

· 地基与基础 ·



真空预压全过程有效应力变化

盛焕明, 李新仲, 陈荣旗, 黄 珊

(中海油研究总院, 北京 100027)

摘要: 真空负压在地下水位线以上及以下的传递规律、真空预压过程中地下水位线以上及以下部分有效应力增加的机理等问题, 目前学界各方的认识并不统一。通过对真空预压全过程孔隙总水头的变化引起有效应力变化规律的分析, 从另一角度探讨了真空负压在软土中的传递规律。结果表明: 真空负压在软土水位线以上及以下均会传递, 并随渗透阻力而衰减; 真空负压及地下水位下降均会引起软土水上、水下任一点有效应力的增加, 水上、水下有效应力增量的表达形式是统一的; 地下水位埋深与真空预压的加固效果相关, 埋深越大, 加固效果越差; 加固过程中, 地下水位下降, 但下降幅度不大。

关键词: 真空预压; 加固机理; 真空压力; 渗透阻力

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0180-08

Changing of effective stress in the whole process of vacuum preloading

SHENG Huan-ming, LI Xin-zhong, CHEN Rong-qi, HUANG Shan

(CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: At present, academic circles do not have a unified understanding of vacuum negative pressure transfer law above and below the underground water level, and of mechanism of effective stress increase above and below the underground water level in the process of vacuum preloading. This paper analyzes the changing of effective stress caused by the total pore water-head change in the whole press of vacuum preloading, and discusses the transfer law of vacuum negative pressure in soft soil from another angle. The research results show that the vacuum pressure can be transferred not only above the underground water level, but also below it. It will decrease with the penetration resistance; both the vacuum pressure and the lowering of groundwater level will cause the increase of soft soil effective stress at any point, and the increasing effective stress expression is uniform for any point both above the underground water level and below it; the degree of vacuum preloading reinforcement is associated with the depth of the underground water level, and the deeper, the worse the reinforcement effect; in the process of reinforcement, the groundwater level will decline, but do not drop.

Keywords: vacuum preloading; reinforcement mechanism; vacuum pressure; penetration resistance

1 真空预压机理研究进展及现状

真空预压是 1952 年由杰尔曼^[1]提出的, 但由于理论研究及工艺等方面的欠缺, 直到 20 世纪 80 年代后才在工程上得到了推广应用。在机理研究方面, 国外多侧重于稳定流方程的求解^[2], 国内

学者则相继进行了不少室内外试验和理论研究, 取得了丰硕的成果。

1) 加固机理。

陈环等^[3-5]提出真空预压是真空负压向土中传递, 形成压差使孔隙水渗流, 降低孔隙水压力,

收稿日期: 2014-07-04

作者简介: 盛焕明 (1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事软土地基处理、空间结构等方面的研究。

使有效应力增加而固结; 姜炎^[6-7]通过对真空预压孔隙水压力的实测和相关分析, 得出了类似的结论; 高志义^[8]则从孔隙水 U (势) 差的概念较透彻地论述了真空预压加固机理, 得出了类似的结论。

董志良^[9]提出地下水位以上土体符合上述观点, 地下水位以下土体符合真空降水预压的加固机理。龚晓南^[10]则以真空渗流场的概念, 提出地下水位以上土体由真空渗流场直接作用产生固结, 地下水位以下由降水预压产生固结。

此后, 大多学者均是围绕上述几种观点进行论述, 少有突破。

2) 真空预压与堆载预压的比较。

陈环^[3,5]、阎澍旺^[4]、高志义^[8]、董志良^[9]等论证了真空预压与堆载预压都是固结过程, 遵从固结方程, 两者仅边界条件不同。姜炎^[7]与高志义^[8]从有效应力路径方面, 透彻地解释了真空预压与堆载预压各自的固结特征及两者的不同。

3) 加固中地下水位变化。

目前存在分歧, 意见不一致。认为水位下降、不变、上升的观点均有, 但持下降观点的人居多, 并得到了现场实测资料的支持^[11-16]; 认为加固中水位不变或上升的人较少, 且多停留在理论层面^[17]。对于水位下降实测资料, 大多采用了传统的测试方法^[13-16], 由于存在理论缺陷, 测试结果存在较大误差。文献 [11-12] 对传统方法进行了改进, 消除了测试理论缺陷, 实测地下水位仍是下降的。

2 现有理论的不足及本文的工作

2.1 现有理论的不足

1) 加固机理。到目前为止, 从固结方程解出的理论解非常复杂、不直观, 难以对真空预压机理进行系统的阐述, 对真空预压机理的解释多为借助模型试验的文字阐述。前人有两种观点: ①一种观点指出真空预压是由真空负压引起孔隙水渗流、降低了孔隙水压力而使有效应力增加^[3-8]。但该类观点没有明确地下水位以上及以下软土加

