

文章编号: 1000-7598-(2007)增刊-0923-04

一种真空预压区地下水位计算方法

顾长存, 罗 戌

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 根据抽真空时加固区内真空渗流场的形成机制和变化特点, 把真空渗流场的形成过程分为非稳定渗流和稳定渗流两个阶段。利用渗流量计算公式, 计算加固区内渗流量随时间变化过程曲线。结合两个阶段加固区地下渗流场的变化特性, 分别利用 Theis 和 Dupuit 计算模型计算不同时刻的地下水位, 并用实测进行验证。

关 键 词: 真空预压; 地下水位; 地下水运动; 计算

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Study of the groundwater level calculation method of vacuum preloading

GU Chang-cun, LUO Xu

(Geotechnical Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the formation principle and change characteristics of vacuum seepage field in the reinforced zone during vacuumizing, the formation process is divided into two stages, unstable seepage stage and stable seepage stage. Different seepage discharge calculation formulae are used, and the curve of seepage discharge is obtained. According to the change characteristics of underground water dynamics, the THEIS model and DUPUIT model are used to calculate the groundwater level of different time.

Key words: vacuum preloading; groundwater level; underground water dynamics; calculation method

1 引 言

从1952年瑞典皇家地质学院 W.Kjellman^[1]教授提出真空预压加固原理以来, 几十年来, 该法已经广泛应用于水利、港口、码头、公路等软基处理工程中。高志义^[2]、龚晓南^[3]、董志良^[4]等人在真空预压加固机制研究方面做了大量的工作, 并提出了真空负压下的砂井固结理论、多孔介质理论和真空渗流场理论等研究成果。但是, 这些理论对解释抽真空过程中地下水位的实际变化规律尚存在不足。大量的现场观测资料表明, 抽真空过程中土体中的真空度、孔隙水压力以及土体固结变形与加固区渗流场的形成和地下水位变化密切相关。董志良^[4]从砂井固结理论出发, 推导了堆载及真空预压砂井地基固结理论解析解和加固区渗流量计算公式。本文在此基础上利用地下水动力学相关原理, 探讨了真空预压地下水位计算方法。

2 渗流量计算

2.1 加固区渗流量计算

根据地下水动力学原理可以把排水板看成管井^[5]。根据抽真空的特点, 从砂井固结理论出发, 董志良推导出堆载及真空预压加固区渗流量计算公式如下^[4]:

$$Q_{\text{单板}} = (P_0 + P_1) \frac{\pi r_w^2 K_w}{r_w^0 H} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda - B_r}{\lambda} e^{-B_r t} \quad (1)$$

$$Q_{\text{总板}} = N Q_{\text{单板}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{竖}} = \frac{2K_v A(P_0 + P_1)}{H r_w^0} \sum_{m=0}^{\infty} e^{(-M^2 / H^2 C_v t)} \quad (3)$$

$$Q_{\text{竖总}} = N Q_{\text{竖}} \quad (4)$$

$$\text{其中: } M = \frac{2m+1}{2} \pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

$$\lambda = 8C_h / (d_e^2 F), \quad d_e = 2r_e \quad (6)$$

$$B_r = \frac{8C_h}{(F + J + D)d_e^2} \quad (7)$$

$$F = \ln n - \frac{3}{4}; \quad J = \ln s \left(\frac{K_h}{K_s} - 1 \right) \quad (8)$$

$$D = \frac{8G}{M^2} \frac{(n^2 - 1)}{n^2}; \quad n = r_e / r_w; \quad s = r_s / r_w \quad (9)$$

$$G = (K_h / K_w) (H / 2r_w)^2; \quad A = m\pi r_e^2 \quad (10)$$

式中: H 为砂井的计算长度; k_v , k_h 分别为地基竖向及水平向渗透系数; k_w 为排水板内透水系数; k_s 为涂抹区水平向渗透系数; r_w , r_s , r_e 分别为砂井、涂抹区及砂井影响区半径; P_1 , P_0 为正负压力值; n 为井径比; s 为井径比; G 为井阻因子; F 为井径比因子; J 为涂抹因子; C_h , C_v 分别为水平向和竖向固结系数; N 为加固区砂井数量; r_w 为水的重度; t 为抽真空历时; A 为加固区面积。

