

渗流作用对基坑坑底回弹变形的影响

李玉岐¹, 周健¹, 谢康和²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027)

摘要: 在地下水位较高的地区开挖基坑时渗流作用是普遍存在的。假定坑内外地下水渗流为一维稳定的条件, 推导了坑内外被动区和主动区的水头计算公式, 并结合算例分析了渗流对坑底被动区的有效应力和坑底回弹变形的影响。研究表明, 渗流作用使得坑底的有效应力减小, 进而引起坑底土层回弹量增大。

关键词: 渗流; 回弹; 水头; 基坑开挖; 有效应力

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Influence of seepage on heave of foundation pit base during excavation

LI Yu-qi¹, ZHOU Jian¹, XIE Kang-he²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Seepage is ubiquitous during excavation in high groundwater table. Analytical formulas for calculating the water head in active and passive zones of foundation pit are derived under the assumption that the seepage is one-dimensional and steady. The influence of seepage on the effective stress and the heave of foundation pit base is analyzed through a numerical example. It is indicated that seepage causes the decrease of effective stress and thus the increase of heave of soil mass beneath foundation pit base.

Key words: seepage; heave; water head; excavation; effective stress

1 引言

基坑工程中围护结构变形与周围地表沉降已引起了广泛关注^[1~5], 而坑底的回弹变形却没有引起足够的重视。坑底的回弹变形量太大将引起基坑失稳。正确的计算坑底回弹变形量, 有助于准确确定基础标高及预估将来建筑物沉降, 因此坑底回弹量的计算应引起高度重视。在地下水位较高的地区开挖基坑时渗流作用是普遍存在的, 地下水的渗流将引起坑内外的孔隙水压力和有效压力发生改变, 不仅影响作用在围护结构的侧压力计算^[6~9], 还影响坑底的回弹变形量计算, 甚至可能引起管涌和流土。由于现行的很多坑底回弹量计算公式没有考虑渗流作用的影响^[10], 本文在假定坑内外地下水的渗流为一维稳定的条件下, 推导出了主动区和被动区的水头计算公式, 并基于太沙基有效应力原理, 分析研究了渗流作用对坑底土层有效应力的影响及由此引起的坑底回弹变形量计算。

2 坑内外土层中的水头计算

2.1 问题的描述

图1为一基坑开挖示意图。假设坑外主动区地下水位面以下 n 层土和坑底被动区 m 层土在坑内外水头差 ΔL 的作用下, 沿竖直方向 z 发生稳定的一维渗流($z=0$ 处为基准面); 坑外主动区地下水位面以下各土层的渗透系数分别为 $k_{a(1)}, k_{a(2)}, \dots, k_{a(n)}$; 厚度分别为 $h_{a(1)}, h_{a(2)}, \dots, h_{a(n)}$, 且有 $\sum_{i=1}^n h_{a(i)} = H$, 坑底被动区各土层的回弹模量分别为 $E_{rp(1)}, E_{rp(2)}, \dots, E_{rp(m)}$, 渗透系数分别为 $k_{p(1)}, k_{p(2)}, \dots, k_{p(m)}$, 厚度分别为 $h_{p(1)}, h_{p(2)}, \dots, h_{p(m)}$, 且有 $\sum_{i=1}^m h_{p(i)} = H - \Delta L$; 饱和重度分别为 $\gamma_{satp(1)}, \gamma_{satp(2)}, \dots, \gamma_{satp(m)}$; 有效重度分别为 $\gamma'_{p(1)}, \gamma'_{p(2)}, \dots, \gamma'_{p(m)}$ ($\gamma'_{p(i)} = \gamma_{satp(i)} - \gamma_w, i=1, 2, \dots, m$)。并设坑外地下水位面以上为一层土, 厚度为 h_0 。

地下水位面以下主动区和被动区第 i 土层中的

总水头分别记为 $L_{a(i)}(z)$ 和 $L_{p(i)}(z)$, 并考虑到成层土中各土层界面处的流速和水头连续, 则主动区的控制方程与求解条件分别为

$$\frac{\partial^2 L_{a(i)}(z)}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$z = z_0 = 0: L_{a(1)}(z_0) = 0 \quad (2)$$

$$z = z_i: \begin{cases} L_{a(i+1)}(z_i) = L_{a(i)}(z_i) \\ k_{a(i+1)} \frac{\partial L_{a(i+1)}(z_i)}{\partial z} = k_{a(i)} \frac{\partial L_{a(i)}(z_i)}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n-1$; $z_i = \sum_{j=1}^i h_{a(j)} = h_{a(1)} + h_{a(2)} + \dots +$

