

DOI: 10.11779/CJGE2015S2013

基坑开挖引起紧邻建筑物沉降的简化计算方法

范 凡, 陈锦剑, 章红兵, 王建华

(上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 提出了一种基坑施工引起紧邻建筑物沉降的简化计算方法, 可根据基本工程信息快速推求建构筑物基础沉降。与之前的方法相比, 既考虑了基础刚度对沉降的影响, 又避免了繁杂的有限元计算。在总结分析地表沉降特征和分布模式的基础上, 结合工程经验和数值分析探讨了坑外土体沉降随深度变化规律。根据规律总结出基坑开挖对周边环境影响的分区特征, 提出了坑外开挖面深度以上土体沉降分布曲线的简化计算公式。由于建筑物基础刚度远大于周围土体, 假设其沉降主要来源于下卧土层变形, 即建筑沉降等同于基底埋深处的土体沉降, 从而得到了根据土体沉降分布曲线来描述建筑物沉降的简化计算方法。算例分析表明, 其计算值与实测值有较好的一致性, 可为预测、分析紧邻基坑施工的建筑物沉降提供参考。

关键词: 基坑; 沉降; 简化算法; 分布模式; 经验公式

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0061-04

作者简介: 范 凡(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方向的研究。E-mail: farisfan@163.com。

Simplified method to predict settlements of adjacent buildings due to deep excavation

FAN Fan, CHEN Jin-jian, ZHANG Hong-bing, WANG Jian-hua

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A simplified approach for predicting settlement of the adjacent buildings due to excavation is proposed. The settlement of building foundation can be obtained merely according to the basic information of the excavation. Compared with the previous approaches, this approach considers the foundation stiffness and avoids complex numerical modelling. Based on distribution pattern of ground surface settlement, the reduction rules of deep soil settlement is analyzed, and the settlement distribution curve of deep soils is obtained. According to the partition characteristics of excavation environmental impact, the settlement distribution curve above the excavation face is suggested. Since the stiffness of building foundation and ground stabilization is far greater than that of the surrounding soils, and the settlement of buildings mainly results from soil deformation under the building foundation. Therefore, the settlement of soils under the building foundation can be taken as that of the buildings, which can be represented by the settlement curve of deep soils. The comparison between the monitoring data and the calculated results obtained by the simplified approach is in good agreement, which indicates the simplified approach can be employed to predict the settlement of buildings induced by excavation.

Key words: excavation; settlement; simplified method; empirical formula

0 引言

城市化发展导致建设用地日益紧张, 建筑密集区内基坑施工频现, 对周围建筑物受力和变形产生不利影响, 故合理预测紧邻基坑施工的建筑沉降在施工建设中十分重要。目前计算基坑施工引起周围建筑物沉降的常用方法有:①将坑外地表沉降作为建筑物沉降。坑外地表沉降可通过理论或经验方法确定, 如 Peck 法^[1]、Rayleigh 曲线法^[2]等。②数值分析方法。通过建立有限元模型, 计算基坑周围建筑物沉降。由于方法①忽略了建筑物基础刚度, 未考虑其在抵抗土体变形

时的作用, 导致计算结果大幅超过实测值, 使其指导工程实践的意义大打折扣。方法②对每项不同的工程, 都需要重新建立计算模型, 费时费力, 而且对于计算硬件、资源有较高要求。再者, 数值计算对于参数选取、模型简化等计算经验要求很高, 否则所得到的结果也很不理想。所以急需一种操作简单、计算简便的方法来预测紧邻基坑施工的建筑物沉降。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330633, 41172251); 上海市科学技术委员会科研项目(13231200602)

收稿日期: 2015-03-26

因为建筑基础刚度远大于周围土体，所以建筑物沉降主要来源于下卧土层的变形。若忽略基础自身变形，即可认为建筑物沉降即为基础底面土体沉降。本文从此入手，在总结地面沉降分布模式的基础上，提出了坑外土体沉降随深度折减规律，得到了不同深度土体沉降分布曲线，并用以描述建筑物基础沉降。

1 基坑开挖引起的地面沉降计算

研究发现，基坑开挖引起的围护结构侧向变形最大值 δ_{hm} 与开挖深度成正比

$$\delta_{hm} = k_s H \quad , \quad (1)$$

式中， H 为基坑开挖深度， k_s 为比例系数。对上海地区大量基坑工程实测数据的统计分析发现^[3]：软土地基的 k_s 取值范围为 0.1%~1.0%，平均值为 0.400%。基坑施工过程中，围护结构侧向变形将导致坑外土体变形和地面沉降。根据上海软土地区基坑地面沉降的实测统计数据，结合文献[4]等的地面沉降预测曲线，丁勇春建议采用 Rayleigh 分布函数来估算坑外地面沉降的分布^[2]，其具体方法如下：

