

非稳定渗流引起的基坑坑底回弹变形计算

李玉岐^{1,2}, 周 健¹, 谢康和³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海大学 土木工程系, 上海 200072; 3. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 基于一维非稳定渗流理论, 研究大面积开挖基坑且支护墙体刚度较大情况下坑内外水头的变化规律, 并推导相应计算公式, 进而分析坑底水头、孔隙水压力、有效应力以及回弹变形随时间的变化关系。研究表明, 开挖卸载引起的超静孔压以及坑内外水头差诱发的渗流共同作用使得坑底孔隙水压力随时间逐渐增加, 进而引起坑底有效应力逐渐减小和坑底回弹变形逐渐增加。

关键词: 土力学; 基坑; 非稳定渗流; 有效应力; 开挖; 回弹变形

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 2952 - 07

CALCULATION OF BASE HEAVE OF FOUNDATION PIT INDUCED BY UNSTEADY SEEPAGE

LI Yuqi^{1, 2}, ZHOU Jian¹, XIE Kanghe³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Based on one-dimensional unsteady seepage theory, the variation rule of water head inside and outside a foundation pit is investigated under the condition of large-scale excavation and retaining walls with large rigidity; and the corresponding analytical formulas for calculating water head are deduced. The variations of water head, pore water pressure, effective stress and heave of pit base with time are further analyzed. It is shown that excessive pore water pressure induced by unloading and seepage induced by water head difference between the inside and outside of the foundation pit cause the increase of pore water pressure beneath pit base with time, and thus the decrease of soil effective stress and the increase of pit base heave are induced.

Key words: soil mechanics; foundation pit; unsteady seepage; effective stress; excavation; heave

1 引言

地下水渗流对土体的强度和变形有着重要影响, 土木工程中的很多工程事故都与地下水的渗流有关, 因此地下水渗流对基坑工程的影响已引起了广泛的关注^[1~6]。基坑工程中的地下水渗流, 通常涉及到开挖卸载引起的超静孔压(非稳定渗流)及坑内外水头差诱发的渗流共同作用, 当土体的渗透系

数较大时, 开挖卸载引起的超静孔压消散很快, 地下水渗流在开挖结束后就可以近似认为达到了稳定渗流状态。若在土体渗透系数较小的地区开挖基坑时, 由于开挖卸载引起的超静孔压消散很慢, 地下水的渗流在开挖结束后很长时间也难以达到稳定渗流状态, 因此渗流场也更加复杂。由于基坑工程及其渗流场的复杂性, 目前对渗流作用下基坑坑底回弹变形的解析研究还很少。在大面积开挖基坑时, 若支护墙体的刚度较大且支撑得以及时安装, 则支

收稿日期: 2006 - 05 - 28; **修回日期:** 2006 - 08 - 21

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060400672)

作者简介: 李玉岐(1977 -), 男, 博士, 2005 年于浙江大学岩土工程专业获博士学位, 主要从事软黏土力学与地基处理等方面的研究工作。E-mail: liyuqisohu@sohu.com

护墙体的水平位移通常很小, 其两侧渗流近似于一维渗流, 因此可以基于一维非稳定渗流理论进行分析。本文以大面积基坑开挖为背景, 不考虑支护墙体的水平位移, 并基于一维非稳定渗流理论^[7]对坑内外地下水渗流进行研究, 推导出了坑内外水头的计算公式, 进而分析了基坑坑底孔隙水压力、有效应力以及回弹变形随时间的变化关系。

2 水头控制方程及求解条件

图 1 为给定的一软土地区大面积的基坑分步开挖示意图, 支护结构采用地下连续墙, 不考虑墙体的水平位移。基坑开挖步数为 n , 假设每步开挖都是一次完成; 考虑到软土的渗透系数较小, 假设基坑每步开挖过程中坑内外地下水水面分别在基坑开挖面处和地表处保持不变。基坑每步的开挖深度为 Δh_j ($j=1, 2, \dots, n$), 累计开挖深度为 ΔH_j ($\Delta H_j = \sum_{i=1}^j \Delta h_i; j=1, 2, \dots, n$), 每步开挖后的施工间歇时间 $T_j = t_j - t_{j-1}$ (每步的开挖时间叠加到该步的施工间歇时间内), t_j 为前 j 步开挖的累计施工间歇时间, 也就是开始第 $j+1$ 步开挖时对应的时间。