$h_{a(i)}$, 为原点至主动区第 i 层土底面的距离。

被动区的控制方程与求解条件分别为

$$\frac{\partial^2 L_{p(i)}(z)}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

$$z = z_0 = \Delta L: L_{p(1)}(\Delta L) = -\Delta L \quad (5)$$

$$z = z_i: \begin{cases} L_{p(i+1)}(z_i) = L_{p(i)}(z_i) \\ k_{p(i+1)} \frac{\partial L_{p(i+1)}(z_i)}{\partial z} = k_{p(i)} \frac{\partial L_{p(i)}(z_i)}{\partial z} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, m-1$; $z_i = \Delta L + \sum_{j=1}^i h_{p(j)} = \Delta L + h_{p(1)} +$

$h_{p(2)} + \dots + h_{p(i)}$ 为原点至被动区第 i 层土底面的距离。

假设主动区和被动区土体在围护结构的底部即 $z = H$ 处水头和流速连续, 则有:

$$z = H: \begin{cases} L_{p(m)}(H) = L_{a(n)}(H) \\ k_{p(m)} \frac{\partial L_{p(m)}(H)}{\partial z} = -k_{a(n)} \frac{\partial L_{a(n)}(H)}{\partial z} \end{cases} \quad (7)$$

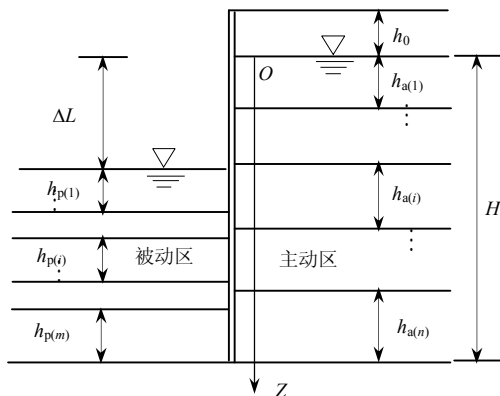


图1 基坑开挖示意图

Fig.1 Sketch map of a foundation pit

2.2 方程的求解

控制方程式 (1) 的通解为

$$L_{a(i)}(z) = a_i z + b_i \quad (8)$$

根据其求解条件可得:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= 0; a_{i+1} z_i + b_{i+1} = a_i z_i + b_i; \\ a_{i+1} k_{a(i+1)} &= a_i k_{a(i)} = C (C \text{ 为待定常数}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

所以

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

亦即

$$\left. \begin{aligned} b_2 &= b_1 + \left(\frac{1}{k_{a(1)}} - \frac{1}{k_{a(2)}} \right) C z_1 = \left(\frac{h_{a(1)}}{k_{a(1)}} + \frac{h_{a(2)}}{k_{a(2)}} - \frac{z_2}{k_{a(2)}} \right) C; \\ b_3 &= b_2 + \left(\frac{1}{k_{a(2)}} - \frac{1}{k_{a(3)}} \right) C z_2 = \left(\frac{h_{a(1)}}{k_{a(1)}} + \frac{h_{a(2)}}{k_{a(2)}} + \frac{h_{a(3)}}{k_{a(3)}} - \frac{z_3}{k_{a(3)}} \right) C \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

故 b_i 的通式为

$$b_i = \left(\sum_{j=1}^i \frac{h_{a(j)}}{k_{a(j)}} - \frac{z_i}{k_{a(i)}} \right) C \quad (12)$$

控制方程式 (4) 的通解为

$$L_{p(i)}(z) = A_i (z - \Delta L) + B_i \quad (13)$$

根据式(5)~(7)可得:

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= -\Delta L; A_{i+1} (z_i - \Delta L) + B_{i+1} = A_i (z_i - \Delta L) + B_i; \\ a_n k_{a(n)} &= -A_m k_{p(m)} = C; A_{i+1} k_{p(i+1)} = A_i k_{p(i)} = -C \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据求 b_i 的方法, 可得:

$$B_i = -\Delta L - \left(\sum_{j=1}^i \frac{h_{p(j)}}{k_{p(j)}} - \frac{z_i - \Delta L}{k_{p(i)}} \right) C \quad (15)$$

考虑到围护结构底部处坑内外的水头相等得:

$$C = -\Delta L / \left(\sum_{i=1}^n \frac{h_{a(i)}}{k_{a(i)}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_{p(i)}}{k_{p(i)}} \right) \quad (16)$$

所以, 主动区与被动区的水头计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} L_{a(i)}(z) &= \left(\frac{z - z_i}{k_{a(i)}} + \sum_{j=1}^i \frac{h_{a(j)}}{k_{a(j)}} \right) C; \\ L_{p(i)}(z) &= -\Delta L - \left(\frac{z - z_i}{k_{p(i)}} + \sum_{j=1}^i \frac{h_{p(j)}}{k_{p(j)}} \right) C \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

