

# 基坑降水引起的地基应力变化分析

李 忠, 刘勇文

(黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004)

**摘 要:** 基坑降水对周围地表沉降的破坏已引起广泛关注, 传统计算地表沉降的方法是基于总应力不变的观点, 计算有效应力增量, 且忽略由渗流引起的有效应力增量, 结果误差较大。鉴于此, 研究了在总应力变化时和考虑渗流作用下, 计算土层中有效应力增量的公式, 以便满足降水引起的基坑周围地表沉降的计算要求。

**关键词:** 基坑降水; 地表沉降; 一维渗流; 有效应力增量

中图分类号: TV554.16

文献标识码: A

文章编号: 1008-486X(2009)02-0034-03

## 0 引言

在基坑开挖过程中, 应力变化引起的地表沉降可能会引起周围建筑物开裂、倾斜、塌陷等事故, 如 1994 年 11 月 22 日, 由于威格大厦深基坑周围地面沉降而引起的汉口煤气大量泄漏事故<sup>[1]</sup>。引起基坑周围地基中应力变化的主要原因有: (1) 由于坑壁土被挖除, 改变了原场地土体的平衡条件, 导致应力发生变化; (2) 由于基坑降水, 导致水位下降, 引起有效应力的增加。由坑壁土被挖除引起的应力变化一般在基坑开挖深度的 2 倍范围内, 且在正常情况下土体侧移较小, 引起的地表沉降对附近建筑物的影响不大。由基坑降水引起的应力变化较大, 它引起的建筑物基础和周围地面沉降问题已成为城市建设中的重大环境灾害问题之一。因而, 本文主要考虑基坑降水引起的地基土中应力的变化。

## 1 应力分析

已有的降水引起的地基应力计算理论认为<sup>[2]</sup>, 降水前后总应力不变, 孔隙水压力的减少等于有效应力的增加。而实际上孔隙水压力的下降值和有效应力的增加量并非通常认为的简单相等关系, 在基坑的降水过程中, 总应力是变化的, 总应力增量是否为零, 需根据土壤含水层的性质而定。另外, 土是具有连续孔隙的介质, 水在压力作用下穿过土中孔隙发生流动的现象, 称为水的渗流。在基坑工程中, 降水除了会使坑外土体应力变化外, 水头差的存在也将引发水在土体中发生渗流, 从而也会使土中的应力发生变化<sup>[3]</sup>。

以下基于土的总应力发生改变和有渗流发生的情况, 举例分析降水后含水层中有效应力变化情况。

### 1.1 土层在渗流条件下的水头分析

如图 1 所示的基坑, 地下水为潜水, 共有 5 层土组成(土层 0、土层 1、土层 2、土层 3 和土层 4), 各土层厚度分别为  $h, h_1, h_2, h_3, h_4$ 。土层 0 的自然体积质量为  $\gamma$ , 土层 1、土层 2 的饱和体积质量分别为  $\gamma_{sat1}, \gamma_{sat2}$ , 浮体积质量分别为  $\gamma'_1, \gamma'_2$ , 持水体积质量分别为  $\gamma_{01}, \gamma_{02}$  (计算土体的持水体积质量可参考文献[4]), 土层 3、土层 4 的饱和体积质量分别为  $\gamma_{sat3}, \gamma_{sat4}$ , 渗透系数分别为  $K_1, K_2$ , 基坑被水区水位线以下假设为一层土, 即土层 4。

取距基坑边缘某一距离的竖向土体为研究对象, 进行分析研究。

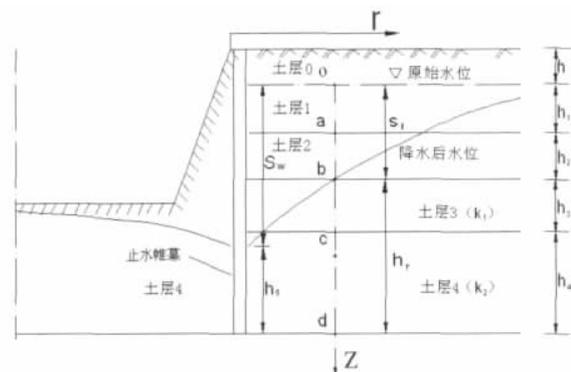


图 1 基坑土层应力分析图

Fig.1 Soil layer stress analysis of foundation pit

假设坑外土体在水头差的作用下发生一维渗流, 坑内外的水头差  $\Delta L$  为:  $\Delta L = h_r - h_w$

收稿日期: 2008-03-12

作者简介: 李忠 (1981-), 男, 河南新乡人, 助教, 硕士研究生, 主要从事岩土加固与处理教学及研究工作。

式中: $L$ 为坑内外的水头差, $m$ ;  $h_r$ 为坑内的水头, $m$ ;  $h_w$ 为坑外的水头, $m$ 。

用  $L(z)$  表示地下水位以下深度的总水头,以  $b$  点为坐标原点,由水力学原理可得,土层 3 和土层 4 中的总水头分别为

$$L_1=L_1(z)=-\frac{K_2\Delta L}{K_1(h_4+h_5)+K_2h_3}z \quad (z \leq h_3) \quad (1)$$

