

成层土中基坑开挖降水引起的地表沉降分析

谢康和, 柳崇敏, 应宏伟, 杨 伟

(浙江大学 土木工程系, 浙江 杭州 310027)

摘 要:研究了成层土中基坑开挖降水引起的土中应力变化及周围地表沉降求解方法,在假定降水引发的渗流是一维竖向的条件下,推导了基坑周围土中有效应力和地表沉降计算公式,并结合具体基坑降水工程实例作了计算与实测结果的比较与分析.研究表明,基坑降水及由此引发的渗流使土中有效应力改变是基坑周围地表发生沉降的根本原因.

关键词:基坑开挖;降水;成层土;有效应力;地表沉降

中图分类号: TP312

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2002)03-0239-04

Analysis of settlement induced by dewatering during excavation in layered soil

XIE Kang-he, LIU Chong-min, YING Hong-wei, YANG Wei

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The influence of dewatering on the settlement of ground surface surrounding a pit is one of the key problems in excavations. In this work, the change of effective stress in soil mass and the settlement of ground surface induced by dewatering during excavation in layered soil were studied. Analytical formulas for calculating the effective stress and the settlement were derived under the assumption that the seepage induced by dewatering is one-dimensional and vertical. With the formulas as basis, a practical case was analyzed, and the obtained results were compared with the field measurements and discussed. It was shown that the changes in effective stresses resulted from dewatering and seepage are the main factors inducing settlement of ground surface.

Key words: excavation; dewatering; layered soil; effective stress; settlement of ground surface

在基坑开挖施工中,为防止基坑渗透破坏,采用井点降水等方法降低地下水位从而减少坑内外水头差是有效的措施之一,但此举往往将导致周围地表发生沉降而对邻近建筑物和周围环境产生危害.因此,基坑降水对周围地表沉降影响问题已引起广泛关注^[1~4].然而,与此有关的研究目前尚不多见,研究中考虑土的成层性的则更少,降水引起的沉降计算方法也远未成熟,不能满足实际工程的需要.本文以土力学基本理论和稳定状态渗流理论为基础,推导了成层土中一维渗流情况下有效应力计算公式,

提出了相应的地表沉降计算公式,并结合一实际基坑降水工程对基坑开挖降水引起地表沉降的机理进行了分析与讨论.

1 降水前后土层自重应力的变化

土中自重应力为土体有效自重土体中引起的应力,计算时对地下水位以下土层应用有效重度(即土体饱和重度扣除水的浮力)代替天然重度.基坑工程降水将使坑周土中的水位下降,从而使土层中

自重应力增大. 如图 1, 假设地基降水前地下水位于地表下 h_1 处, 降水达到稳定状态后, 地下水降至 h_2 处, 则在地基中增加的自重应力如图中阴影部分所示, 这些增加的土体自重有效应力必将使地表产生附加沉降.

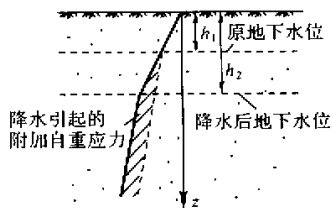


图 1 地下水位下降对土层自重应力的影响

Fig. 1 The influence of the drop of groundwater level on soil self-weight stress

2 竖向渗流下成层土中有效应力分析

在基坑工程中, 坑内外水头差的存在将使土中发生渗流, 从而也将使土中有效应力发生变化, 现分析如下.

图 2 所示为一典型基坑. 假设坑外 n 层层状土体在坑内外水头差 ΔL 的作用下沿竖直方向 z 发生稳定的一维渗流. 地下水位以下各土层的渗透系数分别为 k_1, k_2, \dots, k_n ; 各土层的饱和重度分别为 $\gamma_{\text{sat}1}, \gamma_{\text{sat}2}, \dots, \gamma_{\text{sat}n}$; 浮(有效)重度分别为 $\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_n$ ($\gamma'_i = \gamma_{\text{sat}i} - \gamma_w$); 厚度分别为 h_1, h_2, \dots, h_n ; 地下水位面以上土层厚度设为 h_0 , 重度为 γ_0 .