3 渗流对基坑坑底回弹变形的影响

在地下水位埋藏较浅的地区开挖基坑时，由于坑内外水头差的存在而发生渗流，渗流作用将引起坑底土层竖向有效应力降低，造成坑底回弹变形量增加。

坑底以下任意深度处的竖向总应力和孔隙水压力分别为

$$\sigma_{p(i)}(z) = \sum_{j=1}^{i-1} \gamma_{\text{satp}(j)} h_{p(j)} + \gamma_{\text{satp}(i)} (z - z_{i-1}) \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{wp}(i)}(z) = \gamma_w z + \gamma_w L_{p(i)}(z) \quad (19)$$

根据太沙基有效应力原理，可得考虑渗流作用影响时坑底以下任意深度处的竖向有效应力为

$$\begin{aligned} \sigma'_{p(i)}(z) &= \sigma_{p(i)}(z) - \sigma_{\text{wp}(i)}(z) = \\ &= \sum_{j=1}^i \gamma'_{p(j)} h_{p(j)} + \gamma'_{p(i)} (z - z_i) - \gamma_w [L_{p(i)}(z) + \Delta L] \end{aligned} \quad (20)$$

在不考虑渗流作用影响时，坑底以下任意深度处的有效应力为

$$\sigma'_{p0(i)}(z) = \sum_{j=1}^i \gamma'_{p(j)} h_{p(j)} + \gamma'_{p(i)} (z - z_i) \quad (21)$$

故由于渗流作用影响使得坑底以下任意深度处的有效应力增量为

$$\Delta \sigma'_{p(i)}(z) = \sigma'_{p(i)}(z) - \sigma'_{p0(i)}(z) = -\gamma_w (L_{p(i)}(z) + \Delta L) \quad (22)$$

渗流作用引起坑底土的竖向有效应力降低，使得坑底的回弹变形增大，所以考虑渗流作用影响时，增加的坑底回弹变形量的计算公式为

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^m \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\Delta \sigma'_{p(i)}(z)}{E_{\text{tp}(i)}} dz = \int_{\Delta L}^{z_1} \frac{\Delta \sigma'_{p(1)}(z)}{E_{\text{tp}(1)}} dz + \\ &+ \int_{z_1}^{z_2} \frac{\Delta \sigma'_{p(2)}(z)}{E_{\text{tp}(2)}} dz + \cdots + \int_{z_{m-1}}^{z_m} \frac{\Delta \sigma'_{p(m)}(z)}{E_{\text{tp}(m)}} dz = \\ &= \gamma_w C \sum_{i=1}^m \frac{h_{p(i)}}{E_{\text{tp}(i)}} \left(\sum_{j=1}^i \frac{h_{p(j)}}{k_{p(j)}} - \frac{h_{p(i)}}{2k_{p(i)}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

根据以上的分析可知，渗流作用使得被动区的竖向有效应力减小，引起坑底的回弹变形增大，因此在地下水位较高的地区开挖基坑不考虑渗流作用影响是偏危险的。

4 算 例

某基坑工程开挖到坑底时坑外地下水位面在地表下约 3 m 处，基坑开挖深度和围护结构插入坑底以下深度均为 6 m，坑外地下水位面以下各土层的物理力学性质指标如表 1 所示，坑内土层及其参数与坑外相同。

表 1 土层物理力学指标

Tab.1 Physical parameters of the soils				
土类	h/m	$k/10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	E_r/MPa	$\gamma_{\text{sat}}/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
粉土	1.6	4.2	2.4	19
细砂	3.2	14.0	4.5	19.8
砂质粉土	1.8	6.5	3.2	19.4
粉质粘土	2.4	2.4	1.6	18.6

坑底各土层的竖向有效应力分布如图 2 所示。考虑渗流作用影响时的坑底各土层有效应力均比不考虑渗流作用影响时小，所以渗流使得坑底的回弹变形增大，根据式 (23) 可得考虑渗流作用影响时增加的坑底回弹变形量为 13.7 mm。

