

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.006



# 基坑开挖及降水对坑外地表沉降的影响

张世民<sup>1</sup>, 景峰卫<sup>2,3</sup>, 黄英省<sup>1</sup>, 孙苗苗<sup>1</sup>

(1. 浙江大学城市学院 工程学院, 杭州 310015; 2. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001;  
3. 宏润建设集团有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要:**考虑降水、支护结构变形以及基坑隆起3个因素引起的基坑周围土体的沉降,根据降水引起土体沉降的机理,运用修正的分层总和法单独计算出由降水引起的周围土体沉降。通过研究基坑开挖引起坑外土体沉降的规律,推导出由基坑开挖引起的坑外土体沉降理论公式。把降水引起的沉降及基坑开挖引起的沉降进行叠加,加入修正系数,最终以简化的理论公式合理地计算出基坑周围土体沉降。具体工程验证表明,推导的理论解析解与实测数据十分接近,能有效预估基坑周围土体沉降,为施工方案编制提供可靠的理论依据,最大限度减少基坑施工对周围环境的影响。

**关键词:**土体沉降;降水;支护结构变形;基坑底部隆起;解析解

**中图分类号:** TU46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2016)05-0043-06

## The influence of foundation pit excavation and dewatering to ground surface settlement

Zhang Shimin<sup>1</sup>, Jing Fengwei<sup>2,3</sup>, Huang Yingsheng<sup>1</sup>, Sun Miaomiao<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, P. R. China;  
2. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001 Anhui, P. R. China;  
3. Hongrun Construction Group Co., Ltd, Ningbo. 315000, Zhejiang P. R. China)

**Abstract:** Settlement of soil around the foundation pit caused by dewatering, deformation of retaining structure and foundation pit uplift are considered to be the three factors causing ground surface settlement. Using layer-wise summation method to calculate the settlement of surrounding soils caused by dewatering according to the soil settlement mechanism of dewatering. By studying the law of the settlement of the soil caused by the foundation pit excavation, the theoretical formula for the settlement of the soil caused by the foundation pit excavation is deduced. Add up the subsidence caused by the foundation pit precipitation and the settlement caused by the excavation of foundation pit, and revise the results with Modified coefficient, eventually the settlement of soil around the foundation pit is reasonably calculated by the simplified theoretical formula. Through specific engineering verification shows that the derived theory

**收稿日期:** 2015-11-23

**基金项目:** 杭州市科学技术委员会项目(20160533B95); 浙江省住建厅项目(2015K60); 浙江大学城市学院教师基金项目(J-15017)

**作者简介:** 张世民(1974-), 男, 教授, 主要从事基坑工程研究工作, (E-mail) zhangsm@zucc.edu.cn。

**Received:** 2015-11-23

**Foundation item:** Funds for Hangzhou Science and Technology Committee (No. 20160533B95); Zhejiang Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development(2015K60); Teacher Fund of Zhejiang University City College(J-15017)

**Author brief:** Zhang Shimin (1974-), professor, main research interest: foundation pit engineering, (E-mail) zhangsm@zucc.edu.cn.

analytical solution is very close to the measured data, the derived theory analytical solution can effectively predict the soil settlement around the foundation pit, thereby this will provides the reliable theory basis for the main body of the construction scheme, to reduce as much as possible the effect on the surrounding environment.