$$L_2=L_2(z)=-\frac{K_1\Delta L}{K_1(h_4+h_5)+K_2h_3}z + \frac{(K_1-K_2)h_3\Delta L}{K_1(h_4+h_5)+K_2h_3} \quad (h_3 \leq z \leq h_3+h_4) \quad (2)$$

当  $K_1=K_2$  时,上式转化为均质土中总水头的计算公式: $L(z)=-\frac{\Delta L}{h_3+h_4+h_5}z$ 。

表 1 降水前后土体中的应力变化量

Table 1 Stress change values of soil before and after rainfall

位置	总应力变化量 ( $\Delta\sigma$ )	孔隙水压力变化量 ( $\Delta u$ )	有效应力变化量 ( $\Delta\sigma'$ )
o	0	0	0
a	$(\gamma_{01}-\gamma_{sat})h_1$	$-\gamma_w H_1$	$(\gamma_{01}-\gamma_1)h_1$
b	$(\gamma_{01}-\gamma_{sat})h_1 + (\gamma_{02}-\gamma_{sat2})h_2$	$-\gamma_w H_2$	$(\gamma_{01}-\gamma_1)h_1 + (\gamma_{02}-\gamma_2)h_2$
c	$(\gamma_{01}-\gamma_{sat})h_1 + (\gamma_{02}-\gamma_{sat2})h_2$	$-\gamma_w H_2 + \gamma_w L_1(h_3)$	$(\gamma_{01}-\gamma_1)h_1 + (\gamma_{02}-\gamma_2)h_2 - L_1(h_3)$
d	$(\gamma_{01}-\gamma_{sat})h_1 + (\gamma_{02}-\gamma_{sat2})h_2$	$-\gamma_w H_2 + \gamma_w L_1(h_3+h_4)$	$(\gamma_{01}-\gamma_1)h_1 + (\gamma_{02}-\gamma_2)h_2 - L_2(h_3+h_4)$

注:(1)表中  $H_i = \sum_{j=1}^i h_j$  ( $n \leq 4$ ); (2)  $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ; (3)  $L_1, L_2$  分别按式(1)、(2)计算

从表 1 可以看出,降水后初始水位与人工水位之间的土体总应力变小( $\gamma_0 < \gamma_{sat}$ ),土体的孔隙水压力也同时变小;在人工水位以下,土体自身总应力相对于降水前不发生变化,土体的空隙水压力由于发生渗流而增大。总结上述分析结果可得,考虑总应力变化和渗流情况,土层的总应力变化量与有效应力增量的计算公式(在  $z$  方向上以  $O$  为坐标零点)为:

$z \leq H_1$  时:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_1 = (\gamma_{01} - \gamma_{sat1})z \\ \Delta\sigma_1' = (\gamma_{01} - \gamma_1)z \end{cases} \quad (4)$$

$H_1 \leq z \leq H_2$  时:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_2 = (\gamma_{01} - \gamma_{sat1})h_1 + (\gamma_{02} - \gamma_{sat2})(z - h_1) \\ \Delta\sigma_2' = (\gamma_{01} - \gamma_1)h_1 + (\gamma_{02} - \gamma_2)(z - h_1) \end{cases} \quad (5)$$

$H_2 \leq z \leq H_3$  时:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_3 = (\gamma_{01} - \gamma_{sat1})h_1 + (\gamma_{02} - \gamma_{sat2})h_2 \\ \Delta\sigma_3' = (\gamma_{01} - \gamma_1)h_1 + (\gamma_{02} - \gamma_2)h_2 - \gamma_w L_1(z - H_2) \end{cases}$$

$H_3 \leq z \leq H_4$  时:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_4 = (\gamma_{01} - \gamma_{sat1})h_1 + (\gamma_{02} - \gamma_{sat2})h_2 \\ \Delta\sigma_4' = (\gamma_{01} - \gamma_1)h_1 + (\gamma_{02} - \gamma_2)h_2 - \gamma_w L_2(z - H_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $H_i = \sum_{j=1}^i h_j$  ( $n \leq 4$ )