若令 $P_1 = 0$ 则为真空预压排水板渗流量计算公式。

2.2 加固区外渗流量计算

由于真空预压时加固区外的地下水渗入加固区内的机制与基坑涌水机制及变化过程很相似, 结合深基坑涌水量计算公式, 利用“大井法”^[6]进行计算外渗流量。

$$Q_{\text{外渗}} = 1.366 \frac{k(2h - s_w)}{\lg(R/r_0)} + \frac{2\pi R s_w r_0}{1.57 + \frac{r_0}{h_1} \left(1 + 1.185 \lg \frac{R}{4h_1} \right)} \quad (11)$$

式中: k 为土水平向渗透系数; s_w 为地下水位降深; h 为抽水前砂井打设深度以上部分水位高度; h_1 为从砂井底部到下卧不透水层的厚度; r_0 为引用半径; R 为抽水影响半径, 可按当地经验取值。

3 地下水位降深计算

由于加固区内外土层是连续的, 在抽真空作用下, 加固区外的水会渗入加固区内形成补给。根据真空渗流场的形成机制可知, 抽真空过程中, 加固区内地下水渗流场是一个有非稳定渗流逐渐变为稳定渗流的过程。当 $dQ_{\text{总板}} + dQ_{\text{竖向}} = dQ_{\text{外渗}} + dQ_{\text{固排}}$ 时, 加固区渗流场达到水量平衡, 处于理想稳定渗流状态, 此时地下水位趋于稳定, 地下水位降深达到最大值。因此, 可以根据地下渗流场特征, 在不同渗流阶段采用不同的计算方法分别计算真空预压过程

中的地下水位降深。

3.1 非稳定渗流阶段地下水位降深计算

从开始抽真空到加固区内真空渗流场趋于稳定的过程中, 地下水渗流场处于非稳定渗流状态。采用潜水完整井非稳定渗流的 Theis 理论公式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} s_w &= \frac{Q}{4\pi T} W(u) \\ u &= \frac{r^2 \mu^*}{4Tt} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: s_w 为抽水影响范围内任一点任一时刻的水位降深; Q 为抽水井的流量; T 为导水系数; r 为计算点到抽水井的距离; u^* 为含水层的贮水系数; $W(u)$ 为井函数, 可以查表相应取值。

Theis 公式是在假定水井定流量情况下导出的, 但是在实际的抽水过程单井出水量是由大到小逐渐变化的过程。因此, 在利用上述各式计算水位降深时必须考虑这一情况, 对计算式和计算方法作出相应的修正。

考虑到加固区内地下水位和渗流量之间的相关性, 结合 Theis 公式假设条件和计算公式的特点, 可以对计算方法进行修正如下:

(1) 由式 (1)、式 (3) 计算出加固区渗流量随时间变化过程, 并画出变化过程曲线, 利用拟合程序进行曲线拟合, 得出曲线变化规律;

(2) 对流量变化过程曲线, 按相同的 Δt 时间间隔进行概化, 用阶梯折线代替原曲线, 概化原则是矩形面积等于曲线与横坐标所围成的面积, 其中每一个阶梯范围内, 即认为每一个 Δt 时间内定流量恒定, 并求出流量 Q_i ;

(3) 把 Q_i 代入式 (6) 求出 s_{wi} , $\Delta s_{wi} = s_{wi} - s_{wi-1}$, 并求出 $H_{i+1} = H_i - s_{wi}$;

(4) 重复步骤 (2), (3) 求出 Δs_{wi} , 把 Δs_{wi} 累加, 作为对应时刻的总降深;

(5) 重复步骤 (2) ~ (4), 到地下水渗流场趋于稳定时刻 t 为止, 从而求得非稳定渗流地下水位降深变化过程曲线。

(6) 对离散的计算点进行曲线拟和, 分析其变化趋势和规律, 结合实测资料进行必要的经验修正。

3.2 稳定渗流阶段地下水位降深计算

在 t 时刻, 当加固区渗流场达到水量平衡时, 处于稳定渗流状态, 此时地下水位趋于稳定, 地下水位降深达到最大值。在计算过程中, 应该以该点为水位降深计算终止时间, 该点对应的水位降深为