**Keywords:** soil settlement; dewatering; deformation of retaining structure; foundation pit uplift; analytic solution

中国资源正逐步集中于密集的城市地区,在繁华地带土体资源出现了紧缺的局面,使得基坑工程周围的施工工况更加复杂,因此,对基坑开挖引起的周围环境的影响的研究更加紧迫。土体开挖对周围环境的影响主要体现在基坑外土体的移动以及土体的不均匀沉降。Migliazza 等<sup>[1]</sup>利用分析和经验公式,并通过建立三维有限元模型,分析隧道在不同开挖阶段及支护阶段由开挖引起的地表沉降。Gordon 等<sup>[2]</sup>提出了一种预测支护墙体最大挠度及最大地表沉降的半经验模型,研究表明,该模型可以准确地预测在软黏土地区由于支护开挖引起的支护墙体最大挠度及地表沉降。Hsieh 等<sup>[3]</sup>提出了 2 种沉降剖面模型,并通过实际案例对比验证,研究表明可以通过沉降剖面曲线预测沉降的近似值。李琳等<sup>[4]</sup>利用分层总和法求出由降水引起的地面沉降,同时在经验假设的基础上,利用剪切-位移关系求出由于围护结构对地面沉降的约束作用产生的沉降,把这两者叠加作为总的地面沉降。李琳等<sup>[5]</sup>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的求解方法。王卫东等<sup>[6]</sup>根据上海地区大量工程实测数据提出了地表沉降曲线的预估方法并验证了其合理性,提出了预估基坑开挖引起的建筑物附加变形的计算方法。目前,大部分学者对基坑施工引起周围土体不均匀沉降主要集中在考虑单一因素,但工程实际中周围土体的沉降主要由降水、支护结构变形等其他因素共同引起的,只有把几个重要因素结合起来考虑才能更能有效地反映出实际。施成华等<sup>[7]</sup>推导出了一种考虑渗流作用的基坑降水地表沉降计算公式,利用叠加原理最终得出由开挖和降水引起的地表沉降分布计算公式。本文综合考虑了降水、支护结构变形与基坑底部隆起这 3 个因素对周围土体沉降的影响,利用降水漏斗曲线来对土体进行分层沉降计算,然后叠加算出由于降水引起的土体沉降,根据支护结构的刚度和类型,推导出由于支护结构变形和坑底隆起两者共同引起的土体沉降,最终把由于降水和支护结构变形及其坑底隆

起引起的土体沉降叠加修正后,得出基坑周围土体沉降的理论解析解。

# 1 基坑降水引起坑外土体的沉降计算

## 1.1 降水前后土体有效应力的变化

降水前,地下水位以下土体是一种由固体土颗粒和液体孔隙水组成的两相介质,土体所受到的力由固体土颗粒和孔隙水共同承担,土体所受的应力为土体有效自重  $\gamma'$  在土体中引起的应力。当土体内的水由于降水被疏干后,孔隙水压力便发生转移、消散,土体所受的应力为土体天然重度  $\gamma$  在土体中引起的应力,土体所承担的应力将增大,即有效应力增加。在浅部土层中进行疏干降水,基坑周围含水层的水不断流向基坑,经过一段时间之后,在基坑周围形成漏斗状的弯曲水面,即所谓的“降水漏斗”曲线<sup>[7]</sup>。如图 1,假设地基降水前地下水位于地表下  $h$  处,降水达到稳定状态后,地下水降至  $h_0$  处。设在  $h_0$  处一微单元  $dx dz$ ,微单元所受应力为

$$p = \gamma h + \gamma'(h_0 - h) \tag{1}$$

式中:  $\gamma$  为土体天然重度,  $\gamma'$  为土体有效重度。

降水后,  $h_0$  处的水被疏干,空隙水压力分散给土体颗粒承担,土体受到的应力为  $p' = \gamma h_0$ , 则土体在降水后有效应力增量为

$$\Delta p_1 = p' - p = (\gamma - \gamma')(h_0 - h) = \gamma_w (h_0 - h) \tag{2}$$

式中:  $\gamma_w$  为水的重度。

$f(x)$  为降水漏斗曲线。

$$f(x) = H_w - \left\{ h_w^2 + \frac{[(H_w - h)^2 - h_w^2] \ln(x/r_w)}{\ln(R/r_w)} \right\}^{0.5} \tag{3}$$

式中:  $R$  为图 2 中所示漏斗曲线与原水位线的交点,即抽水影响半径;  $h$  为原地下水位至地表的距离;  $h_w$  为降水井中水面距离基坑底部的距离;  $r_w$  为降水井的半径;  $H_w$  为基坑外原地面至降水井水面的距离。