(1) 坑外最大地面沉降值 δ_{vm} 由下式计算：

$$\delta_{vm} = \alpha \delta_{hm} \quad , \quad (2)$$

式中， δ_{hm} 为围护结构最大侧向变形； α 为经验系数，根据上海地区经验， $\alpha=0.7\sim 1.0$ ，多数情况下建议 $\alpha=1.0$ ，当 $\delta_{vm} \leq 0.5\%H$ 时，可取 0.7， H 为基坑开挖深度。

(2) 地面沉降 δ_v 经验公式计算如下：

$$k_s(d/H) = \frac{\delta_v(d/H)}{\delta_{vm}} = \frac{(d/H) + 0.75}{0.9} \exp \left\{ -\frac{[(d/H) + 0.75]^2}{4.5} \right\} \quad , \quad (3)$$

式中， d 为沉降点到坑边距离。

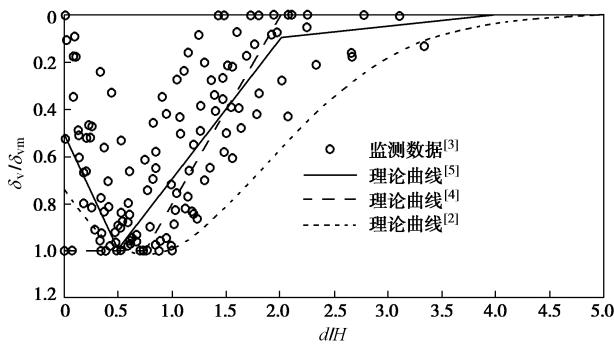


图 1 坑外地面沉降经验计算曲线

Fig. 1 Empirical curves of ground settlement induced by excavation

坑外地面沉降经验计算曲线与实测地面沉降的对比如图 1 所示。由图可见，实测地面沉降大部分包络于经验沉降曲线内，说明采用 Rayleigh 分布函数来估

算坑外地面沉降是可行的。

2 坑外土体沉降随深度的衰减规律

2.1 土体变形分析

研究基坑开挖对于周边土体、建筑物的影响，首先要了解坑外土体变形规律。Ou 等^[5]通过监测台北国家企业中心基坑外地层水平位移发现，坑外土体侧向变形分布与围护结构侧向变形分布相似。刁伟轶^[6]通过对上海地铁 8 号线虹口足球场站基坑外侧地层的沉降监测结果分析发现，坑外浅层土体表现为土体沉降，而基坑最终开挖完成后，开挖面以下的坑外土体表现出一定的隆起。丁勇春^[2]通过三维数值模拟分析，总结了坑外土体侧向、竖向变形传递规律。

为了深入了解坑外土体隆沉分界情况及变形分布情况，在研究中建立了有限元基本分析模型。分析发现，基坑施工完成后，开挖面成为坑外土体隆沉分界面。在坑外，分界面其上土体表现为沉降，其下土体表现为隆起。开挖面以上的土体沉降随深度的增加而逐渐减小，到开挖面沉降基本为零。

2.2 不同距离的衰减模式

为了总结坑外土体沉降分布规律，对前述有限元计算结果进行了细致分析对比，发现当到坑边距离不同时，土体沉降随深度衰减规律也不同。根据坑外土体沉降衰减规律的不同特点，可将坑外土体按照到坑边距离 d 划分为 3 个区：折线衰减区 ($0 \leq d \leq H$)、线性衰减区 ($H \leq d \leq 2H$)、无影响区 ($d \geq 2H$) (H 为基坑开挖深度)。

考察本研究中有限元基本分析模型计算结果，在折线衰减区中选取到坑边距离 d 为 $1/4H$ 、 $3/8H$ 、 $1/2H$ 的 3 组代表点，在线性衰减区中选取到坑边距离 d 为 H 、 $2/3H$ 、 $2H$ 的 3 组代表点，各组数据中各深度位置沉降与对应地表沉降比值随深度变化曲线如图 2 所示。在无影响区，由于土体沉降对建筑物的影响很小，故无需讨论。

分析发现：在折线衰减区中，各位置沉降比值随深度变化可用下式近似计算：

$$k_1 = \frac{\delta_y}{\delta_{yd}} = \begin{cases} 1 & \left(0 \leq \frac{y}{H} \leq 0.5 \right) \\ -2 \cdot \frac{y}{H} + 2 & \left(0.5 \leq \frac{y}{H} \leq 1 \right) \end{cases} \quad , \quad (4)$$

