只是认为地下水位下降的人较多,也能查阅到比较多的文献资料<sup>[1-5]</sup>,而持后两种观点的文献资料相对较少。认为地下水位下降的观点也不是完全相同。有的文献只提出地下水位会下降,但对地下水位下降的幅度未作报道,有的文献提出地下水位下降最大能达到4.0~4.5 m<sup>[4-5]</sup>,甚至能达到6.0 m<sup>[2]</sup>,而有的认为地下水位下降不会超过1.8 m<sup>[3]</sup>。对加固区外的地下水位,有的认为加固区外的地下水位有所下降但下降不大<sup>[4]</sup>,也有的认为抽气后膜外水位下降1 m以上<sup>[6]</sup>。

不同工程的真空预压过程中,地下水位有所不同是可以理解的,因为不同工程会有自身的特殊性,如地基土的渗透性和加固区的水流条件都可能不一样。但现有的真空预压地下水位研究成果有如此大的定量上的差异,甚至定性上就不一致,这一方面说明真空预压中地下水位问题的复杂性,另一方面也说明目前对真空预压中地下水位的研究方法和量测方法可能存在某些问题。笔者认为对真空预压地下水位变化的研究主要存在以下几个方面的问题:

(1) 研究地下水位变化时,没有明确定义地下水位,多数文献是把测压管水位作为地下水位来研究。

(2) 没有根据真空预压的机理从理论上分析地下水位的变化,多数文献只是从真空预压工程的实测数据来分析。

(3) 在用实测数据研究地下水位变化时,没有采用非压力式仪器来量测地下水位的变化,多数文献是用水位管来测定地下水位,这就不

可避免地存在测试工况和测试仪器本身的影响。而且采用水位管测水位时,也多数是采用膜外测试法,水位管中显示的是正常大气压力下的相应值。

因此,从目前研究存在的问题方面来讲,也有必要对真空预压中地下水位的变化展开进一步的研究。

## 2 地下水位的定义

研究地下水位的变化是为了考虑地下水位变化对工程的影响,所以定义地下水位也必须从工程应用的角度出发。土中的水可分为结合水和非结合水,非结合水包括毛细水和重力水。土中水的能量称为土水势,土水势包括重力势、压力势、荷载势、基质势和溶质势<sup>[7]</sup>。从工程应用的角度出发,在真空预压中考虑地下水位变化的影响时,研究的对象是土中重力水,因此,基质势可不予考虑,而一般土中水的溶质势较小,因此溶质势也可以不予考虑,而一般土中水的溶质势较小,因此溶质势也可以不予考虑。在研究地下水位变化时土水势中的重力势、压力势和荷载势必须加以考虑,而通过取适当的参照面,重力势可取为0。所以从工程应用的角度出发,我们所研究问题中的土水势就包括压力势和荷载势:压力势就是土中水由于受重力作用而产生的压力,由于重力是一种体力,因此压力势的分布跟深度成正比;荷载势是由于外荷载作用而产生的,这里指的是一种广义的荷载,可以是堆载、渗透等因素,也可以是大气压力。由于大气压力的普遍性,正常大气压力状态下引起的荷载势取为0,而真空状态下引起的荷载势为负值。压力势就是静水压力,荷载势就是超静孔隙水压力,静水压力与超静孔隙水压力之和为总孔隙水压力(通常也叫孔隙水压力)。真空预压就是利用抽气的办法使大气压力小于正常的大气压力,从而产生孔隙水压力差,促使地基排水固结。在对真空预压中加固区内的孔隙水压力场分布进行分析和对加固效果进行计算时,采用的量应是总孔隙水压力。但在分析加固

区内地下水位变化引起的加固作用时,只要考虑土中水由于重力作用而产生的压力的变化,即考虑静水压力的变化。所以我们可以这样定义地下水位:地下水位就是土中水由于重力作用产生的压力为0的线(面),即静水压力为0的线(面),示意图见图1。