$L_1, L_2$  分别按式(1)、式(2)计算。

以上推导是在渗流和总应力变化情况下,两层土各层土体总应力变化量和有效应力增量的计算公

## 1.2 土层在渗流和总应力变化时的应力分析

选取图 1 中土  $o, a, b, c, d$  5 个特征点来研究,其中点  $o$  代表降水前后均在水位以上的土体单元;点  $a, b$  代表降水前在水位线以下、降水后在水位线以上的土体单元;点  $c, d$  代表降水前后均在水位线以下的土体单元。降水前,对  $o, a, b, c, d$  按常规方法计算各点应力;降水后,在  $o \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$  方向上,  $o \rightarrow a \rightarrow b$  段,为降水疏干区,降水后,土体应力计算所用土体的持水体积质量为  $\gamma_{01}, \gamma_{02}$ ,本区土体的总应力发生变化;在  $b \rightarrow c \rightarrow d$  段为渗流发生区,渗流引起的水头值将采用前述方法求取。降水前后各点应力的变化情况如表 1 所示。

式,对于成层情况更为复杂的土体,按本方法的计算过程划分土层,继续推导即可。对降水前承压、降水后无压的含水层,上述公式仍然适用。

## 2 应用案例分析

### 2.1 工程概况

该基坑工程简化图如图 2 所示,各土层的物理力学指标如表 2 所示。

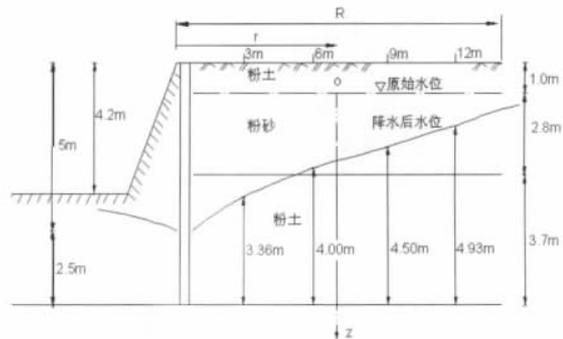


图 2 基坑降水示意图

Fig.2 Rainfall of foundation pit

表 2 土层物理力学性质

Table 2 Soil layer physical mechanics property

编号	土层	厚度 /m	体积质量 /kg/m <sup>3</sup>	渗透系数 /m/d	含水量 /%	孔隙比
1	粉土	1.0	1.89	0.375	20.3	0.720
2	粉砂	2.8	1.97	2.01	17.3	0.731
3	粉土	3.7	1.94	0.542	23.4	0.769

2.2 应力计算

假设土体只在重力方向上发生一维渗流,现考虑总应力变化和渗流条件下距基坑边缘 3 m、6 m、9 m、12 m 的有效应力变化情况,计算深度分别为 1.5 m、2.8 m、4.5 m 和 6.5 m(从初始水位算起)。计算结果如图 2 所示。

由表 2 的各土层的物理力学性质指标,可计算第二、三层土的持水体积质量分别为:1.93kg/m<sup>3</sup>和 1.89kg/m<sup>3</sup>。按常规方法,基于渗流与总应力变化的条件下分别计算各深度处的应力值,其计算结果如图 3 所示(以初始水位为计算零点)。

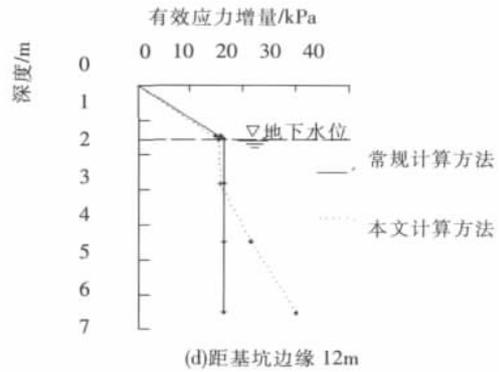
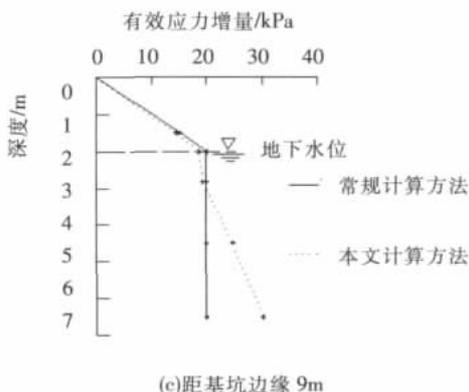
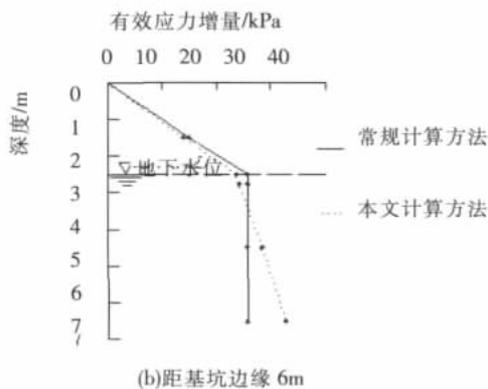
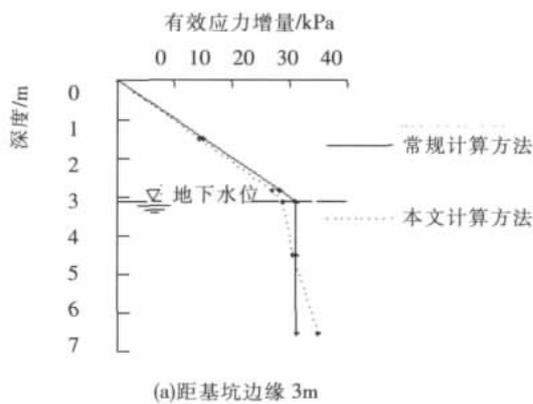