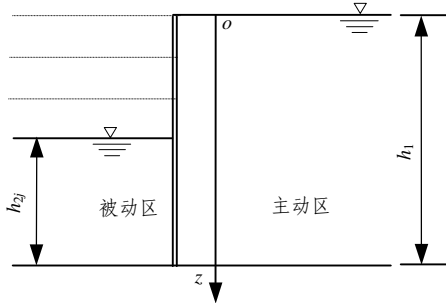


图 1 基坑分步开挖示意图

Fig.1 Sketch of step excavation of foundation pit

基坑开挖深度与时间关系如图 2 所示。坑外主动区的土层厚度为 h_1 , 每步开挖后坑底被动区的土层厚度 $h_{2j} = h_1 - \Delta H_j$ 。坑外和坑内土体(包括开挖土体和坑底土体)的渗透系数分别为 k_{v1} 和 k_{v2} ; 坑外和坑内土体回弹模量分别为 E_{r1} 和 E_{r2} , 并假定为常数; 坑内土体的饱和重度和有效重度分别为 γ_{sat2} 和 γ'_2 。

主动区和被动区在第 j 步开挖时的水头分别用 $L_{1j}(z, t)$ 和 $L_{2j}(z, t)$ 表示, 根据非稳定渗流理论^[7], 并采用太沙基一维固结理论的假设, 可得主动区和

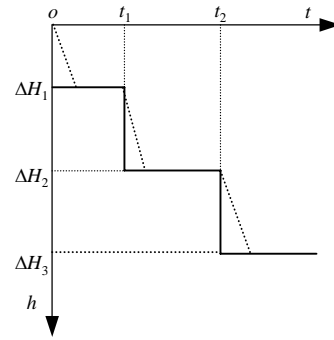


图 2 基坑开挖深度与时间关系图

Fig.2 Relation between excavated depth of foundation pit and time

被动区的水头控制方程分别为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L_{1j}(z, t)}{\partial t} &= c_{r1} \frac{\partial^2 L_{1j}(z, t)}{\partial z^2} \quad (0 \leq z \leq h_1) \\ \frac{\partial L_{2j}(z, t)}{\partial t} &= c_{r2} \frac{\partial^2 L_{2j}(z, t)}{\partial z^2} \quad (\Delta H_j \leq z \leq h_1) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: c_{ri} ($i=1, 2$) 为吸水膨胀系数。可表示为

$$c_{ri} = \frac{k_{vi} E_{ri}}{\gamma_w} = \frac{k_{vi}}{m_{ri} \gamma_w} \quad (i=1, 2) \quad (2a)$$

$$m_{ri} = \frac{1}{E_{ri}} \quad (i=1, 2) \quad (2b)$$

式中: m_{ri} ($i=1, 2$) 为体积回弹系数。

坑内外地下水渗流在地下墙底部处连续^[4], 所以式(1)的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} L_{1j}(0, t) &= 0 \\ L_{2j}(\Delta H_j, t) &= -\Delta H_j \\ L_{1j}(h_1, t) &= L_{2j}(h_1, t) \\ k_{v1} \frac{\partial L_{1j}(h_1, t)}{\partial z} &= -k_{v2} \frac{\partial L_{2j}(h_1, t)}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于基坑工程渗流场的复杂性, 故式(1)的初始条件很难准确确定。已有研究结果^[4]表明, 坑内外水头差诱发的渗流在地下墙底部处连续, 故在水头差作用下的水头初始条件为

$$\left. \begin{aligned} L_{1j}(z, t_{j-1}) &= -k_{v2} \Delta H_j z / (k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1) \\ L_{2j}(z, t_{j-1}) &= -\Delta H_j + \frac{k_{v1} \Delta H_j (z - \Delta H_j)}{k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于开挖卸载引起的超静孔压, 在坑底被动区, 包括本步开挖土体对坑底的有效作用力和前一步开

挖卸载引起但尚未消散的超静孔压；而在坑外主动区，考虑到地表超静孔压为 0 及地下墙底部处坑内外的渗流连续，近似假设坑外超静孔压由地下墙底部到地表为线性分布。故由开挖卸载引起的坑内外水头初始条件为

$$\left. \begin{aligned} L_{1j}(z, t_{j-1}) &= -\frac{\gamma'_2 \Delta h_j z}{\gamma_w h_1} + L_{1j-1}(z, t_{j-1}) + \\ &\quad \frac{k_{v2} \Delta H_{j-1} z}{k_{v1} h_{2j-1} + k_{v2} h_1} \\ L_{2j}(z, t_{j-1}) &= -\gamma'_2 \Delta h_j / \gamma_w + L_{2j-1}(z, t_{j-1}) + \\ &\quad \Delta H_{j-1} - \frac{k_{v1} \Delta H_{j-1} (z - \Delta H_{j-1})}{k_{v1} h_{2j-1} + k_{v2} h_1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(1)的初始条件包括坑内外水头差诱发的渗流和开挖卸载引起的超静孔压。根据式(4)和(5)，可得其初始条件为