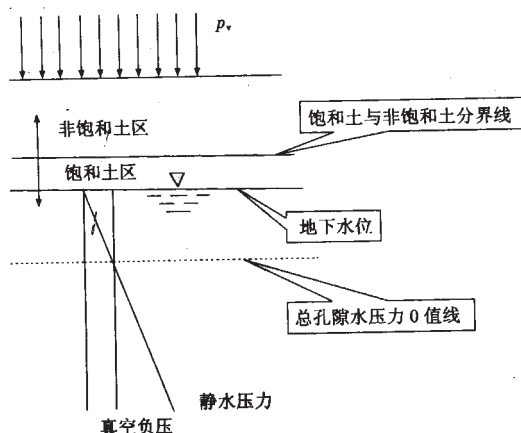


图1 真空预压中地下水位定义示意图

有人把孔隙水压力为零的线(面),或把饱和土和非饱和土的分界线(面)作为地下水位,这两种做法都是不合理的。下面作简要分析。孔隙水压力等于静水压力和超静孔隙水压力之和,当超静孔隙水压力为0时,孔隙水压力的变化就代表静水压力的变化,也就是地下水位的变化。但当超静孔隙水压力不为0时(可以为正,也可以为负),孔隙水压力的变化就不代表地下水位的变化。例如,在某级荷载加载的瞬间,超静孔隙水压力增加了 $\Delta p$ ,但地下水位并没有发生变化。又如,对盛有饱和土的刚性容器作用一真空压力为 $p_v$ 的真空源,一段时间后,刚性容器中孔隙水压力降低 $p_a - p_v$ ,但由于是刚性容器,孔隙水中并不产生压力差,所以不可能发生排水固结。由此可见,虽然孔隙水压力发生了变化,但水位却始终没有变化。

由于土体孔隙的毛细作用,在自由水面以上会形成毛细水区,根据土的性质不同,毛细水上升的高度不一样,有的土中的毛细水可以上升到几米。在毛细水区底部的一定范围,即在靠近

自由水面的毛细水区,可能形成饱和土区,但是这个区域的孔隙水主要是受毛细压力的控制,与自由水面以下的水主要受重力控制不同,这个区域的土的自重有效应力也不可能用有效容重来计算。另外,饱和土与非饱和土的分界面是很难确定的,所以把饱和土与非饱和土的分界面作为地下水位更是不合理的。为便于比较,假设真空预压中真空度沿深度呈矩形分布,并把总孔隙水压力为0的线和非饱和土与饱和土的分界线也示于图1。

研究地下水位的加固过程中的变化,还得选定一个参照面。在未进行加固之前原地下水位是一个标志线,在加固后,加固区以外较远地方的地下水位将保持为原水位。在加固区内,由于土体发生了收缩和沉降,从而导致原地下水位线也有相应的下降,但在地基处理的设计计算中一般是把研究的问题视为小变形问题,因此可以认为土体沉降未导致原地下水位变化。所以,在真空预压地基处理中考虑地下水位的变化,以原地下水位作为参照面是可行的。

### 3 地下水位变化的理论分析

真空预压中地下水位的变化应该从真空预压的机理出发,考虑真空预压地基中水流条件的特点,如水流的边界条件,水流所受的阻力(或土体中水的渗透性)等来进行分析。

经过几十年的研究,真空预压法的加固机理已经基本清楚<sup>[1,8-11]</sup>。真空预压就是通过抽气,使砂垫层、砂井或排水板中大气压力变为真空压力,并依次传递到土体中,使其中超静孔隙水压力减小,在膜外大气压力作用下,加固区土体中产生孔隙水压力差,孔隙水沿压力梯度最大的方向排出,土体的有效应力增大,土体体积收缩而得到加固。由此可见,真空预压中,转化为有效应力的只是减小的超静孔隙水压力,而孔隙水受重力作用产生的压力并没有变化,加固后的土体孔隙中仍然充满重力水,加固区仍然是饱和区<sup>[11]</sup>,只是孔隙体积比加固前减小了而已。室内和现场的真空