图 3 距基坑边缘 3m、6m、9m、12m 处土层的有效应力变化值

Fig.3 Effective stress change values of 4 soil layers of which distance far from the edge of foundation pit are 3m, 6m, 9m and 12m

由计算过程和图示分析可以看出:

- (1) 基坑降水后,在人工水位与初始水位之间,基坑周边土体的总应力变小,且距基坑越近(即水位下降越大),总应力减小量越大,反之越小。
- (2) 由渗流产生的有效应力增量除了与土层的厚度和渗透系数有关外,还随着基坑内外水头差的增大而逐渐增大。
- (3) 在人工水位以上,按本文计算的有效应力增量小于按常规方法计算的有效应力增量,而在人工水位以下,由本文计算的有效应力增量逐渐大于按常规方法计算的有效应力增量。
- (4) 常规计算的有效应力增量在人工水位以上逐渐增大,在人工水位以下不发生变化;而由于渗流的原因基于渗流和总应力变化条件计算的有效应力增量逐渐增大。

3 结语

对降水引起的地基应力变化的分析表明,在人工水位与初始水位之间,降水引起地基的总应力减小;在人工水位以下,渗流也会引起有效应力的增加。因此,在分析降水引起的环境效应时,应综合考虑渗流和总应力的变化。

参考文献:

- [1] 李相然,岳同助. 城市地下工程实用技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2000.
- [2] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论 [M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 谢康和. 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(3)
- [4] 张莲花. 基坑降水引起的沉降变形时空规律及降水控制研究[D]. 成都:成都理工学院,2001.

[责任编辑 杨明庆]

(下转 45 页)

由图3可以看出,碰撞速度随着被撞人质心高度的增大而减小,被撞人质心高度从1.00增加到1.05,增大了5%,而相应的碰撞速度从43.77减小到43.60,减小了0.39%。

#### 4 结论

在汽车碰撞行人事故车速鉴定及分析中,正确选择取证的项目、手段或方法,达到取证的要求,从而获得可靠的证据,是推断与确认事故发生过程、发生原因的关键,也是交通事故速度技术鉴定的关键。而有效的速度计算则需要尽可能精确、及时采集的现场痕迹信息作为支持。

计算事故车辆车速时,碰撞点与人体最后停止位置之间的距离对速度计算结果影响最大,人体与地面的摩擦系数次之,行人质心高度的影响最小<sup>[4]</sup>。

根据以上分析,在事故现场应精确测量碰撞点与人体最后停止位置之间的距离,人体与地面的摩擦系数的测量精度次之,行人质心高度的精度可适当降低。

#### 参考文献:

- [1] 沈文君. 汽车碰撞事故模拟和分析方法的研究[D]. 北京:清华大学,1994.
- [2] 许洪国. 汽车交通事故碰撞速度多值问题的研究[J]. 中国公路学报,1996,9(1):87-93.
- [3] 刘希柏. 关于行人交通事故的研究[J]. 汽车运输研究,1996(1):84.
- [4] 于旭光,黄世霖. 汽车碰撞过程中人体响应的研究[J]. 汽车工程,1992,14(3):129-137.

[责任编辑 杨明庆]

(上接 36 页)

### Analysis on Foundation Stress Changes Caused by Foundation Pit Dewatering

LI Zhong, LIU Yong-wen

(Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, Henan, China)

**Abstract:** The destroy of surrounding ground settlement caused by foundation pit dewatering has attracted wide attention. The traditional calculation method of ground settlement was based on the view of unchangeable total stress. Calculating the increment of effective stress and neglecting the increment of effective stress caused by seepage will easily cause the big error. So, based on the condition of changeable total stress and seepage, this paper gives out the calculation formula of soil layer increment of effective stress to meet the calculation requirement of surrounding ground settlement caused by foundation pit dewatering.

**Key words:** foundation pit dewatering; ground settlement; one-dimensional seepage; increment of effective stress