地下水位最大降深。采用潜水完整井稳定渗流的 Dupuit 理论公式进行计算:

$$Q_{\text{排}} = 1.366k \frac{(2H_0 - s_w)s_w}{\lg \frac{R}{r_w}} \quad (13)$$

式中: H_0 为原水位面到不透水面高度; s_w 为地下水位降深; h_w 为降低后的地下水位面与不透水面的高度, $h_w = H_0 - s_w$; 对真空预压区取砂井有效影响半径; r_w 为砂井半径或塑料排水板等效半径。

由于式 (11)、式 (13) 中都包含未知量 s_w , 式 (1)、式 (3) 中的 H 也与 s_w 有关, 无法直接确定计算终止时间。根据上述各式间的因果关系, 可以采用迭代试算法确定水位降落稳定时间 t , 以及相应的降深 s_w 。由式 (1)、式 (3)、式 (11) 计算出加固区渗流量变化过程, 并作出曲线图。根据该曲线图曲线变化趋势, 取流量变化量接近平衡时的流量为假定平衡流量, 由式 (13) 算出相应的水位降深 s_w ; 再把计算所得的 s_w 代入式 (11) 求出 $Q_{\text{外渗}}$, 取几个值进行反复试算, 当 $dQ_{\text{总板}} + dQ_{\text{竖向}} = dQ_{\text{外渗}} + dQ_{\text{固结}}$ 时, 相应流量就是水量平衡时的流量, 由该流量计算所得的 s_w 就是地下水位最终降深。

具体的计算过程如下:

(1) 由式 (1)、式 (3) 求出 t 时刻的单板排水量 $Q_{\text{单板}}$ 和 $Q_{\text{竖}}$;

(2) 作出 $Q_{\text{单板}}-t$ 、 $Q_{\text{竖}}-t$ 关系曲线图;

(3) 从流量变化过程曲线中取流量变化平滑段曲线对应的流量 $Q_{\text{单板}}$ 代入式 (13), 解一元二次方程得 s_w ;

(4) 把 s_w 值代入式 (11) 求得 $Q_{\text{外渗}}$;

(5) 把 $Q_{\text{单板}}$ 代入式 (2) 求得 $Q_{\text{总板}}$; $Q_{\text{竖}}$ 代入式 (4) 算出 $Q_{\text{竖总}}$;

当 $Q_{\text{外渗}} \approx Q_{\text{总板}} + Q_{\text{竖总}} - Q_{\text{固结}}$ 时, 停止计算, 此时的 t 为计算终止时间, 对应的 s_w 为地下水位最大降深。

4 工程实例分析

青岛滨海公路真空预压软基处理区位于青岛开发区行政商务中心南侧。根据地质勘察报告, 结合现场地质状况、塑料排水板使用情况以及施工前后的现场和室内试验结果, 并参考相关文献 [6-8], 选用参数如下: $r_e = 56.4$ cm; $r_w = 3.3$ cm; $r_s = 6.6$ cm; $k_v = 6.6 \times 10^{-7}$ cm/s; $k_h = 65.5 \times 10^{-7}$ cm/s; $k_w = 0.025$ cm/s; $k_s = 4.10 \times 10^{-7}$ cm/s; $C_v = 2.61 \times 10^{-3}$ cm²/s; $H_0 = 1\ 000$ cm; $-P_0 = 80$ kPa; $r_0 = 60.77$ m;

$R = 100$ m; $T = k_h \times M$; $u = 0.25$; $W(u) = 1.044\ 3$; 如果概化时间间隔很小, 可以不考虑 t 的变化对井函数的影响。

运用式 (1)、式 (3)、式 (11), 计算得加固区内渗流量, 如图 1、图 2 所示。单板有效影响面积内土体的竖向渗流量不到塑料排水板相应时刻渗流量的 9%。按照上述方法进行反复迭代计算得, 当加固区达到水量平衡时, 对应渗流量为 0.239 cm³/s。利用式 (13) 得, $s_{w\text{max}} = 181.87$ cm。通过反复迭代计算得抽真空过程中地下水位降深变化过程曲线, 如图 3 所示。