预压试验都表明,加固后土体仍然基本处于饱和状态<sup>[1,12]</sup>。所以,从真空预压加固地基的机理来分析,可以得出真空预压过程中的地下水位是不变的。

在叙述真空预压的机理时,通常对土体发生的固结,即孔隙水从土体中排到砂井或排水板的过程,叙述得很清楚,也很合理。但对水从砂井或排水板排到砂垫层,再到滤水管而排出的过程往往有所忽视,认为水在抽真空作用下就自溢出来,有的强调这个过程不需要动力作用,甚至认为这个过程与真空抽水有本质的不同。对水从砂井排出膜外的过程及形态研究甚少。事实上,水从砂井到砂垫层再到滤管后溢出,仍然是受规律支配的,那就是受到压力差的作用,水流沿着压力梯度最大的方向流动。水流从砂井到垫层再到滤管流出的形态,只可能是液态水和水蒸汽两种形式,从热力学的角度分析,在真空度达到 80 kPa 时,水的沸点约为 60 ℃,当真空度达到 90 kPa 时,水的沸点约为 50 ℃。因此,在真空预压中孔隙水发生沸腾是不可能的,但一定程度的汽化是存在的<sup>[1]</sup>。由于真空预压中加固区土体的孔隙水温度不可能上升多少,所以尽管真空状态有利于孔隙水汽化的发生,但单位时间内孔隙水的汽化量是有限的,加固过程中汽化的总水量也是有限的,由汽化导致的地下水位下降也是有限的。所以液态水仍是真空预压过程中水体流出的主要形态。由此可见,水从砂井到滤管而流出的过程与真空抽水在原理和形态上都是一样的。从水流的连续性条件可知,砂井中或排水板中的水位存在上升的可能,砂井或排水板中的水流也可能沿连通孔隙呈细线流状向上流出。根据真空预压的机理分析,砂井中的原地下水位是不可能下降的。

下面从真空预压中地基土的水流边界条件和土体的渗透性两方面来分析地下水位的变化。如果加固区有通水的水流边界且水源充足,水流在土中流动的阻力足够小,这时加固区的孔隙水就可视为一块水体,真空预压的水流情况就类似真

空抽水。众所周知,真空抽水最大可以增加水的压力势达 10 m,尽管真空预压地基土中的水流边界条件和渗透性与真空抽水有所不同,但理论上讲真空预压过程中地下水位存在上升的可能。

### 3.1 无通水的水流边界

可以做一个试验,一刚性容器配有上下可以自由移动的活塞,容器中装上土体,自由水面在土面以下某一深度,通过活塞的抽气孔向容器外抽气,从而产生真空预压。因为无通水的水流边界,所以当真空压力维持一定时间后,真空度将完全转化为土体的有效应力,抽出的水就是土体体积压缩时土体的孔隙水的减少量,原自由水面的相对位置不变,如果把土体压缩视为小变形问题,即忽略土体变形对水位的影响,那么就可以认为在整个真空预压过程中,水位是不变的。

### 3.2 有通水的水流边界

#### (1) 土体的渗透性较好

当整个加固区地基土的渗透性较好时,如用真空预压加固砂土地基,由于有良好的通水条件,真空负压有条件促使地基土中水的压力势增加,有可能发生加固区内地下水位上升。由于一部分负压消耗在压力势的增加上,导致土体中的真空度减小,土体中可能产生的孔隙水压力差减小,进而导致增加的有效应力减小,真空预压的加固效果受到影响。这就是我们一般不用真空预压加固砂土基的道理。当部分加固区地基土的渗透性较好时,如真空预压加固区存在透水砂层,且砂井或排水板与透水砂层连通,由于存在良好通水条件的水流通路,基于上述同样的道理,砂井或排水板中有可能发生水位上升,加固区土体的加固效果受到影响。

#### (2) 土体的渗透性较差

当土体的渗透性较差时,即使水流边界有足够的水源,由于通水条件的限制,消耗于压力势增加的真空负压有限,加固区土体中的真空度不会因此减小,加固区内外形成的孔隙压力差能够转化为土体的有效应力,所以能够达到真空预压