上述降水漏斗曲线方程中的  $x$  是距离降水井中轴线的距离,在计算降水引起的土体沉降时,坐标轴

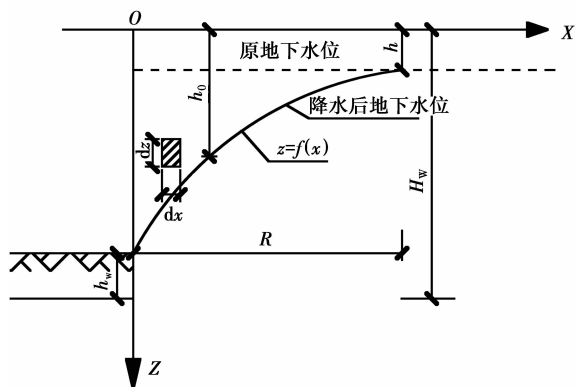


图 1 基坑周围土体降水示意图

Fig. 1 The sketch map of dewatering

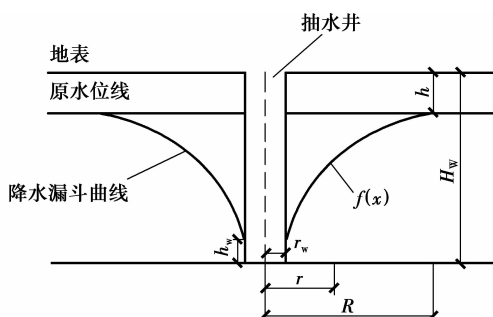


图 2 稳定潜水井降水漏斗曲线

Fig. 2 Draw down curve of steady unconfined aquifer well

一般建立在支护结构处或便于计算的点处,且坑外地下水位一般是控制性降水,坑外地下水不一定降低在基坑底部以下 0.5 m 以下,故在计算中需要对  $f(x)$  中的  $x$  进行修正。

$$f(x) = H_w -$$

$$\left\{ h_w^2 + \frac{[(H_w - h)^2 - h_w^2] \ln(x + x_0/r_w)}{\ln(R/r_w)} \right\}^{0.5} \quad (4)$$

式中:  $x_0$  为根据已知的实际坑外地下水位  $f(x)$ ,通过参数  $H_w$ 、 $h_w$ 、 $h$  反推算出的一个定值,其他符号意义同上。

## 1.2 降水引起的坑外土体沉降

基坑周围土体降水后,土体有效应力增加,由有效应力增加引起的沉降可以用式(5)计算

$$\Delta S_i = \frac{\Delta p \cdot \Delta h_i}{E_{si}} \quad (5)$$

式中:  $\Delta h_i$  为第  $i$  土层的厚度,  $E_{si}$  为第  $i$  土层土体的压缩模量。

如图 1 中微单元  $dx dz$  产生的微元压缩可表示为

$$ds_i = \frac{\Delta p_1 \cdot dz}{E_{si}} = \frac{\gamma_w(z-h)dz}{E_{si}} \quad (6)$$

采用分层总和法计算由降水引起的土体沉降,则在原地下水位与降水漏斗曲线之间的土体沉降为

$$\sum_{i=1}^m ds_i = \bar{\alpha}_i \sum_{i=1}^m \int_{Z_i}^{Z_i+h_i} \frac{\gamma_w(z-h)}{E_{si}} dz \quad (7)$$

式中:  $m$  为原地下水位与降水后地下水位之间的土层数;  $Z_i$  为第  $i$  层土顶部距离地表的深度;  $\bar{\alpha}_i$  为第  $i$  层土范围内平均附加应力系数,可查《建筑地基基础设计规范》。  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度。

降水漏斗曲线上部因降水而增加的平均竖向附加应力,本应为三角形分布形式,但为计算方便取其平均值并假设为矩形分布,则由于附加应力及其渗流作用引起降水曲线下的土体沉降量为

$$\sum_{l=m+1}^n ds_l = \sum_{l=m+1}^n \frac{1}{2} \cdot \bar{\alpha}_i \frac{\gamma_w(f(x)-h)}{E_{sl}} h_l \quad (8)$$

式中:  $n$  为原地下水位面至支护桩底面之间的总土层数。

综上所述,采用分层总和法计算由降水引起的基坑外部土体沉降,则距离坑边任意距离  $x$  处的由降水引起的基坑外土体沉降为

$$\Delta S_w = \psi_c \bar{\alpha}_i \left\{ \sum_{i=1}^m \int_{Z_i}^{Z_i+h_i} \frac{\gamma_w(z-h)}{E_{si}} dz + \sum_{i=m+1}^n \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_w(f(x)-h)}{E_{sl}} h_i \right\} \quad (9)$$

式中:  $\psi_c$  为沉降计算经验系数,根据地区沉降观测资料及经验确定,无地区经验时可采用《建筑地基基础设计规法》表 5.3.3 的数值;  $\bar{\alpha}_i$  为矩形均布荷载作用下地基中竖向应力分量的平均附加应力系数。

## 2 基坑开挖引起的坑外土体沉降

基坑开挖引起坑外土体沉降主要考虑 2 个因素:支护结构变形及基坑底部隆起。根据分析大量学者<sup>[8-12]</sup>对基坑外地表沉降的研究,对基坑开挖引起的坑外土体沉降计算公式采用

$$\delta_v(x, y) = \delta_{v \max} \cdot e^{-\pi \left( \frac{r-r_0}{A} \right)^2} \cdot (ay^2 + b) \quad (10)$$

$$A = \frac{L}{2} \left( 0.069 \ln \left( \frac{H}{L} \right) + 1.03 \right) \quad (11)$$