$$\left. \begin{aligned} L_{1j}(z, t_{j-1}) &= -\frac{\gamma'_2 \Delta h_j z}{\gamma_w h_1} + L_{1j-1}(z, t_{j-1}) + \\ &\quad \frac{k_{v2} \Delta H_{j-1} z}{k_{v1} h_{2j-1} + k_{v2} h_1} - \frac{k_{v2} \Delta H_j z}{k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1} \\ L_{2j}(z, t_{j-1}) &= -\gamma'_2 \Delta h_j / \gamma_w + L_{2j-1}(z, t_{j-1}) + \\ &\quad \Delta H_{j-1} - \frac{k_{v1} \Delta H_{j-1} (z - \Delta H_{j-1})}{k_{v1} h_{2j-1} + k_{v2} h_1} - \\ &\quad \Delta H_j + \frac{k_{v1} \Delta H_j (z - \Delta H_j)}{k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

若为第一步开挖或单步开挖，则 $t_{j-1} = t_0 = 0$ ， $L_{10}(z, 0) = 0$ ， $L_{20}(z, 0) = 0$ ， $\Delta H_0 = 0$ 。

3 方程求解

根据式(3)和(6)尚不能对式(1)进行求解，需要对其边界条件进行齐次化，令

$$\begin{aligned} L_{1j}(z, t) &= l_{1j}(z, t) - \frac{k_{v2} \Delta H_j}{k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1} z \quad (7) \\ L_{2j}(z, t) &= l_{2j}(z, t) - \Delta H_j + \\ &\quad \frac{k_{v1} \Delta H_j (z - \Delta H_j)}{k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1} \quad (8) \end{aligned}$$

显然， $l_{1j}(z, t)$ 和 $l_{2j}(z, t)$ 也满足式(1)，其对应的初始和边界条件分别为

$$\left. \begin{aligned} l_{1j}(z, t_{j-1}) &= -\gamma'_2 \Delta h_j z / (\gamma_w h_1) + l_{1j-1}(z, t_{j-1}) \\ l_{2j}(z, t_{j-1}) &= -\gamma'_2 \Delta h_j / \gamma_w + l_{2j-1}(z, t_{j-1}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} l_{1j}(0, t) &= 0 \\ l_{2j}(\Delta H_j, t) &= 0 \\ l_{1j}(h_1, t) &= l_{2j}(h_1, t) \\ k_{v1} \frac{\partial l_{1j}(h_1, t)}{\partial z} &= -k_{v2} \frac{\partial l_{2j}(h_1, t)}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据 $l_{1j}(z, t)$ 和 $l_{2j}(z, t)$ 满足的控制方程及其求解条件，可以把二者视作一个双层地基系统^[8~11]进行分析(见图 3)。

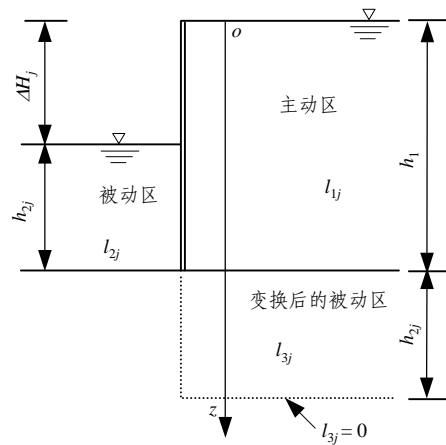


图3 渗流计算分析示意图
Fig.3 Sketch map of seepage analysis

记变换后的被动区水头为 $l_{3j}(z, t)$ ，则有

$$l_{2j}(z, t) = l_{3j}(2h_1 - z, t) \quad (11)$$

其对应的初始和边界条件分别为

$$\left. \begin{aligned} l_{1j}(z, t_{j-1}) &= -\gamma'_2 \Delta h_j z / (\gamma_w h_1) + l_{1j-1}(z, t_{j-1}) \\ l_{3j}(z, t_{j-1}) &= -\gamma'_2 \Delta h_j / \gamma_w + l_{3j-1}(z, t_{j-1}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} l_{1j}(0, t) &= 0 \\ l_{3j}(h_1 + h_{2j}, t) &= 0 \\ l_{1j}(h_1, t) &= l_{3j}(h_1, t) \\ k_{v1} \frac{\partial l_{1j}(h_1, t)}{\partial z} &= k_{v2} \frac{\partial l_{3j}(h_1, t)}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