加固地基的效果。由于土体的渗透性差,土体传递真空度的能力也小,土体内几乎不能产生孔隙压力差。如果没有打设纵向排水通道,土体中孔隙水几乎不发生渗流,则水位也几乎不变;打设纵向排水通道后,改善了土体的整体渗透性,由于排水通道传递真空负压,渗径缩短,土体中形成孔隙压力差,孔隙水水平向排出到纵向排水通道。这时纵向排水通道的水位可能上升,也可能是发生沿连通孔隙的线状向上水流。由于土体中的孔隙水只发生水平渗流,土体中的水位仍不变。软粘土的渗透性都比较小,所以工程实践中通常采用真空预压法来加固软粘土地基。

综上所述,在真空预压法地基加固工程中,加固区地下水位的变化与加固区的水流边界条件和加固区土体的渗透性有关。当加固区无通水的水流边界时,如果不考虑孔隙水的汽化,加固区地下水位不变;当加固区有良好通水的水流边界时,加固区地下水位上升与否取决土体的渗透性;地基土的渗透性较好时,加固区的地下水位有可能上升;当地基土的渗透性较差时,地下水位不变。当加固区有良好通水的水流边界时,纵向排水通道的水位变化也取决于地基土的渗透性;渗透性较好时,水位有可能上升;渗透性较差时,在渗流和汽化的共同作用下,水位可能不变,可能轻微上升或轻微下降。所以在计算真空预压法地基处理的效果时,最多只能计及真空度完全转化为有效应力所能达到的效果,重复计算地下水位降低增加的有效应力,或者认为该方法具有真空预压和降水预压的双重效果都是不正确的。

#### 4 真空预压加固机理的进一步分析

通过上述分析,我们可以对真空预压法的加固机理进一步概括如下:①总孔隙水压力等于静水压力与超静孔隙水压力之和,静水压力就是水体由于重力作用产生的压力,即压力势,超静孔隙水压力就是荷载势;②土体加固是土体中孔隙水排出,土体的骨架应力(即有效应

力)增加、土体体积收缩的过程;③用真空泵形成真空源,真空负压通过砂垫层、砂井或排水板传递到土体中,土体中的大气压力减少;④一方面,膜外正常大气压力通过柔性膜作用使加固土体有保持原大气压力的趋势,即有保持超静孔隙水压力为0的趋势,从而使加固土体内产生了孔隙水压力差,这部分孔隙水压力差将转化为土体的有效应力增量,促使土体固结;另一方面,加固区外的大气压力通过水流通路与加固区内孔隙水形成孔隙水压力差,这部分孔隙水压力差将转化为水的压力势,导致地下水位升高;⑤加固区的通水条件受到遏制时,如截断了通水水流边界,或土体的渗透性很差时,形成转化为有效应力的孔隙水压力差占优,孔隙水排出,孔隙水压力差转化为有效应力,土体体积收缩而得到加固。

由此可见,真空预压法有三个关键的技术点:①是产生足够小的真空压力 $p_v$ ,即产生足够大的真空度 $(p_a - p_v)$ ,为此必须采用射流真空泵技术,保证管路和真空膜密封等;②是将这种真空负压转化为能产生有效应力增量的孔隙水压力差,为此必须采用柔性真空膜和处理硬壳层等;③是遏制能够转化为水的压力势的孔隙水压力差产生,为此必须截断透水层等。只有保证实现了上述三点,才能实现真空预压加固地基的目的。

#### 5 真空预压中地下水位的量测

测量真空预压中地下水位的方法有敞口测压管法和闭口测压管法<sup>[3]</sup>,两种方法都是采用测压管的原理,测定的是孔隙水压力水头,而实际上用的水位管,更难满足标准测压管的要求<sup>[5]</sup>,测出的值不完全是孔隙水压力水头的意义。