固机理有无区别? 由于没有否定, 可认为该观点认同地下水位以上及以下软土加固机理是相同的。

②另一种观点则明确真空预压中, 地下水位以上与地下水位以下土体中真空预压的机理是不同的^[9-10]。两种观点对地下水位以上及以下的加固机理是否相同目前还存在着认识上的不一致、不统一。对加固机理的解释, 由于多为文字描述, 缺乏推导与演绎, 因此, 上述两种观念均不能相互说服对方。同时, 两种观点均没有明确地下水位下降对水位以上土体的固结有无贡献。

2) 加固中地下水位变化。虽然已有文献^[11-12]消除了测试理论缺陷, 用实测资料证实了加固中地下水位是下降的, 但对地下水位的下降幅度缺乏推导与分析。

2.2 本文的工作

首先通过对几个基本概念的理解, 明确了土中常态气压的存在, 阐述了地下水位线以上饱和区内孔隙水压力及有效应力的几个相关概念, 并根据文献资料, 认同了地下水位是下降的; 通过试验模型论述了真空负压在软土中的传递规律, 分析了加固区真空压力分布及与边界气压的关系。在此基础上, 通过对加固中不同时段孔隙水头压差、渗透阻力、有效应力等相关因素进行了重新推导与演绎, 论述了真空预压全过程中有效应力的变化, 从另一角度证明了地下水位以上及以下软土有效应力的增加机理是相同的, 地下水位以上及以下软土有效应力增量的形式是统一的, 完善了前人的观点。

在上述基础上, 理论上分析了加固中地下水位的变化幅度及出水特征, 解释了真空预压前期出水量大、后期出水量小的原因。

3 真空预压机理分析

3.1 几个基本概念

约定: 天然状态大气压力为 P_0 , 抽真空后砂垫层内剩余气压为 P_v , 软土中剩余气压记为 P_{v1} , 砂井一定深度处剩余气压记为 P_{v2} , 真空度记为 P_n , $P_n = P_0 - P_v$ 。土的总应力为 σ , 孔隙水压力

为 μ , 有效应力为 σ' , 一点到另一点的渗透阻力记为 P_R , 渗透阻力水头记为 H_R 。

1) 软土孔隙水中的大气压力。

如图 1, 天然状态下, 地下水位线与远端河道河水水面处于同一水平面, 地下水位线以上软土孔隙中受有气体压力, 其值与大气压力 P_0 相同。

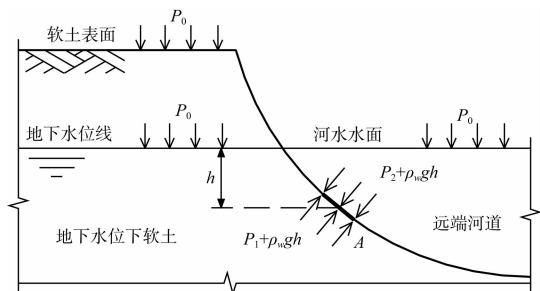


图 1 软土中的大气压力

P_0 经孔隙水传至孔隙水与河水交界面上任一 A 点的压强为 P_1 , 河道中经河水传至 A 点的压强为 P_2 , 由于河水为纯水环境, 根据静压传递原理, 有 $P_2 = P_0$ 。据 A 点力的平衡条件, 有:

$$P_1 + \rho_w gh = P_2 + \rho_w gh \quad (1)$$

得: $P_1 = P_2 = P_0$ 。

即天然状态下, 软土地下水位线以上大气压力均匀传至地下水位线以下孔隙水中各个方向, 地下水位线上、下均受有大气压力 P_0 。

2) 地下水位以上饱和区软土的孔隙水压力及有效应力。

重力水对土体颗粒有浮力作用, 地下水位线以上饱和土体中的孔隙水并非重力水, 而是类似于毛细水, 由于软土毛细孔对孔隙水的向上浸润吸附作用, 该饱和区内毛细孔隙水对软土颗粒非但没有浮力作用, 反而有向下的反作用力。该土层自重应力为:

$$\sigma = \rho' gh + \rho_w gh = (\rho' g + \rho_w g) h = \rho_{sat} gh \quad (2)$$

式中: ρ' 为软土的浮密度; ρ_w 为水的密度; ρ_{sat} 为软土的饱和密度。

图 2 中, A 点为地下水位线以下任一点, 其孔隙水压力为 μ_A , 总应力为 σ_A ; B 点为地下水位线以上饱和区内任一点, 其孔隙水压力为 μ_B , 总应力为 σ_B ; 对 A 点, 有:

$$\sigma_A = \rho gh_1 + \rho_{sat} g(h_s + h_w) \quad (3)$$

A 点有效应力为:

$$\sigma'_A = \sigma_A - \mu_A = \rho gh_1 + \rho_{sat} g(h_s + h_w) - \rho_{sat} gh_w \quad (4)$$