因此， $l_{1j}(z, t)$ 和 $l_{3j}(z, t)$ 的计算公式分别为

$$l_{1j}(z, t) = \sum_{mj=1}^{\infty} B_{mj} \sin\left(\lambda_{mj} \frac{z}{h_1}\right) e^{-\beta_{mj}(t-t_{j-1})} \quad (14a)$$

$$l_{3j}(z, t) = \sum_{mj=1}^{\infty} A_{mj} B_{mj} \sin\left(\mu \lambda_{mj} \frac{h_1 + h_{2j} - z}{h_1}\right) e^{-\beta_{mj}(t-t_{j-1})} \quad (14b)$$

其中,

$$A_{mj} = \begin{cases} \frac{\sin \lambda_{mj}}{\sin(\mu c_j \lambda_{mj})} & (\sin(\mu c_j \lambda_{mj}) \neq 0) \\ -\frac{\cos \lambda_{mj}}{\mu K \cos(\mu c_j \lambda_{mj})} & (\sin(\mu c_j \lambda_{mj}) = 0) \end{cases} \quad (15a)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta_{mj} &= c_{t1} \lambda_{mj}^2 / h_1^2 \\ \mu &= \sqrt{c_{t1} / c_{t2}} = \sqrt{b/K} \\ K &= k_{v2} / k_{v1} \\ c_j &= h_{2j} / h_1 \\ b &= m_{t2} / m_{t1} \end{aligned} \right\} \quad (15b)$$

式中: λ_{mj} 为特征方程 $\mu K \sin \lambda_{mj} \cos(\mu c_j \lambda_{mj}) + \cos \lambda_{mj} \cdot \sin(\mu c_j \lambda_{mj}) = 0$ 的正根。

根据式(12)并考虑如下正交关系:

$$\int_0^{h_1} \sin(\lambda_{mj} z / h_1) \sin(\lambda_{nj} z / h_1) dz + b \int_{h_1}^{h_1+h_{2j}} A_{mj} A_{nj} \cdot \sin\left(\mu \lambda_{mj} \frac{h_1 + h_{2j} - z}{h_1}\right) \sin\left(\mu \lambda_{nj} \frac{h_1 + h_{2j} - z}{h_1}\right) dz = \begin{cases} 0 & (mj \neq nj) \\ \frac{h_1}{2} (1 + bc_j A_{mj}^2) & (mj = nj) \end{cases}$$

可得

$$B_{mj} = \frac{2(F + bG)}{h_1(1 + bc_j A_{mj}^2)} \quad (16)$$

其中,

$$F = \int_0^{h_1} \sin(\lambda_{mj} z / h_1) l_{1j}(z, t_{j-1}) dz$$

$$G = \int_{h_1}^{h_1+h_{2j}} A_{mj} \sin\left(\mu \lambda_{mj} \frac{h_1 + h_{2j} - z}{h_1}\right) l_{3j}(z, t_{j-1}) dz$$

为了书写方便, 在 F 和 G 的计算表达式中第 $j-1$ 步的下标用 J 表示。

(1) 当 $j=1$ 时, 有

$$F + bG = -\frac{\gamma'_2 \Delta H_1 h_1 (\sin \lambda_{m1} + \mu K A_{m1} \lambda_{m1})}{\gamma_w \lambda_{m1}^2}$$

(2) 当 $j>1$ 时, 若 $\lambda_{mj} = \lambda_{mj}$, 有

$$F = \gamma'_2 \Delta h_j h_1 (\lambda_{mj} \cos \lambda_{mj} - \sin \lambda_{mj}) / (\gamma_w \lambda_{mj}^2) + \frac{h_1}{2} \sum_{mJ=1}^{\infty} B_{mJ} [1 - \sin(2\lambda_{mJ}) / (2\lambda_{mJ})]$$

$$G = \gamma'_2 \Delta h_j A_{mj} h_1 [\cos(\mu c_j \lambda_{mj}) - 1] / (\mu \gamma_w \lambda_{mj}) +$$

$$\frac{A_{mj}}{2} \sum_{mJ=1}^{\infty} A_{mJ} B_{mJ} \{h_{2j} \cos[\mu(c_j - c_J) \lambda_{mJ}] - h_1 \sin(\mu c_j \lambda_{mJ}) \cos(\mu c_J \lambda_{mJ}) / (\mu \lambda_{mJ})\}$$