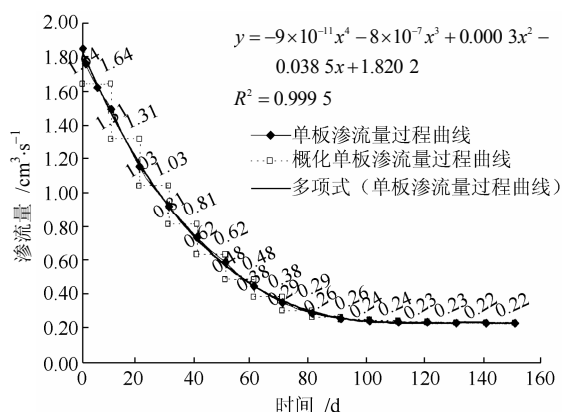


图1 砂井渗流量随时间变化过程曲线

Fig.1 Sand well seepage-time curve

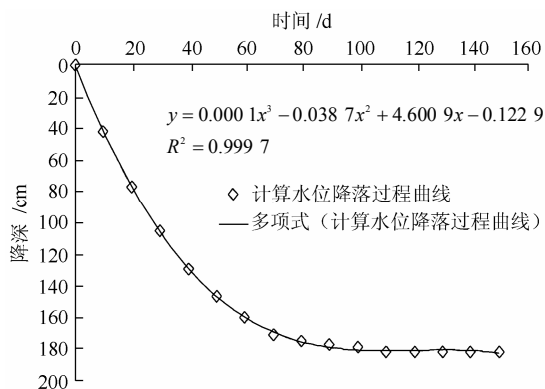


图2 砂井影响区竖向渗流量随时间变化过程曲线

Fig.2 Sand well's effect area seepage-time curve

由于计算结果可见, 单板 1 号流量从 1.8 cm³/s 至稳定的 0.2 cm³/s。随固结过程逐渐减少。地下水位降深为 2 mm 内, 与一般测试结果吻合。

由于受场地工程地质条件的不均匀性、施工工艺水平、抽真空效率等的影响, 真空预压过程中加固区内的真空渗流状态并非理想的真空渗流状态, 加固区的水位变化会随着加固区内真空度的变化而波动。从实测资料分析, 计算结果与实测结果基本符合。

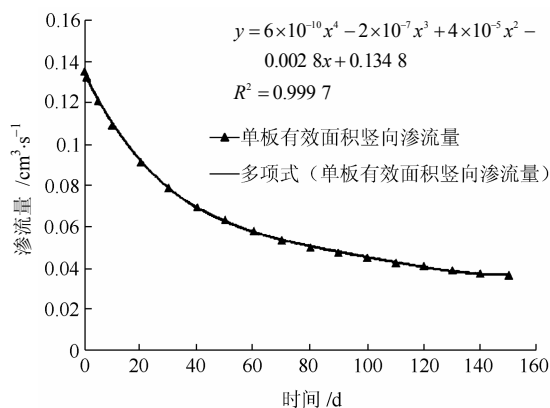


图3 加固区计算水位降深变化过程曲线
Fig.3 Consolidation area calculational groundwater level-time curve

5 结 论

(1) 真空预压区地下水运动荷载 Theis 模型和 Dupuit 模型, 由非稳定流向稳定流转化, 并趋于稳定。

(2) 通过对真空预压加固机制进行分析, 依据地下水运动理论, 具有较强的经验性。

(3) 采用曲线拟合技术, 计算结果与实测基本吻合, 该计算方法是可行的,

(4) 该法的广泛应用性及不同地质条件和抽真空效果对计算结果的影响还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Kjellman W. Consolidation of clay by means of atmospheric pressure[A]. **Proc. Conference on Soil Stabilization MIT**[C]. Boston: [s.n.], 1952.
- [2] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11 (4): 45-56.
- [3] 龚晓南. 地基处理技术及其发展[J]. 土木工程学报, 1997, 30 (6): 3-11.
GONG Xiao-Nan, Ground treatment technology and its development[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1997, 30(6): 3-11.
- [4] 董志良. 堆载及真空预压法加固地基渗流量的分析与计算[A]. 第二届塑料排水板论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1993.
- [5] 徐泽中, 刘世同, 柴玉卿. 真空堆载联合预压法的渗流分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30 (5): 85-88.
XU Ze-zhong, LIU Shi-tong, CAI Yu-qing. Seepage Analysis of vacuum-surcharge preloading method[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2002, 30(5): 85-88.
- [6] 南京大学地质系. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
- [7] 董志良. 真空预压-塑料排水板加固软基固结理论及真空度的研究[硕士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 1990.
- [8] 柴玉卿. 真空堆载联合预压法的固结与渗流研究[硕士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2001.