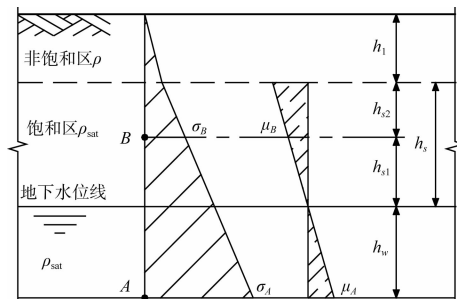


图 2 软土中的应力

实测资料^[18]显示, 真空预压后, 土体被压密, 含水率减小, 但饱和度不变, 文献[8]、[17]等均持有相同的结论。因此, 真空预压过程中, 当地下水下降后, 饱和区与非饱和区的分界线不变, 即图 2 中 $(h_s + h_w)$ 值不变, h_w 减小, 则 σ'_A 增大, A 点有效应力增加。

对 B 点, 由于毛细管吸力作用, 孔隙水压力为负值, 有:

$$\mu_B = -\rho_w gh_{s1} \quad (5)$$

$$\sigma_B = \rho gh_1 + \rho_{sat} gh_{s2} \quad (6)$$

B 点有效应力:

$$\sigma'_B = \sigma_B - \mu_B = \rho gh_1 + \rho_{sat} gh_{s2} + \rho_w gh_{s1} \quad (7)$$

当地下水位下降时, h_{s2} 不变, h_{s1} 增大, 则 σ'_B 增大, B 点处有效应力也增加。

3) 加固中地下水位变化。

基于文献[11-12]等对传统测试方法的改进, 能较准确地反映出加固期内地下水位的变化, 加固期间地下水位发生下降是可靠的。如图 3, 加固中地下水位线呈一个以加固区为中心一定范围内的降水漏斗状^[12-16], 在负压作用下, 加固区外的地下水不断向加固区内渗流补给, 直至趋于动态平衡^[12]。

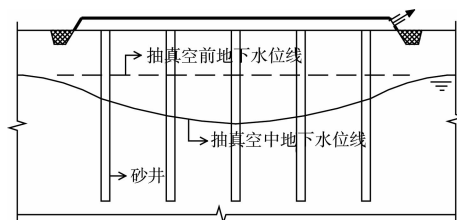


图 3 加固区地下水位变化

3.2 真空预压机理研究

3.2.1 真空负压在软土中的传递

黏性土的渗透系数很小, 对空隙水(气)的流动具有很大的阻力, 这可从低位真空预压的工程实例^[19]来说明。低位真空预压是在软土表面透水层之上铺一层淤泥(常见厚度为0.8~1.2 m), 来代替真空密封膜, 在施加真空负压过程中淤泥覆层密封性良好, 几乎不漏气。另一个工程实例是, 当预压区内地基土存在透水、透气夹层时, 通常会在加固区密封膜边缘处打设黏土搅拌桩形成防渗帷幕以确保加固区的密封性, 可见黏性土对空隙水(气)的阻力之大。

因此, 加固区边界处的黏土就相当于一个密封的边界, 其在真空负压作用下气体压力的传递规律类似于图4a)模型: 刚性容器盛有黏土, 上部覆有砂土层, 表面用密封膜密封, 自然状态下, 黏土空隙水中存在大气压力 P_0 , 抽真空后, 砂土渗透阻力很小, 气压迅速降为 P_v ; 水位线以上黏土空隙气压也在降低, 但受渗透阻力影响, 气压降低值在逐渐减小, 在水位线处变为 P_{v1} , $P_{v1} > P_v$ 。在水位线以下, 如果为纯水环境, 根据帕斯卡定律, 水中各点将均匀传递着压强 P_{v1} 。但由于黏土阻力, 原先存在的大气压强 P_0 不能马上减小为 P_{v1} , 而是降低为 P'_{v1} , $P'_{v1} > P_{v1}$ 。随着时间的延长, 容器中黏土各点的气压传递值最终趋于 P_v (此为时间无限长的理想状态)。

可见, 真空预压时, 真空负压在地下水水位上、下各点都有传递, 但会随黏土阻力发生衰减。

实际加固区内真空压力 P_v (P_{v1})的分布见图4b), 真空度 P_n 在砂垫层及砂井顶部最大, 由于井阻, P_n 在砂井中随深度增加不断衰减, 出砂井后向下, 阻力变大, P_n 迅速衰减为零。相应地, 真空压力 P_v 在砂井顶部最小, 沿深度增加逐渐增大, 出砂井后向下, P_v 迅速增大为 P_0 。在砂井之间, 沿水平方向 P_n 同样存在衰减, 相应 P_{v1} 沿路径逐渐增大。因此, 为保证加固效果, 砂井间距不能太大。