若 $\lambda_{mJ} \neq \lambda_{mj}$, 有

$$F = \gamma'_2 \Delta h_j h_1 (\lambda_{mj} \cos \lambda_{mj} - \sin \lambda_{mj}) / (\gamma_w \lambda_{mj}^2) +$$

$$\frac{h_1}{2} \sum_{mJ=1}^{\infty} B_{mJ} \left[\frac{\sin(\lambda_{mJ} - \lambda_{mj})}{\lambda_{mJ} - \lambda_{mj}} - \frac{\sin(\lambda_{mJ} + \lambda_{mj})}{\lambda_{mJ} + \lambda_{mj}} \right]$$

$$G = \gamma'_2 \Delta h_j A_{mj} h_1 [\cos(\mu c_j \lambda_{mj}) - 1] / (\mu \gamma_w \lambda_{mj}) +$$

$$\frac{A_{mj} h_1}{\mu} \sum_{mJ=1}^{\infty} \frac{A_{mJ} B_{mJ}}{(\lambda_{mj}^2 - \lambda_{mJ}^2)} \{ \lambda_{mj} \sin[\mu(c_j - c_J) \lambda_{mJ}] + \lambda_{mJ} \cos(\mu c_J \lambda_{mJ}) \sin(\mu c_j \lambda_{mj}) - \lambda_{mj} \sin(\mu c_J \lambda_{mJ}) \cos(\mu c_j \lambda_{mj}) \}$$

根据式(11)和(14b), 可得

$$l_{2j}(z, t) = \sum_{mj=1}^{\infty} A_{mj} B_{mj} \sin\left(\mu \lambda_{mj} \frac{z - \Delta H_j}{h_1}\right) e^{-\beta_{mj}(t-t_{j-1})} \quad (17)$$

结合式(7), (8), (14a)和(17), 可得

$$L_{1j}(z, t) = \sum_{mj=1}^{\infty} B_{mj} \sin\left(\lambda_{mj} \frac{z}{h_1}\right) e^{-\beta_{mj}(t-t_{j-1})} - k_{v2} \Delta H_j z / (k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1) \quad (0 \leq z \leq h_1) \quad (18a)$$

$$L_{2j}(z, t) = \sum_{mj=1}^{\infty} A_{mj} B_{mj} \sin\left(\mu \lambda_{mj} \frac{z - \Delta H_j}{h_1}\right) e^{-\beta_{mj}(t-t_{j-1})} - \Delta H_j + k_{v1} \Delta H_j (z - \Delta H_j) / (k_{v1} h_{2j} + k_{v2} h_1) \quad (\Delta H_j \leq z \leq h_1) \quad (18b)$$

4 基坑坑底回弹变形计算

基坑开挖卸载引起的超静孔压和坑内外水头差诱发的渗流共同作用使得坑底竖向有效应力减小,进而引起坑底的回弹变形。基坑坑底回弹变形的大小是判断基坑稳定性的一个重要指标,对坑底回弹变形的准确计算,不仅可以确定坑底回弹变形量和基础底部标高,而且可以了解施工开挖引起的地基扰动及变化情况,从而为建筑物兴建后引起的再压缩计算提供重要依据。

根据式(18b),可得第 j 步开挖后坑底被动区孔隙水压力为

$$p_{wpj}(z, t) = \gamma_w(z - \Delta H_j) + \gamma_w[L_{2j}(z, t) + \Delta H_j] \tag{19}$$

根据太沙基有效应力原理,任一时间坑底的有效应力为

$$\sigma'_{2j}(z, t) = \sigma_2 - p_{wpj}(z, t) = \gamma'_2(z - \Delta H_j) - \gamma_w[L_{2j}(z, t) + \Delta H_j] \tag{20}$$

第 j 步刚开挖完成时($t = t_{j-1}$)的坑底有效应力为

$$\begin{aligned} \sigma'_{2j}(z, t_{j-1}) &= \sigma_2 - p_{wpj}(z, t_{j-1}) = \\ &= \sigma_2 - \gamma_w(z - \Delta H_j) - \gamma_w[L_{2j}(z, t_{j-1}) + \Delta H_j] = \\ &= \gamma'_2(z - \Delta H_j) - \gamma_w[L_{2j}(z, t_{j-1}) + \Delta H_j] \end{aligned} \tag{21}$$

第 j 步开挖后坑底土体中的有效应力增量为

$$\begin{aligned} \Delta\sigma'_{2j}(z, t) &= \sigma'_{2j}(z, t) - \sigma'_{2j}(z, t_{j-1}) = \\ &= \{\gamma'_2(z - \Delta H_j) - \gamma_w[L_{2j}(z, t) + \Delta H_j]\} - \\ &= \{\gamma'_2(z - \Delta H_j) - \gamma_w[L_{2j}(z, t_{j-1}) + \Delta H_j]\} - \\ &= \gamma_w[L_{2j}(z, t_{j-1}) - L_{2j}(z, t)] \end{aligned} \tag{22}$$