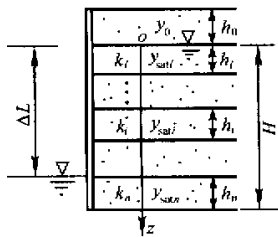


图 2 竖向渗流引起的应用变化分析示意图

Fig. 2 Sketch map for the analysis of the change in stress due to vertical seepage

并记地下水位面以下第 i 土层中的总水头为 $L_i(z)$; 总应力为 σ_i ; 有效应力为 σ'_i . 在一维渗流条件下, 成层土中各土层界面处的速度和水头是连续的, 由此可建立图示条件下以总水头 $L_i(z)$ 为变量的一维稳定渗流的控制方程及其求解条件如下:

$$\frac{\partial^2 L_i}{\partial z_i^2} = 0, \quad (1)$$

$$z = z_0 = 0, L_1(z_0) = 0, \quad (2)$$

$$z = z_i, L_{i+1}(z_i) = L_i(z_i), \quad (3)$$

$$z = z_i, k_{i+1} \frac{\partial L_{i+1}}{\partial z} = k_i \frac{\partial L_i}{\partial z}, \quad (4)$$

$$z = z_n = H, L_n(z_n) = -\Delta L. \quad (5)$$

式中: $z_i = \sum_{j=1}^i h_j = h_1 + h_2 + \dots + h_i$ 为原点至第 i 层底面的距离, $i = 1, 2, \dots, n$.

控制方程(1)的通解为

$$L_i = L_i(z) = a_i z + b_i, (z_{i-1} \leq z \leq z_i). \quad (6)$$

由求解条件(3)、(4)、(5)有

$$a_{i+1} z_i + b_{i+1} = a_i z_i + b_i, \quad (7)$$

$$a_{i+1} k_{i+1} = a_i k_i = C \quad (C \text{ 为待定常数}), \quad (8)$$

$$a_n H + b_n = -\Delta L. \quad (9)$$

由式(7)、(8)可得

$$b_{i+1} = b_i + \left(\frac{1}{k_i} - \frac{1}{k_{i+1}} \right) C z_i. \quad (10)$$

由式(2)可得 $b_1 = 0$, 故有

$$b_2 = b_1 + \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) C h_1 = \left(\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} \right) C - \frac{z_2}{k_2} C,$$

$$b_3 = b_2 + \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_3} \right) C z_2 = \left(\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2} + \frac{h_3}{k_3} \right) C - \frac{z_3}{k_3} C,$$

依次递推, 可以得到

$$b_i = \left(\sum_{j=1}^i \frac{h_j}{k_j} - \frac{z_i}{k_i} \right) C, \quad (11)$$

则

$$b_n = \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_i} - \frac{H}{k_n} \right) C. \quad (12)$$

结合式(8)、(9)和(12)得

$$C = -\Delta L / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_i}, \quad (13)$$

将式(8)、(11)、(13)代入式(6)即得解

$$L_i = L_i(z) = -\Delta L \left(\frac{z - z_i}{k_i} + \sum_{j=1}^i \frac{h_j}{k_j} \right) / \sum_{j=1}^n \frac{h_j}{k_j}, \quad (14)$$

$$(z_{i-1} \leq z \leq z_i; i = 1, 2, \dots, n).$$

由静力平衡条件, 可得地下水位面以下 z 深度处的竖向总应力为

$$\sigma_i = \sigma_i(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \gamma_{\text{sat}j} h_j + \gamma_{\text{sat}i} (z - z_{i-1}) = \sigma'_{ci} + \gamma_w z. \quad (15)$$

式中 σ'_{ci} 为 z 处的竖向自重应力, 即

$$\sigma'_{ci} = \sigma'_{ci}(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{j=1}^i \gamma'_j h_j + \gamma'_i (z - z_i). \quad (16)$$