并作以下假设:

1) 基坑在沿支护结构纵向方向上,地表土体在理想状态下沉降曲线应按照支护结构中部截面对称。有学者曾假设纵向沉降曲线按照高斯曲线分布,但高斯分布曲线在距支护结构中部对称面一定距离后,收敛非常迅速,而实际沉降的收敛速度并没

有那么迅速,故假设纵向沉降曲线按照抛物线分布更符合实际沉降曲线,如图 3。

2)研究表明,基坑支护结构后土体横向沉降在距支护结构一定距离后,沉降曲线迅速收敛,基坑开挖对此处的土体沉降影响表现不再明显,故采用高斯函数来近似土体横向沉降曲线更加合乎土体实际沉降。

3)在大部分对基坑外地表沉降的研究中,均未考虑基坑底部隆起因素,得到的沉降曲线大部分是三角形,抛物线或分段直线函数。考虑到基坑底部隆起对坑外地表沉降也有影响,故采用横向高斯分布函数与纵向抛物线联合来计算由于基坑开挖和基坑底部隆起 2 个因素引起的坑外地表沉降,如图 3、4。

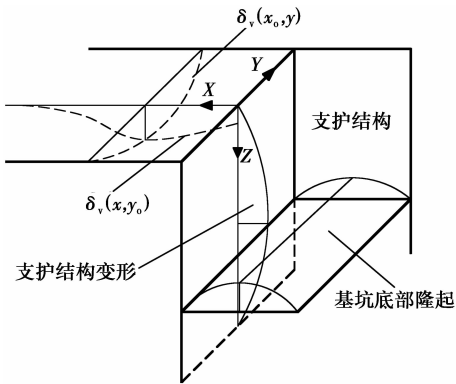


图 3 支护结构变形与基坑底部隆起三维示意图  
Fig. 3 The three dimensional sketch map of deformation of retaining structure and foundation pit uplift

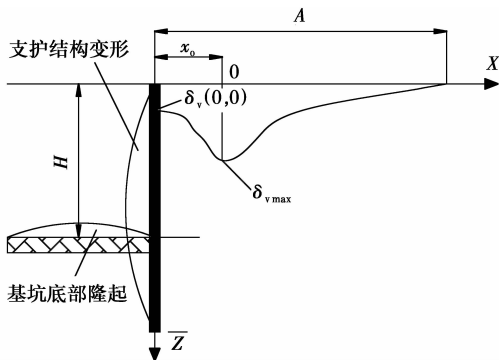


图 4 支护结构变形与基坑底部隆起剖面图  
Fig. 4 The cross-section of deformation of retaining structure and foundation pit uplift

4)考虑到由于基坑底部隆起,导致基坑开挖引起的沉降最大值出现在距支护结构一定距离的  $x_0$  处 ( $\delta_v(x_0, 0) = \delta_{v \max}$ ),故横向沉降曲线的假设运用

$$\frac{x - x_0}{A}$$

5)大量学者的研究表明<sup>[13-17]</sup>,在基坑支护边缘

处的土体沉降并不为 0,而是一个与最大沉降值  $\delta_{v \max}$  具有一定比例关系的一个范围值;

6)基坑具有很明显的空间效应,实际工程中支护结构的变形会出现,在支护结构中部变形最大,在基坑角部则变形比较微小,这就是边角效应。考虑到边角效应,在计算上述式子的未知系数  $a$ 、 $b$  时,假设一个边界条件,在基坑角部位于支护结构处土体沉降值为零,即

$$\delta_v \left( x = 0, y = \pm \frac{l}{2} \right) = 0$$

根据以上边界条件即可求得上述沉降式(10)的未知系数  $a$ 、 $b$

$$\begin{cases} a = -\frac{4}{l^2} \\ b = 1 \end{cases} \quad (12)$$

把以上系数代入式(10)即得围护结构背后地表沉降曲线的方程。

3 基坑周围土体沉降

基坑降水、支护结构变形及坑底隆起引起的沉降之间密不可分,基坑内外的水位压力差也会引起支护结构变形、基坑底部隆起,如果单独考虑各因素,把最后的沉降叠加则可能会引起沉降量叠加,故应对沉降和进行修正。因降水对支护结构变形和基坑隆起的影响主要是通过水位压力差引起的,故采用修正系数  $\eta$