因此,第 j 步开挖后坑底的回弹变形计算公式为

$$\begin{aligned} S_j(t) &= \int_{\Delta H_n}^{h_1} \frac{\Delta\sigma'_{2j}(z, t)}{E_{r2}} dz + S_{j-1}(t_{j-1}) = \\ &= -\frac{\gamma'_2 h_{2n} \Delta H_j}{E_{r2}} + \frac{\gamma_w h_1}{\mu E_{r2}} \sum_{mj=1}^{\infty} \frac{A_{mj} B_{mj}}{\lambda_{mj}} [\cos(\mu c_j \lambda_{mj}) - 1] - \end{aligned}$$

$$\cos(\mu c_j \lambda_{mj} - \mu c_n \lambda_{mj})] e^{-\beta_{mj}(t-t_{j-1})} \tag{23}$$

全部开挖完成后的坑底回弹变形计算公式为

$$\begin{aligned} S_n(t) &= -\gamma'_2 h_{2n} \Delta H_n / E_{r2} + \gamma_w h_1 / (\mu E_{r2}) \cdot \\ &= \sum_{mn=1}^{\infty} \frac{A_{mn} B_{mn}}{\lambda_{mn}} [\cos(\mu c_n \lambda_{mn}) - 1] e^{-\beta_{mn}(t-t_{n-1})} \end{aligned} \tag{24}$$

若为单步开挖,则 $n = 1, t_{n-1} = 0, S_1(t) = S_n(t)$ 。

当土体的渗透系数较大时,开挖卸载引起的超静孔压消散很快,坑底回弹变形的时间效应很不明显,此时坑底回弹变形的计算公式可以进一步简化。

需要说明的是,式(23)和(24)计算所得的坑底回弹变形指的是基坑最终开挖完成后坑底处的回弹变形,主要是为了方便统一对比。

5 算例分析

给定一基坑工程,坑内外土体均为淤泥质粉质黏土,饱和重度均为 18.7 kN/m^3 ,回弹模量均为 7.2 MPa ,竖向渗透系数也均为 $8.7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。基坑分两步开挖,开挖深度分别为 3 和 5 m ,地下墙插入坑底以下深度为 8 m 。基坑每步开挖后坑内外地下水位面分别在坑底开挖面处和坑外地表处,并假设保持不变,每步的开挖时间叠加到该步施工间歇时间后的总施工间歇时间分别为 15 和 45 d 。

图 4 为坑底水头随时间变化图。第 1 步开挖的深度较浅,卸载产生的超静孔压和坑内外水头差诱发的渗流都较小,所以在第一步开挖后坑底的水头较小,并且由于施工间歇时间较短,在施工间歇结束时还远未达到稳定渗流状态。第 2 步开挖的深度较大,并且第 1 步开挖后坑底的水头还远没消散至稳定状态,所以坑底的水头较大;随着基坑开挖后暴露时间的增加,坑底的水头逐渐趋近于稳定渗流状态。图 5, 6 分别为坑底孔压和有效应力随时间变化图。随着开挖后暴露时间的增加,坑底孔压逐渐增加,并趋向于稳定渗流状态,所以引起坑底有效应力逐渐减小,进而引起坑底土体的回弹变形。当不考虑渗流作用影响时,将无法反映坑底孔压和有效应力随时间的变化过程。