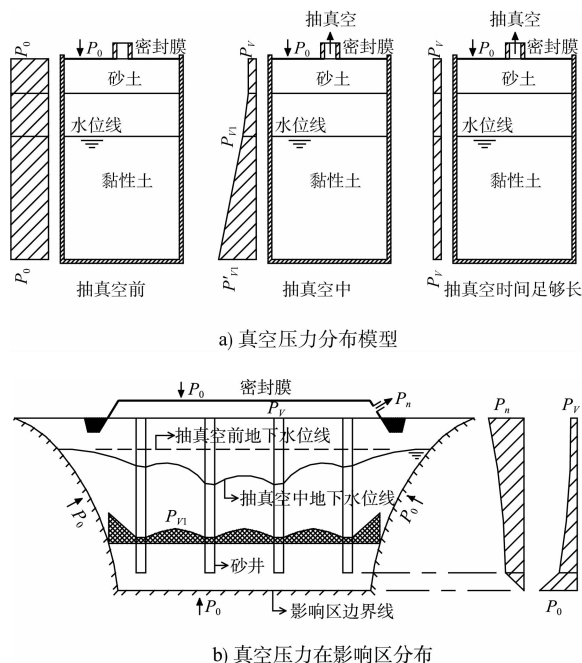


图4 地基土中真空压力分布

3.2.2 真空预压机理分析

根据太沙基有效应力原理, 土中一点总应力 σ 包括孔隙水压力 μ 和有效应力 σ' 两部分:

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (8)$$

真空预压时密封膜外始终作用着大气压力 P_0 , 若忽略地下水位变化, 则总应力基本没变化。据式(8), 当 μ 在真空负压作用下减小时, 必然引起 σ' 的增加, 它是引起软土固结的直接原因。

μ 发生变化的前提是孔隙水总水头发生变化。下面以研究土中任一点与砂井内参照点的总水头相互变化为基础, 来研究该点的渗流及有效应力变化, 从而认识真空预压的固结机理。

如图5, A、B两点位于下降后的地下水位线以下, C、D两点位于初始水位线和下降后水位线之间, E、F两点位于初始水位线以上的饱和区。A、C、E位于同一竖直线, B、D、F位于同一竖直线。现根据图5分析真空预压整个过程中有效应力的变化。

1) 真空预压前。

地表及软土内均受有大气压力 P_0 , 以砂井底为参考面, 则A点的位置水头为 h_{A1} , 压力水头(用考虑气压的绝对值表示)为 $H_{A1E} = h_{A2} + P_0/(\rho_w g)$, 总水头为:

$$H_{A1} = h_{A1} + h_{A2} + P_0/(\rho_w g) \quad (9)$$

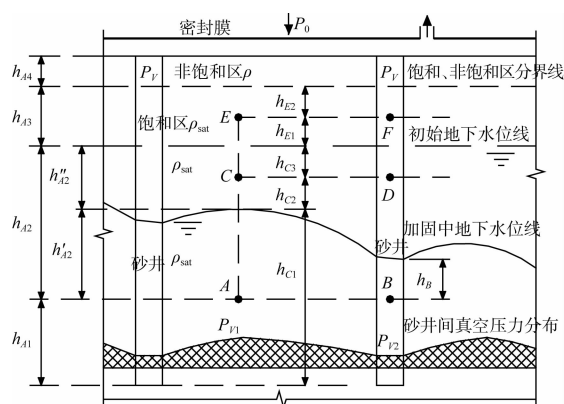


图5 真空预压过程中软土各点的相对位置

砂井中 B 点总水头为 $H_{B1} = h_{A1} + h_{A2} + P_0/(\rho_w g) = H_{A1}$, 土体不发生渗流。

此时,

$$\mu_{A1} = P_0 + \rho_w g h_{A2} \quad (10)$$

$$\sigma_{A1} = P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho_{sat} g h_{A2} \quad (11)$$

$$\sigma'_{A1} = \sigma_{A1} - \mu_{A1} = \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho' g h_{A2} \quad (12)$$

同理, C 、 D 两点间, E 、 F 两点间均不会发生空隙水渗流。

C 点:

$$\mu_{C1} = P_0 + \rho_w g h_{C3} \quad (13)$$

$$\sigma_{C1} = P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho_{sat} g h_{C3} \quad (14)$$

$$\sigma'_{C1} = \sigma_{C1} - \mu_{C1} = \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho' g h_{C3} \quad (15)$$