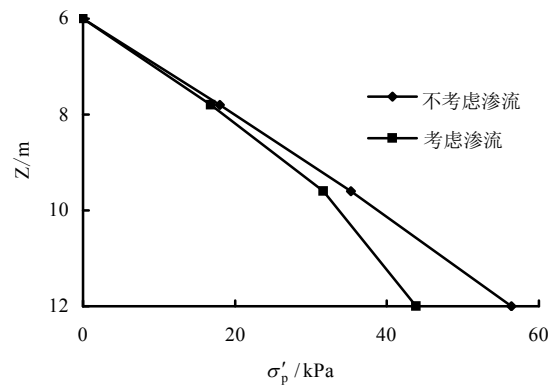


图 2 坑底的有效应力分布

Fig.2 Distribution of effective stress in foundation pit base

图 3 为坑底各土层的渗透系数变化对坑底回弹变形增量（考虑渗流作用影响时）的影响图。假设坑外各土层的渗透系数不变，而坑底各土层的渗透系数成相同的比例变化，且定义 K 为坑底各土层的渗透系数与表 1 中坑底各土层的渗透系数比值。由图 3 可知，当坑底各土层的渗透系数较小时，由于水头在坑底损失较多，有效应力减少的也较多，故渗流对坑底回弹变形的影响较大；而当坑底各土层的渗透系数较大时水头在坑底的损失较少，有效应力减少的也较少，故渗流对坑底的回弹变形影响较小。另外，渗流引起的坑底回弹还受坑内外的水头差以及坑底回弹模量等因素的影响。

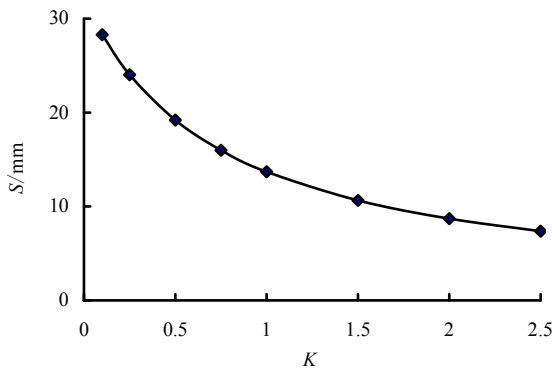


图3 渗透系数变化对坑底回弹变形的影响

Fig.3 Influence of soil permeability on heave of foundation pit base

5 结 语

在地下水位较高的地区开挖基坑时,若采用坑内井点降水或明沟排水坑内外存在着水头差将发生渗流。本文基于稳定渗流理论与太沙基有效应力原理,推导出了一维稳定渗流条件下主动区和被动区的水头计算公式,并研究了渗流作用对坑底土层有效应力的影响及由此引起的坑底回弹量计算。结果表明,渗流使得坑底被动区土层的有效应力减小,并进而坑底的回弹变形量增大;当坑底各土层的渗透系数相对坑外各土层的渗透系数较小时,渗流对坑底回弹变形的影响较大。

参 考 文 献

- [1] 陆培毅, 顾晓鲁, 钱征. 天津港务局综合业务楼深基坑支护与监测[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 323—327.
LU Pei-yi, GU Xiao-lu, QIAN Zheng. Design and monitoring of deep foundation pit in Tianjin port office multiple building[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 323—327.
- [2] 娄奕红, 俞三溥, 王秉勇. 基坑支护结构内力及变形动态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 462—466.
LOU Yi-hong, YU San-fu, WANG Bing-yong. Analysis of internal force and deformation of support structure for foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(3): 462—466.
- [3] 杨国祥, 李侃, 赵锡宏, 等. 大型超深基坑工程信息化施工研究——上海外环隧道的浦西基坑工程[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 483—487.
YANG Guo-xiang, LI Kan, ZHAO Xi-hong, et al. A study on IT construction for specially big & deep excavation engineering—deep excavation engineering of Outer Ring Tunnel Project in Puxi, Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 483—487.
- [4] 谢康和, 柳崇敏, 应宏伟, 等. 成层土中基坑开挖降水引起的地表沉降分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(3): 239—242.
XIE Kang-he, LIU Chong-min, YING Hong-wei, et al. Analysis of settlement induced by dewatering during excavation in layered soil[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2002, 36(3): 239—242.
- [5] 谢康和, 杨伟, 应宏伟, 等. 基坑开挖降水引起的地面下沉计算公式[A]. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002. 282—285.
- [6] 陈愈炯, 温彦锋. 基坑支护结构上的水土压力[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 139—143.
CHEN Yu-jiong, WEN Yan-feng. Water and earth pressures on the supporting structure around a foundation pit[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(2): 139—143.
- [7] 杨晓军, 龚晓南. 基坑开挖中考虑水压力的土压力计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(4): 58—62.
YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1997, 30(4): 58—62.
- [8] 王洋, 汤连生, 杜赢中. 地下水渗流对基坑支护结构上水土压力的影响分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(2): 107—110.
WANG Yang, TANG Lian-sheng, DU Ying-zhong. Effect of groundwater seepage on water and soil pressure in brace system of excavation[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni**, 2003, 42(2): 107—110.
- [9] 李广信, 刘早云, 温庆博. 渗透对基坑水土压力的影响[J]. 水利学报, 2002, (5): 75—80.
LI Guang-xin, LIU Zao-yun, WEN Qing-bo. Influence of seepage on water and earth pressure in foundation pit[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (5): 75—80.
- [10] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.