故根据太沙基有效应力原理, 可得到土层地下水位面以下 z 深度处的竖向有效应力为

$$\sigma'_i = \sigma'_i(z) = \sigma_i - \gamma_w [L_i(z) + z] = \sigma'_{ci} + \sigma'_{si}. \quad (17)$$

式中 σ'_{si} 为竖向渗流引起的有效应力, 即

$$\sigma'_{si} = \sigma'_{si}(z) = \gamma_w \Delta L \left(\frac{z - z_i}{k_i} + \sum_{j=1}^i \frac{h_j}{k_j} \right) \left/ \sum_{j=1}^n \frac{h_j}{k_j} \right. \quad (18)$$

式(17)即为图 2 成层土中一维稳定渗流条件下的有效应力计算公式。可见,该有效应力是由不考虑渗流时的有效应力(即自重应力) σ'_{ci} 和渗流引起的有效应力 σ'_{si} 两部分组成的。

特别当 $k_1 = k_2 = \dots = k_n = k$, $\gamma'_1 = \gamma'_2 = \dots = \gamma'_n = \gamma'$, 式(17)即转化为

$$\sigma' = \sigma'(z) = \gamma_0 h_0 + \gamma' z + \gamma_w \Delta L z / H.$$

此即均质土中一维稳定渗流条件下的有效应力计算公式。

3 基坑工程降水引起的地表沉降分析

前述分析表明,基坑工程降水将引起土体自重有效应力的增加以及由于地下水渗流而产生的渗透有效应力的增加。现分析这两部分竖向附加有效应力引起地表沉降的求解方法。

设图 3 所示某基坑降水前后坑外水位高度分别为 H_0 和 H , 降水深度 $\Delta H = H_0 - H$ 。降水后地下水位以上各土层的重度分别为 $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_m$, 厚度分别为 h_0, h_1, \dots, h_m ; 地下水位以下各土层的重度分别为 $\gamma_{satm+1}, \gamma_{satm+2}, \dots, \gamma_{satn}$, 厚度分别为 $h_{m+1}, h_{m+2}, \dots, h_n$; 原地下水位以下各土层的有效重度分别为 $\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_n$ 。降水后坑外地下水位以下各土层在坑内外水头差 ΔL 的作用下在竖直方向发生一维渗流。

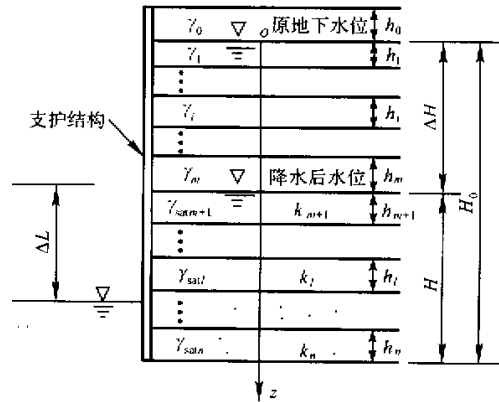


图 3 某基坑示意图

Fig. 3 Sketch map of a foundation pit

先分析降水引起的原地下水位面以下任意深度处的附加应力。

对于原地下水位面与降水后地下水位面之间

(即 ΔH 范围内)的土层,降水前深度 z 处的自重应力 $\sigma'_{ci}(z)$ 仍如式(16)所示,降水后该处的自重应力为

$$\bar{\sigma}'_{ci}(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{j=1}^i \gamma_j h_j + \gamma_i (z - z_i).$$

从而附加应力为

$$\Delta \sigma'_i(z) = \bar{\sigma}'_{ci}(z) - \sigma'_{ci}(z) =$$

$$\sum_{j=1}^i (\gamma_j - \gamma'_j) h_j + (\gamma_i - \gamma'_i) (z - z_i). \quad (19)$$