图 7 为坑底回弹变形随时间变化图。由于第 1 步的开挖深度较浅,所以坑底的回弹变形较小;而第 2 步的开挖深度较大,开挖卸载和坑内外水头差

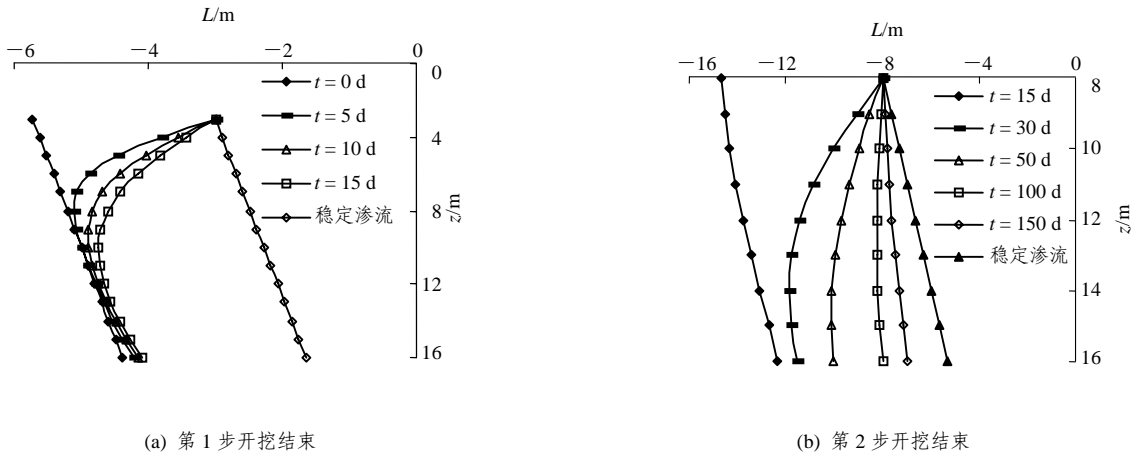


图 4 坑底水头随时间变化图

Fig.4 Variations of water heads beneath pit base with time

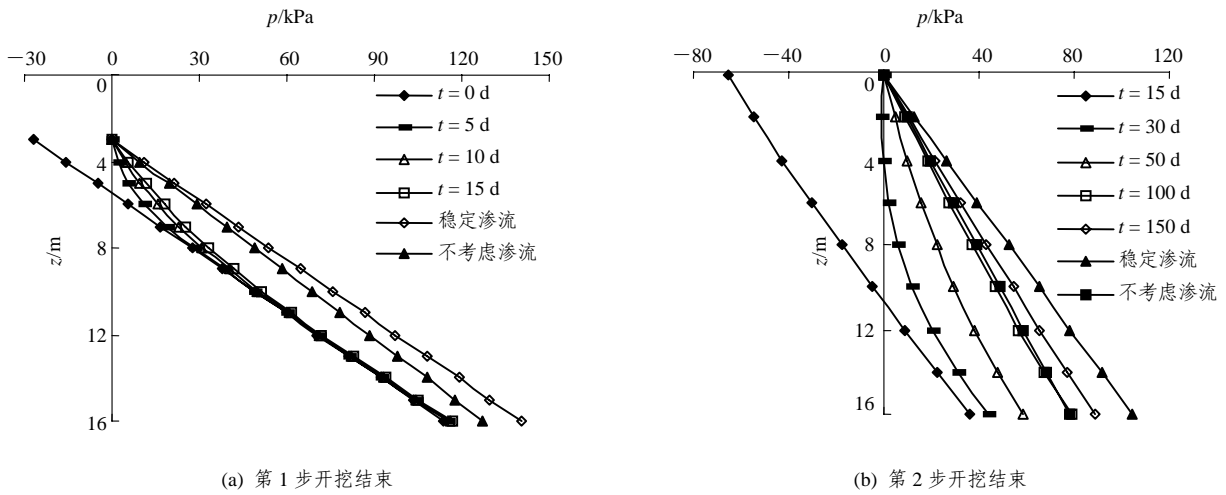


图 5 坑底孔隙水压力随时间变化图

Fig.5 Variations of pore water pressures beneath pit base with time

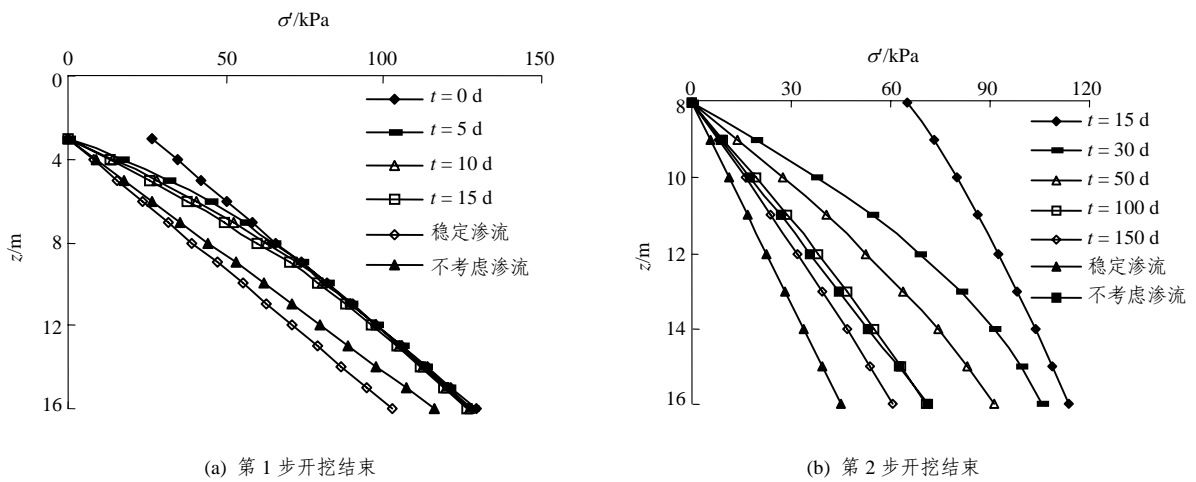


图 6 坑底有效应力随时间变化图

Fig.6 Variations of soil effective vertical stresses beneath pit base with time

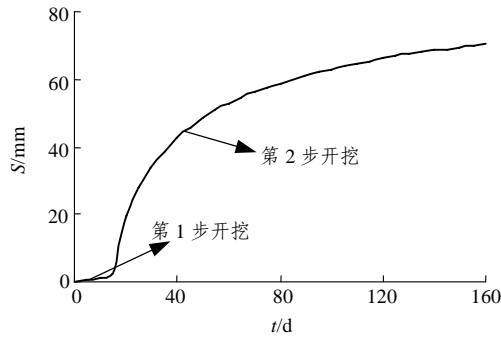


图7 坑底回弹变形随时间变化图

Fig.7 Variations of pit base heave with time

诱发的渗流作用也更大, 所以该步开挖下的坑底回弹变形较大, 并且随着施工间歇时间的增加逐渐趋于稳定。

6 结 论

开挖卸荷引起的超静孔压(非稳定渗流)和坑内外水头差诱发的渗流使得基坑工程中的地下水渗流场分布非常复杂, 本文基于非稳定渗流理论对大面积开挖基坑且支护结构刚度较大情况下的坑内外水头分布进行了分析, 并推导出了分步开挖时水头的计算公式, 在此基础上研究了坑底孔压、有效应力以及回弹变形随时间的变化关系, 对于基坑工程实践有一定的指导意义。

然而, 本文的研究工作是基于一维非稳定渗流理论基础之上的, 这仅近似于基坑支护墙体水平位移很小且是大面积开挖的情况; 对于坑底的回弹变形计算, 则忽略了支护墙体以下深度范围内土体的回弹影响。当基坑支护墙体水平位移较大或者基坑开挖面积较小时, 坑内外地下水渗流更加复杂, 同时坑底土体还受到支护墙体的挤压作用, 坑底土体的回弹变形计算将更加复杂。对于基坑工程中复杂的二维及三维情况, 还有待进一步深入研究。

参考文献(References):

[1] 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 Guangxin, LIU Zaoyun, WEN Qingbo. Influence of seepage on water and earth pressure in foundation pit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (5): 75 - 80.(in Chinese))

[2] 唐业清, 李启明, 崔江余. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(TANG Yeqing, LI Qiming, CUI Jiangyu. Analysis and treatment of excavation engineering collapse[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[3] 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 Xiaojun, GONG Xiaonan. Calculation of earth pressure on excavation considering pore water pressure[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(4): 58 - 62.(in Chinese))