$$\eta = 1 - \frac{h_{\text{降低水位}}}{h_{\text{水位差}}} \quad (13)$$

则计算基坑开挖引起土体沉降的理论公式为

$$\delta = \eta(\delta_v(x, y) + \Delta S_w) \quad (14)$$

4 计算实例及分析

某工程开挖深度 10.35~12.70 m,基坑为长方形,开挖面积约 55 m×35 m,根据“安全、经济、方便施工”的原则,基坑采用排桩(钻孔灌注桩)+两道钢筋砼对撑及角撑(外围三轴水泥搅拌桩止水)坑内外简易管井降水(坑外控制性降水)的围护形式。场地地下水类型上部属孔隙潜水,下部碎石混粘土中含孔隙承压水,实测潜水位埋深 0.70~1.40 m,坑内地下水位控制在坑底以下 0.5 m,基坑周边实施控制性降水,坑外水位控制在 4 m 以下。基坑土质条件一般,开挖深度影响范围内,基坑上部含有 5~6 m 的砂质粉土。

表 1 地基土物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of subsoils

土层编号	土层名称	土层厚度/m	天然重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	地基承载 力特征值 fa <sub>k</sub> /(kPa)	天然含水 量 ω/%	压缩模 量 E <sub>s</sub> /(MPa)	渗透系数×10 <sup>5</sup>	
							k <sub>h</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )	k <sub>v</sub> /(cm·s <sup>-1</sup> )
①-1	杂填土	0.30~2.60	18.2			2.5~5.0		
①-2	素填土	0.50~3.50	17.0			2.5~5.0		
②	砂质粉土	4.80~6.20	18.6	110~150	27.5	11~17	16.5	2.02
③	淤泥质粘土	0.30~7.10	17.3	70	43.3	3.5~5.0	0.205	0.185
④-1	含砾粉质粘土	1.20~3.20	19.5	170		6~12	6.2	7.0

基坑坑外地下水位控制在 4 m 以下,根据式 (13)可计算出修正系数  $\eta=0.747$ ,第  $i$  层土范围内平均附加应力系数 $\bar{\alpha}_i$ ,根据《建筑地基基础设计规范》附录 K 矩形面积上均布荷载作用下角点的平均附加应力系数 $\bar{\alpha}$ 取用。根据本基坑工程的支护条件可取最大沉降值  $\delta_{\text{amax}}$  为 0.1% $H$ ,则根据以上工程条件可以计算出最终的理论沉降曲线并与实测值进行对比分析,见表 2。

表 2 理论计算与实测对比

Table 2 The theoretical calculation compared with the measured

距支护结 构边缘距 离/m	降水引 起的沉 降/mm	基坑开挖 引起的沉 降/mm	修正后 的沉降 和/mm	实测 值/mm
0	12.1	9.5	16.2	18.3
1	10.4	10.6	15.6	16.9
2	9.1	11.4	15.3	14.6
4	7.2	12.5	14.7	15.7
6	5.8	12.6	13.7	10.2
8	4.8	11.6	12.2	8.7
10	3.9	9.7	10.2	6.5

如图 5 所示,根据计算结果可以分析得出以下结论:

1)基坑降水在支护结构边缘引起最大沉降,由基坑开挖引起的最大沉降发生在距支护结构边缘一定距离处。

2)两者沉降和修正后产生的最大沉降在本工程

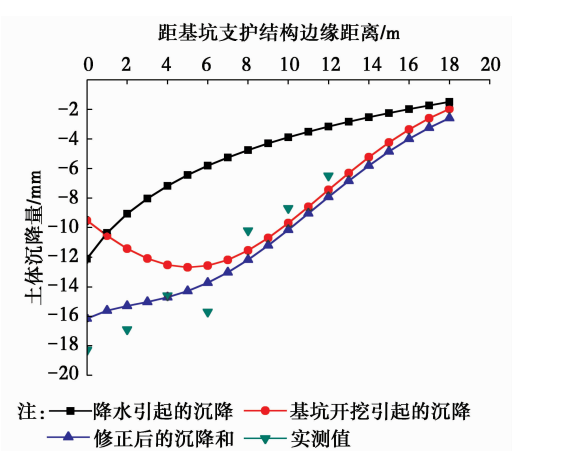


图 5 实测值与理论值对比图

Fig. 5 Comparison of data between calculation and measurement

中发生在基坑边缘,且产生的坑后沉降曲线近似三角。

3)工程的坑外降水深度比较浅,故坑外土体沉降主要受基坑开挖影响比较大。

4)实测数据与理论计算值非常接近,可以有效预测坑外土体沉降量。

5 结 论

分析了由降水引起的土体沉降的机理,采用修正的分层总和法计算由降水引起的土体沉降,合理地推算出由降水引起的坑外土体沉降计算公式。把支护结构变形和坑底隆起二者结合起来考虑,合理假设由二者引起的坑外土体沉降形式,推导得出基坑开挖引起的坑外土体沉降理论计算公式。把降水沉降及基坑施工沉降二者计算结果叠加并加以修正,最终得到坑外土体沉降的理论解析解。经过实