式中:

$$z_i = \sum_{j=1}^i h_j = h_1 + h_2 + \dots + h_i;$$

$$z_{i-1} \leq z \leq z_i; i = 1, 2, \dots, m.$$

对于降水后地下水位面以下(即 H 范围内)的土层,降水前深度 z 处的自重应力为

$$\sigma'_{cl}(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{j=1}^m \gamma_j h_j + \sum_{j=m+1}^l \gamma_j h_j + \gamma_l (z - z_l).$$

降水后深度 z 处的有效应力按成层土中一维渗流有效应力的计算公式(17)计算,则

$$\bar{\sigma}'_l(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{j=1}^m \gamma_j h_j + \sum_{j=m+1}^l \gamma'_j h_j + \gamma'_l (z - z_l) + \gamma_w \left[\left(\frac{z - z_l}{k_l} + \sum_{j=m+1}^l \frac{h_j}{k_j} \right) \left/ \sum_{j=m+1}^n \frac{h_j}{k_j} \right. \right] \Delta L.$$

故附加应力为

$$\Delta \sigma'_l(z) = \bar{\sigma}'_l(z) - \sigma'_{cl}(z) = \sum_{j=1}^m (\gamma_j - \gamma'_j) h_j +$$

$$\gamma_w \left[\left(\frac{z - z_l}{k_l} + \sum_{j=m+1}^l \frac{h_j}{k_j} \right) \left/ \sum_{j=m+1}^n \frac{h_j}{k_j} \right. \right] \Delta L. \quad (20)$$

式中:

$$z_l = \sum_{j=1}^l h_j = h_1 + h_2 + \dots + h_l;$$

$$z_{l-1} \leq z \leq z_l; l = m + 1, m + 2, \dots, n.$$

至此已求得降水后地下水位面以上和地下水位面以下土层附加应力 $\Delta \sigma'_i(z)$ 和 $\Delta \sigma'_l(z)$ 的计算公式,由此即可得降水引起的地表沉降计算公式为

$$S = \sum_{i=1}^m \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\Delta \sigma'_i(z)}{E_{si}} dz + \sum_{l=m+1}^n \int_{z_{l-1}}^{z_l} \frac{\Delta \sigma'_l(z)}{E_{sl}} dz. \quad (21)$$

式中: $\Delta \sigma'_i(z)$ 按式(19)计算; $\Delta \sigma'_l(z)$ 按式(20)计算; E_{si} 、 E_{sl} 分别为第 i 和第 l 层土的压缩模量; m 为原地下水位面与降水后地下水位面之间的土层数; n 为原地下水位面至支护桩底面之间的总土层数。

对于均质土,式(19)和式(20)变为

$$\Delta \sigma'_i(z) = (\gamma - \gamma') z;$$

$$\Delta \sigma'_l(z) = (\gamma - \gamma') \Delta H + \gamma_w \Delta L (z - \Delta H) / H.$$

则式(21)转化为均质土中基坑降水引起的地表沉降计算式,即

$$S=\frac{1}{2E_s}[(\gamma-\gamma')\Delta H(2H_0-\Delta H)+\Delta L\gamma_w(H_0-\Delta H)].$$

(22)

式(22)表明,地表沉降 S 随坑外降水深度 ΔH 和坑内外水头差 ΔL 的变化而变化,且当 ΔH 不变时, S 随 ΔL 线性增大。

4 工程实例分析

某基坑面积约 $55\text{ m}\times 30\text{ m}$ (如图 4),基坑开挖深度约 9.3 m 。基坑围护采用单排钻孔灌注桩支护,桩外双排深层水泥搅拌桩止水的方案。基坑降水采用坑内井点加集水井降水的方案。各土层的物理力学性质指标如表 1 所示。原地下水位位于地表下约 1.5 m 处。