[4] 李玉岐, 周健, 谢康和. 渗流作用对基坑坑底回弹变形的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1749 - 1752.(LI Yuqi, ZHOU Jian, XIE Kanghe. Influence of seepage on heave of foundation pit base during excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1749 - 1752.(in Chinese))

[5] 何世秀, 胡其志, 庄心善. 渗流对基坑周边沉降的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1551 - 1554.(HE Shixiu, HU Qizhi, ZHUANG Xinshan. Influence of seepage on ground settlement of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1551 - 1554.(in Chinese))

[6] 李玉岐, 周健, 谢康和. 基坑开挖卸载诱发的渗流分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1259 - 1262.(LI Yuqi, ZHOU Jian, XIE Kanghe. Analysis of seepage induced by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1259 - 1262.(in Chinese))

[7] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(MAO Changxi. Seepage computation analysis and control[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))

[8] 谢康和. 双层地基一维固结理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 24 - 35.(XIE Kanghe. Theory of one-dimensional consolidation of double-layered ground and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 24 - 35.(in Chinese))

[9] SCHIFFMAN R L, STEIN J R. One-dimensional consolidation of layered systems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1970, 96(4): 1499 - 1504.

[10] XIE K H, XIE X Y, JIANG W. A study on one-dimensional nonlinear consolidation of double-layered soil[J]. Computer and Geotechnics, 2002, 29(2): 151 - 168.

[11] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.(SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000.(in Chinese))