际工程验证,实测值分布在理论值范围内,可以有效地预估坑外土体沉降量。在预估基坑外土体沉降的研究中,尽可能多地考虑引起沉降的重要因素以及引起沉降的机理,把这些因素综合起来考虑合理假设,再通过实际工程进行验证、修正、验证。如此反复,最终可以得到合理有效的理论结果,推动基坑方面的理论发展,指导工程实践,使得理论研究具有重大现实意义。

## 参考文献:

- [1] MIGLIAZZA M, CHIORBOL M, GIANI G P. Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36 (1/2): 113-124.
- [2] KUNG G T, JUANG C H, ASCE M, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6): 731-747.
- [3] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [4] 李琳,张建根,杨敏. 疏干降水引起坑后地面沉降的一种简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 306-309.  
LI L, ZHANG J G, YANG M. Simplified analysis of settlement due to dewatering of foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (10): 306-309. (in Chinese)
- [5] 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): 239-243.  
XIE K H, LIU C M, YANG H W, et al. Analysis of settlement induced by dewatering during excavation in layered soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36 (3): 239-243. (in Chinese)
- [6] 王卫东,徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 32-38.  
WANG W D, XU Z H. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 32-38. (in Chinese)
- [7] 施成华,彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 117-121.  
SHI C H, PENG L M. Ground surface settlement caused by foundation pit excavation and dewatering [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 117-121. (in Chinese)
- [8] 徐中华,王建华,王卫东. 软土地区采用灌注桩围护的深基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1362-1366.  
XU Z H, WANG J H, WANG W D. Deformation behavior of deep excavations retained by bored pile wall in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1362-1366. (in Chinese)
- [9] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.  
ZHANG Z G, ZHANG M X, WANG W D. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2085-2092. (in Chinese)
- [10] 张陈蓉,俞剑,黄茂松. 基坑开挖对邻近地下管线影响的变形控制标准[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2027-2034.  
ZHANG C R, YU J, HUANG M S. Deformation controlling criterion of effect on underground pipelines due to foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2027-2034. (in Chinese)
- [11] 朱晓宇,黄茂松,张陈蓉. 基坑开挖对邻近桩基础影响的 DCFEM 法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(Sup 1): 181-185.  
ZHU X Y, HUANG M S, ZHANG C R. Displacement-controlled FEM for analyzing influences of excavation of foundation pits on adjacent pile foundations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (Sup 1): 181-185. (in Chinese)
- [12] 刘国彬,刘金元,徐全庆. 基坑开挖引起的土体力学特性变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 112-116.  
LIU G B, LIU J Y, XU Q Q. Testing study on variation of mechanical characteristics of soil due to excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 112-116. (in Chinese)
- [13] 郑刚,焦莹. 深基坑工程设计理论及工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

[14] 黄宏伟,顾雷雨,王怀忠. 城市地下空间深开挖施工风险预警[M]. 上海:同济大学出版社,2014.

[15] 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.

[16] 龚晓南,高有潮. 深基坑工程设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

[17] 李俊,张小平. 某基坑位移、沉降和内力实测结果及预警值讨论[J]. 岩土力学,2008,29(4):1045-1052.

LI J, ZHANG X P. Discussion on monitoring results of displacements, settlements and inner forces of a foundation pit and early-warning value[J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(4):1045-1052. (in Chinese)

[18] 徐宜和. 基坑工程技术现状分析[J]. 四川建筑科学研究,2005,31(6):113-117.

XU Y H. The analysis of the technology status of foundation pit engineering [J]. Sichuan Building Science,2005,31(6):113-117. (in Chinese)

[19] 侯学渊,刘国彬. 城市基坑工程发展的几点看法[J]. 施工技术,2000,29(4):89-96.

HOU X Y, LIU G B. Several views on the development of urban foundation work [J]. Construction Technology, 2000, 29 (4): 89-96. (in Chinese)

(编辑 郭飞)