表 1 各土层的物理力学指标

Tab.1 Physical parameters of the soil

土类	层号	h_i/m	$\gamma_i/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$k_i/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	E_{si}/MPa
杂填土	1	1.8	18.0	—	4.0
素填土	1—2	1.6	18.2	2.0×10^{-5}	5.0
砂质粉土	2—1	3.2	19.2	4.0×10^{-5}	9.0
砂质粉土	2—2	1.2	19.4	5.0×10^{-5}	10.5
淤泥质粉质粘土	3	8.0	17.9	0.75×10^{-5}	2.7

在开挖降水过程中于坑外设观测点对坑外水位和地表沉降进行观测,测点布置见图 4。降水达到稳定状态后, $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 和 $W4$ 观测点处的平均水位下降值 ΔH 分别为 2.6 、 3.7 、 2.3 、 1.4 m 。沉降计算剖面示意图如图 5 所示。假设坑外土体中只在重力方向发生一维渗流,各观测点下土层界面的有效

应力按成层土一维渗流有效应力公式(17)计算。对于淤泥质粉质粘土,由于其渗透系数较小,达到固结稳定所需的时间较长,分析中暂不考虑其沉降影响。降水达稳定状态后,坑内水位基本保持在坑底标高 0.5 m 以下,计算中近似取为 0.5 m (图 5)。

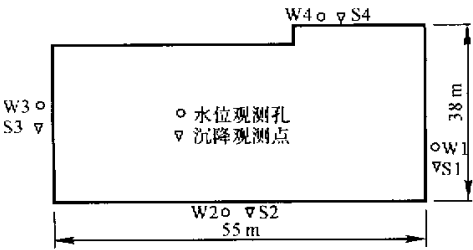


图 4 某基坑平面示意图
Fig. 4 Plane of a foundation pit

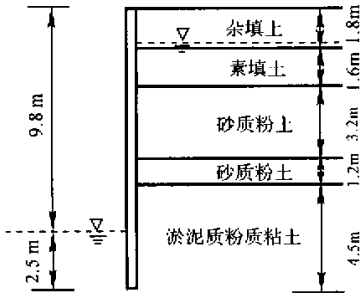


图 5 沉降计算模式图
Fig. 5 Calculation model for settlement

图 6 为降水前后考虑一维渗流和不考虑渗流时土层有效应力计算结果的比较。从中可见,降水使土层中有效应力增大。

降水引起的沉降按式(20)计算,表 2 为计算结果和实测结果比较。

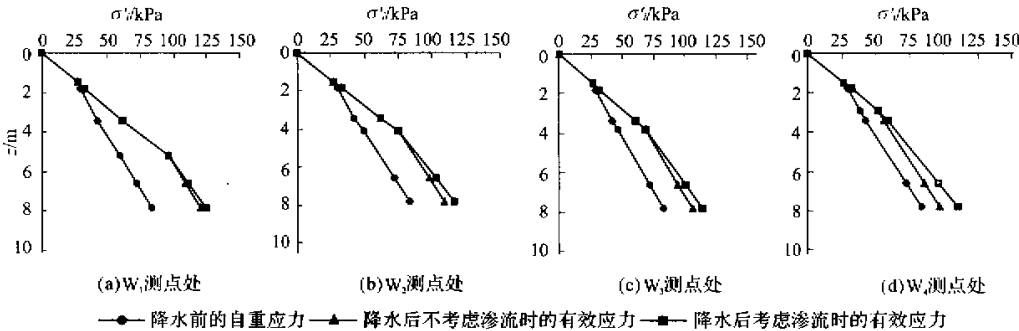


图 6 各测点处土层降水前后有效应力比较
Fig. 6 Comparisons of effective stress in soil layers at different points before and after dewatering

所进行的,其中受到了许多因素的影响,所得数据在一定程度上存在一定的地域限制,但对于钱塘江上的工程施工仍有一定的参考价值.至于本文所作的一切还仅仅是避免钱塘江潮危害的第一步,要想真正杜绝其带来的危害,还需进一步深入研究其产生机理,对涌潮压力的产生进行理论分析与数值模拟计算,扩大实测范围,以掌握其规律,从根本上解决问题.