线性衰减区中可用下式近似计算：

$$k_2 = \frac{\delta_y}{\delta_{yd}} = \left\{ -\frac{y}{H} + 1 \quad \left(0 \leq \frac{y}{H} \leq 1 \right) \right. \quad . \quad (5)$$

式 (4) 中 k_1 为折线衰减区中某深度位置沉降值与地表沉降值之比； δ_y 为折线衰减区中某深度位置沉降值； δ_{yd} 为折线衰减区中与指定点有相同到坑边距离处地表的沉降值； y 为深度； H 为开挖深度，式 (5)

中同理。当建筑基础深度大于 H 时, 其主要影响由土体沉降变为土体水平变形, 故对此情况文中不做讨论。

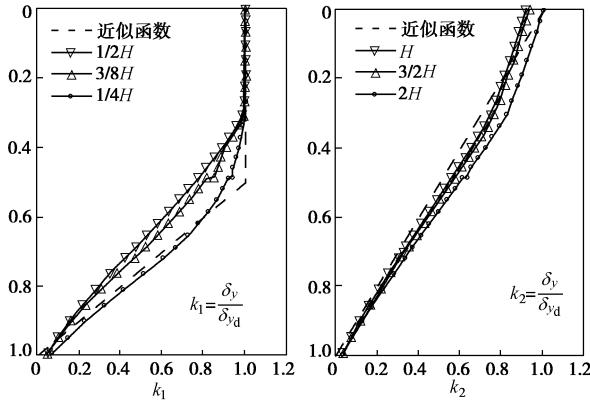


图 2 各影响区沉降比值变化图

Fig. 2 Variation of ratio of underground settlement to ground surface settlement in main affected zone

在工程实际中, 这两种衰减模式不是割裂的, 在每个分区中都同时存在。在紧邻基坑位置(折线衰减区), 折线衰减模式为主要模式; 在远离基坑(线性衰减区)位置, 线性衰减模式为主要模式。

2.3 土体沉降随深度折减系数

为了同时考虑上述两种衰减模式对于土体沉降的影响, 并且解决衰减模式在影响分区分界点的连续性问题, 本文提出了衰减模式调整系数 α , α 表示每种衰减模式在折减系数中的权重, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -\frac{1}{2H} \cdot d + 1, \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2H} \cdot d. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

调整系数 α_1 和 α_2 与到坑边距离 d 关系如图 3 所示。

根据式 (4) ~ (6), 到坑边距离为 d 点处, 坚向各点沉降随深度变化折减系数 k 为

$$k = \alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2. \quad (7)$$

选取图 2 中近似效果不佳的距离为 $1/2H$ 、 $2/3H$ 两组点, 引入调整系数后, 有限元基本模型计算结果与折减理论公式计算对比如图 4 所示。可以发现, 前述公式不仅可以高度近似折线、线性衰减区两端的沉降折减规律, 在引入调整系数后, 对中间位置沉降折减规律也能更为准确反映。通过引入衰减模式调整系数, 本折减方法既符合了各衰减模式同时存在的工程实际, 又保证了影响区分界线上沉降计算的连续性。

3 紧邻建筑物沉降的简化算法

在此之前, 基坑开挖墙后地表沉降已经可以通过实测数据统计分析的方法进行较为准确的评估。再结合本文对墙后土体变形的研究分析, 采用地表沉降折减的方法就可以预测墙后土体任意深度的沉降, 由于建筑物基础刚度很大, 可认为建筑沉降等同于基底埋

深处的土体沉降, 由此, 一种基于地表沉降折减的紧邻基坑开挖引起建筑物沉降计算方法便可以提出。

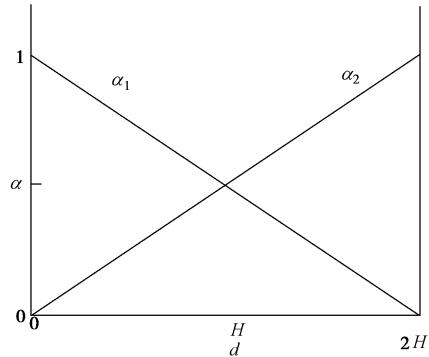


图 3 调整系数 α 随到坑边距离 d 变化曲线

Fig. 3 Variation of adjustment coefficient α

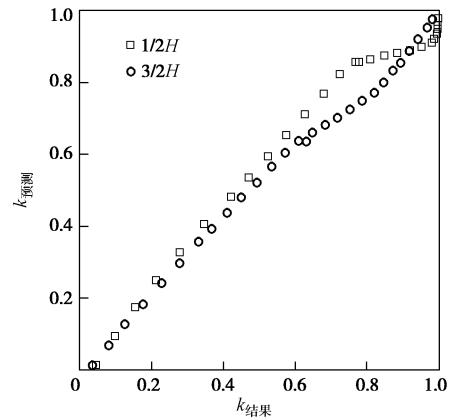


图 4 考虑调整系数的衰减公式与有限元计算对比

Fig. 4 Comparison between values by theoretical formula considering adjustment coefficient and numerical results