E 点:

$$\mu_{E1} = P_0 - \rho_w g h_{E1} \quad (16)$$

$$\sigma_{E1} = P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{E2} \quad (17)$$

$$\sigma'_{E1} = \sigma_{E1} - \mu_{E1} = \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{E2} + \rho_w g h_{E1} \quad (18)$$

2) 真空预压开始后瞬间。

如图6, 砂垫层及砂井顶气压下降至 P_V , 且 $P_V < P_0$, 水被抽至砂垫层, 砂井中充满水, 砂井 B 点剩余气压为 P_{V2} 。由于地下水被抽出, 处于非平衡状态, 则砂井水柱的顶、底面压力有如下关系:

$$P_{V2}/(\rho_w g) - [P_V/(\rho_w g) + h_{W0}] > 0 \quad (19)$$

在开始瞬间, 由于软土阻力 P_{R2} , A 点孔隙气压近似不变, 仍为 P_0 , 则有:

$$P_{V2} = P_0 - P_{R2} \quad (20)$$

对比图5与图6有: $h_{W0} = h_{A3} + h_{A4}$, 将其与式(20)一起代入式(19)中, 得:

$$(P_0 - P_{R2})/(\rho_w g) - [h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] > 0 \quad (21)$$

开始瞬间, A 点总水头 $H_{A2} = h_{A1} + h_{A2} + P_0/(\rho_w g)$, B 点总水头 $H_{B2} = h_{A1} + h_{A2} + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)$, 则:

$$H_{A2} - H_{B2} - H_{R2} = P_0/(\rho_w g) - [h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] - P_{R2}/(\rho_w g) = (P_0 - P_{R2})/(\rho_w g) - [h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] > 0 \quad (22)$$

由此得 $H_{A2} > H_{B2}$, 故 A 点向 B 点发生渗流, 此时, A 点有效应力为:

$$\sigma'_{A2} = \sigma_{A2} - \mu_{A2} = (P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho_{sat} g h_{A2}) - (P_0 + \rho_w g h_{A2}) = \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho' g h_{A2} = \sigma'_{A1} \quad (23)$$

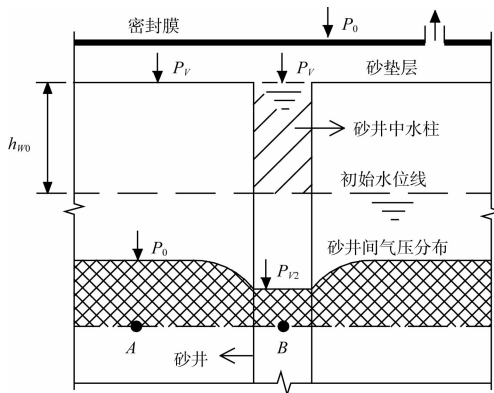


图6 真空预压开始阶段水位压差与孔隙气压

同理, 水面下 C 点向 D 点处发生渗流, C 点有效应力:

$$\sigma'_{C2} = \sigma_{C2} - \mu_{C2} = (P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho_{sat} g h_{C3}) - (P_0 + \rho_w g h_{C3}) = \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{A3} + \rho' g h_{C3} = \sigma'_{C1} \quad (24)$$

图5中, 以 E 点为基准, 水面上 E 点总水头 $H_{E2} = P_0/(\rho_w g) - h_{E1}$, F 点总水头 $H_{F2} = h_{E2} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)$ 。 E 、 F 两点间距与 A 、 B 两点间距相同, 故其渗透阻力相同。有:

$$H_{E2} - H_{F2} - H_{R2} = P_0/(\rho_w g) - [h_{E1} + h_{E2} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] - P_{R2}/(\rho_w g) = (P_0 - P_{R2})/(\rho_w g) - [h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] = H_{A2} - H_{B2} - H_{R2} > 0 \quad (25)$$

可见, 地下水位上、下各点与砂井之间具有相同的水头差, E 点向 F 点发生渗流, E 点处有效应力:

$$\sigma'_{E2} = \sigma_{E2} - \mu_{E2} = (P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{E2}) - (P_0 - \rho_w g h_{E1}) = \rho g h_{A4} + \rho_{sat} g h_{E2} + \rho_w g h_{E1} = \sigma'_{E1} \quad (26)$$

可见, 在真空预压开始后瞬间, 同一竖直线上的软土各点与砂井间存在相同的水头压差, 它是使土体发生渗流的原因, 但有效应力还没来得及发生变化。

3) 真空预压中前期, 真空泵抽水阶段。

在水头压差作用下, 孔隙水持续向砂井发生渗流, 地下水位持续下降; 此阶段 A 、 B 两点位于地下水位以下, C 、 D 两点位于下降后地下水位以上。实测资料^[18]显示, 真空预压后, 土体被压密, 含水率减小, 但饱和度不变, 文献[8]、[17]等均有相同的结论。因此, 地下水下降后, 饱和区与非饱和区的分界线不变, 即图5中 h_{A4} 不变。由于真空度的扩散, 软土内气压持续下降, $P_{V1} < P_0$ 。