参考文献(References):

[1] 苏铭德,徐昕,朱锦林,等.数值模拟在钱塘江涌潮分析中的应用——I.数值计算方法[J].力学学报,1999,31(5):521—533.
SU Ming-de, XU Xin, ZHU Jin-lin, *et al.* The application of numerical simulation in analysis of Qiantangjiang tide——Part I:Numerical method[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1999,31(5):521—533.
[2] 苏铭德,徐昕,朱锦林,等.数值模拟在钱塘江涌潮分析中的应用——II.计算结果和分析[J].力学学报,1999,31(6):700—716.

SU Ming-de,XU Xin,ZHU Jin-lin,*et al.* The application of numerical simulation in analysis of Qiantangjiang tide—— Part II: Result and discussion [J]. *Acta Mechanica Sinica*,1999,31(6):700—716.
[3] 曹德明,方国洪.杭州湾和钱塘江潮波的联合数值模拟[J].海洋学报,1988,10(5):521—530.
CAO De-ming,FANG Guo-hong. Numeric simulation of tidal bore in Hangzhou estuary and Qiantangjiang [J]. *Acta Oceanologica Sinica*,1988,10(5):521—530.
[4] 周胜,杨永楚.钱塘江水下防护工程的研究与实践[J].水利学报,1992,(1):20—30,19.
ZHOU Sheng, YANG Yong-chu. Investigation and application of the underwater protection engineering in Qiantangjiang [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992,(1):20—30,19.
[5] 陈希海.钱塘江涌潮动力浅析[J].河口与海岸工程,1993,(1—2):35—50.
CHEN Xi-hai. Analysis of dynamics force of Qiantangjiang bore [J]. *Journal of Estuarine and Coastal Engineering*,1993,(1—2):35—50.



(上接第 242 页)

表 2 计算沉降与实测沉降比较
Tab.2 Comparisons of calculated settlements with measured ones (mm)

测点	<i>S</i> (考虑一维渗流)	<i>S</i> (不考虑渗流)	<i>S</i> (实测)
S1	17.0	15.6	17.0
S2	19.8	19.2	26.0
S3	16.1	14.4	18.0
S4	13.6	10.0	17.0

由表 2 可见,考虑渗流所得的沉降与实测值更接近.

5 结 语

本文以土力学和稳定状态渗流基本理论为基础,在假设坑外土体只在重力方向发生一维渗流的条件下,推导了成层土中基坑降水引起的有效应力和沉降计算公式.计算和分析表明,基坑降水及由此引发的渗流使土中有效应力改变是基坑周围地表发生沉降的根本原因.

实际基坑工程中渗流问题多属三维空间复杂问题,因此基坑降水引起的地表沉降计算问题还有待

于在本文工作的基础上结合工程实践进一步研究.

参考文献(References):

[1] 李小勇,谢康和,贺武斌.渗流作用下层状饱和土有效应力计算方法研究[J].工业建筑,2000,30(9):43—47.
LI Xiao-yong, XIE Kang-he, HE Wu-bin. A study on the computational method for effective stress in layered and saturated soil under seepage [J]. *Industry Architecture*, 2000, 30(9): 43—47.
[2] 吴永红,周玉明.基坑降水引起的地面沉降之估算方法[J].工程勘察,1993,(4):14—16.
WU Yong-hong, ZHOU Yu-ming. An estimating method for settlement of ground surface induced by pit dewatering [J]. *Engineering Survey*, 1993, (4): 14—16
[3] BORJA R I. Free boundary, fluid flow, and seepage forces in excavations [J]. *J Geotech Engrg*,1992,118(1):125—145.
[4] 龚晓南,高有潮.深基坑工程设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
GONG Xiao-nan, GAO You-cao. *Manual for design and construction of deep excavation engineering* [M]. Beijing: China Architecture Industry Publisher, 1998.