闭口测压管法是把测压管测头埋设在测点位置,测压管另一端也留在膜内,如果测点处的超静孔隙水压力为0,那么这样测出的水头高度位置就是地下水位的位置,可借用这种方法测水位的资料还不多见。闭口法由于测压管全埋在膜内,

所以必须配以电极量测。事实上,由于测压管的存在,测管真空度的分布与实际土体中的真空度的分布是不一致的,这将导致管内的水位与土体中的水位不一致。因此可以设计一种不用测管的地下水位量测方法,即沿深度方向每隔一定距离在土体中埋设1个电极,这样就得到沿深度方向的一系列电极,每个电极用绝缘导线引出膜外,根据土体中水的导电性,在加固的过程中量测各电极之间的导电性,从而判断地下水位的变化情况。

实际工程中通常采用的方法是敞口测压管(或水位管)法,这时是正常大气压下测得的测点处的孔隙水压力水头值(忽略水位管本身对孔隙水压力水头值的影响)。设测点处的真空度为 $p$ ,真空压力为 $p_v$ ,孔隙水压力 $u=p_v+\gamma_w h+\Delta u$ ,测压管水头 $u'=p_a+\gamma_w h'+\Delta u$ ,那么由 $u=u'$ ,得:

$$p_v+\gamma_w h+\Delta u=p_a+\gamma_w h'+\Delta u \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{所以: } h' &= \frac{(p_v-p_a)}{\gamma_w} + \frac{\gamma_w h}{\gamma_w} \\ &= h - \frac{p_a-p_v}{\gamma_w} \\ &= h - \frac{p}{\gamma_w} \end{aligned}$$

由此可见,测压管中的相对静水压力水头值 $h'$ 小于测点处的真实的静水压力水头值 $h$ ,量值为 $\frac{p}{\gamma_w}$ 。因此如果用敞口测压管法来量测地下水位,则会误以为地下水位下降了 $\frac{p}{\gamma_w}$ ,假设测点处的真空度为40 kPa,则会误认为地下水位下降了约4 m。

## 6 结论

(1) 地下水位是相对静水压力为0的线(面)。

(2) 真空预压中地下水位不会下降,真空预压的效果只是真空度转化为有效应力的加固效果,不存在真空和降水双重效果的作用。

(3) 真空预压是真空压力导致产生孔隙水压力差,孔隙水压力差转化为有效应力的过程。只有保证各个过程的转化条件才能达到真空预压加固地基的目的。

(4) 真空预压中地下水位的量测不能用敞口测压管法,敞口测压管法测得的水头下降易误为地下水位下降。用电极埋设法可正确测出地下水位在真空预压过程中的变化情况。

## 参考文献:

- [1] 龚晓南,岑仰润. 真空预压加固地基若干问题[J]. 地基处理,2002,13(4):7-11.
- [2] 叶柏荣. 真空预压加固法的发展及工程实录[J]. 地基处理,1995,6(3):1-9.
- [3] 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.
- [4] 温晓贵,朱建才,龚晓南. 真空-堆载联合预压加固软土机理的试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(5):40-43.
- [5] 董志良. 堆载及真空预压法加固地基地下水位及测管水位高度的分析计算[J]. 水运工程,2001,(8):15-19.
- [6] 叶柏荣,陆舜英,等. 袋装砂-真空预压法加固软土地基[J]. 水运工程,1983,(4):25-32.
- [7] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996. 17-21.
- [8] 陈环,鲍秀清. 负压条件下的固结有效应力[J]. 岩土工程学报,1984,6(5):39-47.
- [9] 闫澍旺,陈环. 用真空加固软土地基的机制和方法[J]. 岩土工程学报,1986,8(2):35-44.
- [10] 沈珠江,陆舜英. 软土地基真空排水预压的固结变形分析[J]. 岩土工程学报,1986,8(3):7-15.
- [11] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报,1989,11(4):45-55.
- [12] 丛瑞江. 真空预压加固超打面积软土地基[J]. 地基处理,1996,7(1):30-37.
- [13] 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. 108.