如图7, 由于地下水被不断抽出, 处于平衡或非平衡状态, 则砂井水柱的顶、底面压力有如下关系:

$$P_{V2}/(\rho_w g) - [P_V/(\rho_w g) + h_w] \geq 0 \quad (27)$$

A 点到 B 点的渗透阻力记为 P_{R3} , 则: $P_{V2} = P_{V1} - P_{R3}$; 对比图5与图7有: $h_w = h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4}$, 代入式(27)中, 得:

$$(P_{V1} - P_{R3})/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] \geq 0 \quad (28)$$

由图5可见, A 点总水头 $H_{A3} = h_{A1} + h_{A2}' + P_{V1}/(\rho_w g)$, B 点总水头 $H_{B3} = h_{A1} + h_{A2} + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)$ 。

$$H_{A3} - H_{B3} - H_{R3} = P_{V1}/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] - P_{R3}/(\rho_w g) = (P_{V1} - P_{R3})/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] \geq 0 \quad (29)$$

得 $H_{A3} > H_{B3}$, 故 A 点向 B 点发生渗流, 此时, A 点有效应力为:

$$\sigma'_{A3} = \sigma_{A3} - \mu_{A3} = [P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g (h_{A3} + h_{A2}'') + \rho_{\text{sat}} g h_{A2}'] - (P_{V1} + \rho_w g h_{A2}') = (P_0 - P_{V1}) + \rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g (h_{A3} + h_{A2}'') + \rho' g h_{A2}' \quad (30)$$

$$\Delta \sigma'_{A3} = \sigma'_{A3} - \sigma'_{A1} = (P_0 - P_{V1}) + \rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g (h_{A3} + h_{A2}'') + \rho' g h_{A2}' - (\rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g h_{A3} + \rho' g h_{A2}') = (P_0 - P_{V1}) + \rho_w g h_{A2}'' = \Delta P + \rho_w g \Delta h_w > 0 \quad (31)$$

可见, 加固过程中, 地下水位以下任意点有效应力均增加, 并包括两部分: 真空负压引起的

部分和地下水位下降引起的部分。随着 P_{V1} 不断减小, h_{A2}'' 不断增大, 有效应力增加值在不断增大。

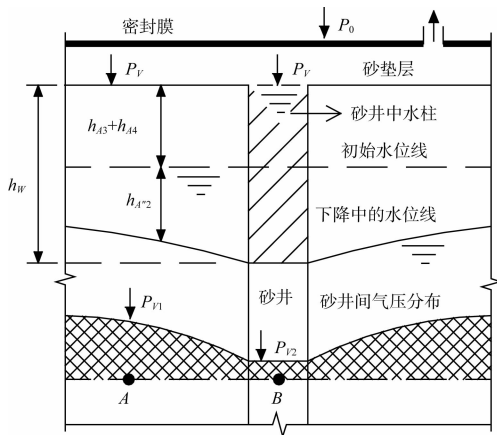


图7 真空预压过程中水位压差与孔隙气压

水面以上 C 、 D 点: 记 C 点气压为 P_{V1C} , 以 C 点为基准, 则 C 点总水头 $H_{C3} = P_{V1C}/(\rho_w g) - h_{C2}$, D 点总水头 $H_{D3} = h_{C3} + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)$ 。

$$H_{C3} - H_{D3} - H_{R3} = (P_{V1C} - P_R)/(\rho_w g) - [h_{C2} + h_{C3} + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] = (P_{V1C} - P_R)/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] \quad (32)$$

P_{V1C} 沿深度各点是变化的, 上小下大 (同图4b) P_V 分布), 接近水位线处, P_{V1C} 约等于水面下的气压 P_{V1} , 此时, 式(32)变为:

$$H_{C3} - H_{D3} - H_{R3} \approx (P_{V1} - P_{R3})/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_V/(\rho_w g)] = H_{A3} - H_{B3} - H_R \geq 0 \quad (33)$$

可见, 水面上、下相邻点与砂井间具有相同的水头差, C 点向 D 点发生渗流。如果 C 、 D 点在水面之上较远, P_{V1C} 衰减较快, 渗流会减慢甚至停止, 预先固结完毕。

C 点有效应力为:

$$\sigma'_{C3} = \sigma_{C3} - \mu_{C3} = [P_0 + \rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g (h_{A3} + h_{C3})] - (P_{V1C} - \rho_w g h_{C2}) = (P_0 - P_{V1C}) + \rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g (h_{A3} + h_{C3}) + \rho_w g h_{C2} \quad (34)$$

$$\Delta \sigma'_{C3} = \sigma'_{C3} - \sigma'_{C1} = (P_0 - P_{V1C}) + \rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g (h_{A3} + h_{C3}) + \rho_w g h_{C2} - (\rho g h_{A4} + \rho_{\text{sat}} g h_{A3} + \rho' g h_{C3}) = (P_0 - P_{V1C}) + \rho_w g (h_{C2} + h_{C3}) = (P_0 - P_{V1C}) + \rho_w g h_{A2}'' = \Delta P + \rho_w g \Delta h_w > 0 \quad (35)$$

比较式(31)和式(35)可知, 在软土的同一竖直线上, 水面上、下各点有效应力增加项相

同,均包括真空负压引起的部分和地下水位下降引起的部分。差别仅在于水面上、下各点气压衰减程度不一样。水面以上,真空度较大,有效应力增加值较大。随着真空负压项($P_0 - P_{v1c}$)沿深度逐渐减小,有效应力增加值也随深度逐渐变小。

4) 真空预压中后期,真空泵抽气阶段。

随着真空预压的进行, P_{v1} (P_{v1c}) 在不断减小,当软土中传递的气压不足以平衡砂井中出水水柱,即式(29)和式(32)变为下述两式时:

$$H_{A3} - H_{B3} - H_{R3} = (P_{v1} - P_{R3})/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_v/(\rho_w g)] < 0 \quad (36)$$

$$H_{C3} - H_{D3} - H_{R3} = (P_{v1c} - P_{R3})/(\rho_w g) - [h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4} + P_v/(\rho_w g)] < 0 \quad (37)$$

真空泵中将抽不出水来,只会抽气,维持真空负压。此时,砂井中水柱会逐渐回落,当回落到一定程度时,会有 $H_{A3} - H_{B3} - H_R = 0$ 或 $H_{C3} - H_{D3} - H_R = 0$,此时渗流处于平衡状态。

随着渗流的发生,软土中各点水头 H_{A3} 、 H_{C3} 在不断减小,渗流逐渐减缓。此时,真空负压的一大半用于平衡软土内的渗透阻力。

在平衡状态下, $H_{A3} - H_{B3} - H_{R3} = 0$,有

$$P_{v1} = \rho_w g(h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4}) + P_v + P_{R3} \quad (38)$$

式(38)中 ($h_{A2}'' + h_{A3} + h_{A4}$) 实际为该点加固后降低的地下水表面至地面的埋置深度,记为 h'_w ,上式变化为:

$$P_{v1} = \rho_w g h'_w + P_{R3} + P_v > P_v \quad (39)$$

因此,真空预压过程中, P_{v1} 一般要比 P_v 大得多。由于渗透阻力的存在及加固后地下水位的埋深加大,软土任一点的真空度是远达不到砂垫层的真空度的。

在此阶段,地下水位以下软土各点的有效应力同式(30),地下水位以上各点的有效应力同式(34)。

3.2.3 真空预压过程中地下水位的变化幅度

图7中砂井内地下水位线以上的水柱,显然有: $P_v < P_{v2} < P_0$ 。现有真空设备施加的真空度一般为 $P_n = 80 \sim 90$ kPa。根据式(27)得:

$$h_{w1} \leq (P_{v2} - P_v)/(\rho_w g) < (P_0 - P_v)/(\rho_w g) = P_n/(\rho_w g) \quad (40)$$

计算得 $h_{w1} = 8 \sim 9$ m,即砂井内水柱极限高度小于 $8 \sim 9$ m。文献[13]参考了单级真空井点降水实际极限提水高度(6 m),并统计了大量的真空预压实测资料,认为真空预压实际降水极限深度为6 m。由于真空井点降水与真空预压降水的原理基本相同,该数值是具有可参考性的。

砂井之间的一点,与砂井间存在渗透阻力,由式(28)得地下水位下降幅度:

$$h_{A2}'' = (P_{v1} - P_v)/(\rho_w g) - (H_R + h_{A3} + h_{A4}) < (P_0 - P_v)/(\rho_w g) - (H_R + h_{A3} + h_{A4}) \quad (41)$$

$$P_0 - P_v = P_n/(\rho_w g) - (H_R + h_{A3} + h_{A4}) \quad (42)$$

可见,砂井间软土地下水位下降幅度更小。由于 H_R 与路径长度正相关,因此,软土中一点距砂井越远,地下水位下降幅度(h_{A2}'')越小(图7)。

实际中,一般软土地下水位均较高($h_{A3} + h_{A4} = 1 \sim 2$ m),假如 P_{v2} 降至 P_0 (≈ 100 kPa)的一半时,则 $P_{v2} - P_v = 30 \sim 40$ kPa,根据式(40), $h_w < 3 \sim 4$ m,假设 $h_{A3} + h_{A4} = 1$ m,则砂井附近地下水下降仅为 $2 \sim 3$ m。可见,真空预压过程中,地下水位下降非常有限。

文献[13]统计了多个工程的实测结果,实测地下水位下降 $1.33 \sim 5.5$ m 不等(传统测试方法,结果偏大);文献[11]对测试方法进行了改进,实测地下水位下降不到 1 m^[11];文献[12]采用了新方法,实测地下水位:加固区中心下降 3.64 m,加固区边缘下降 1.97 m^[12]。

在加固后期,当 P_{v1}/P_{v2} 与 P_v 的差值抵不过渗透阻力及水柱压力时,真空泵将不出水,真空负压很大一部分用于平衡渗透阻力,渗流随时间将达到一动态平衡。

因此,当水位埋深较浅时,真空泵在加固前期会大量出水,但到后期,出水量会明显减少,这跟一般工程实践是一致的^[12-13]。

4 结论

1) 通过对真空预压全过程中有效应力变化的

推导与分析,解决了目前学界对于真空预压地下水位以上及以下的加固机理是否相同的争议,并明确了地下水位下降对水位线以上土体的固结有无贡献的问题。

比较式(31)与式(35),可得出如下结论:

①真空预压过程中,地下水位以上及以下的土体加固机理是相同的,其有效应力的增加,均是由真空负压和地下水位下降两者联合引起;两区域任意点有效应力增量的表达形式是统一的,有效应力增量值均为该点的大气压力降低值与地下水压力降低值之和。

②地下水位下降,并不单纯对地下水位以下的软土起加固作用,还会引起地下水位以上饱和区任意点软土有效应力的增加。地下水位下降,对地下水位以上及以下土体的固结均有贡献。

2)通过对加固中地下水位下降幅度的推导与分析,在地下水位线比较明确的情况下,地下水位的实时埋深对软土加固效果有直接的影响。地下水位至地表面的距离越大,加固效果越差。当初始地下水位低于地表面一定限度(见第3.2.3节,小于8~9 m),真空预压对软土的加固效果将非常有限。对于吹填土等地下水位线难以定义的情况下,该结论应另行研究。

根据推导,在真空预压过程中,地下水位下降幅度不大。当初始地下水位较低时,下降幅度会非常有限。

参考文献:

- [1] Kjellman W. Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure[C]//MIT, Boston: Proc Conference on Soil Stabilization, 1952.
- [2] Velent P J. Investigation of the Seafloor Preconsolidation Foundation Concept[R]. USA: Nava Civil Engineering Laboratory, 1973.
- [3] 陈环,鲍秀清. 负压条件下土的有效固结应力[J]. 岩土工程学报, 1984(5): 39-47.
- [4] 阎澍旺,陈环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986(2): 35-43.
- [5] 陈环. 真空预压机理研究十年[J]. 港口工程, 1991(4): 17-25.
- [6] 娄炎. 负压条件下软土地基的孔隙水压力[J]. 水利学报, 1988(9): 48-52.
- [7] 娄炎. 真空排水预压法的加固机理及其特征的应力路径分析[J]. 水利水运科学研究, 1990(3): 99-106.
- [8] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989(4): 45-56.
- [9] 董志良,胡利文,张功新. 真空及真空联合堆载预压法加固软基的机理与理论研究[J]. 水运工程, 2005(9): 83-91.
- [10] 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.
- [11] 张功新,董志良,莫海鸿,等. 真空预压中地下水位测试技术探讨与改进[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1 989-1 903.
- [12] 周琦,刘汉龙,顾长存. 真空预压条件下地下水位和出水量现场测试研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3 435-3 440.
- [13] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 40-43.
- [14] 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与计算[J]. 水运工程, 2001(8): 15-19.
- [15] 朱建才,李文兵,龚晓南. 真空联合堆载预压加固软基中的地下水位监测成果分析[J]. 工程勘察, 2004(5): 27-30.
- [16] 高海江,龚晓南,金小荣. 真空预压降低地下水位机理探讨[J]. 低温建筑技术, 2005(6): 97-99.
- [17] 明经平,赵维炳. 真空预压中地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005(1): 1-6.
- [18] 董江平,唐彤芝,张雄壮,等. 真空预压加固淤泥质软土性质与强度变化试验研究[J]. 土工基础, 2011, 25(2): 12-16.
- [19] 张辉星. 常规真空预压与低位真空预压软基加固比较分析[J]. 福建建设科技, 2006(4): 21-23.

(本文编辑 武亚庆)