具体过程如下: ①确定基坑开挖的基本设计参数和土体性质参数; ②通过式 (1) 计算基坑围护结构的最大侧向变形 δ_{hm} ; ③通过式 (2) 和围护结构最大侧向变形 δ_{hm} 计算坑外地表最大沉降 δ_{vm} ; ④通过式 (3) 和坑外地表最大沉降得到坑外地表沉降分布曲线, 进而获得地表任意位置的沉降值 δ_{vd} ; ⑤通过式 (4) 计算折线衰减区的 k_1 ; ⑥通过式 (5) 计算线性衰减区的 k_2 ; ⑦通过式 (6) 计算所求位置处的两种衰减模式的调整系数 α_1 和 α_2 ; ⑧通过式 (7) 计算所求位置处任意深度深层土体沉降与地表沉降之比 k ; ⑨通过前面求得所求位置处任意深度深层土体沉降与地表沉降之比 k 和坑外地表的沉降 δ_{vd} 计算所求位置建筑物基础底面处土体沉降 δ_v , δ_v 即为建筑物沉降。即

$$\delta_v = \beta k \delta_{vd}, \quad (8)$$

式中, β 为经验系数, 与建筑基础形式、基础整体刚度等因素有关, 对于刚性基础或较强的地基加固可取为 1, 对于其他情况有待于更多工程实例反馈分析。

4 算例分析

上海轨道交通 4 号线宜山路站基坑^[7]围护结构采

用 800 mm 厚地下连续墙, 主体结构基坑开挖深度为 15.00~18.73 m, 设 1 道砼支撑和 4 道钢支撑。车站周围有很多建(构)筑物, 其中最近的 1 座 7 层砖混结构民房, 距离基坑仅 3~4 m。该建筑物采用条形基础, 基础埋深 2 m, 条形基础下为 14 m 深的深层搅拌桩地基加固, 加固体距基坑 0.5~3 m。基坑施工过程中建筑物中居民未予搬迁, 所以需要准确预测并控制基坑施工过程中建筑沉降, 保证其安全。工程采用了车站结构中板逆作的方法, 并采取了一系列加固措施, 有效保护了周围建筑物, 施工完成后各监测点沉降值及监测点到基坑距离如表 1 所示^[7]。

表 1 各测点到基坑距离表

Table 1 Distances between monitoring points and excavation

测点	距离/m	沉降/mm
F185	4.7	6.12
F186	11.2	5.48
F187	21.3	3.50
F188	30.3	4.22
F184	2.0	6.57
F190	13.0	2.64
F189	27.3	3.58

采用本文提出的简化算法分别计算出 2 m 和 16 m 深度土体沉降分布曲线。考虑建筑基础及地基加固保存完好, 式(8)中经验系数 β 取 1。所得建筑物沉降分布曲线与监测结果对比如图 5 所示。对比发现, 16 m 深度处土体沉降分布曲线较好地反映了实际监测结果, 而 2 m 处土体沉降远大于实际沉降。分析认为, 由于基础下 14 m 地基加固强度很高, 在计算沉降时应将地基加固纳入考虑, 所以该建筑基础形式应视为深基础。图 5 表明, 本文的简化算法较准确预测了建筑物沉降, 与数值分析方法相比又具有计算简单、方便实用的优点, 可在工程实践中用于预测建筑沉降, 评估基坑施工影响, 保护施工安全。

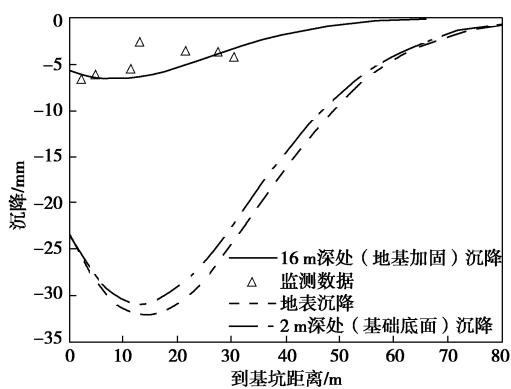


图 5 简化算法结果与监测结果对比

Fig. 5 Comparison between predictions and measurements

5 结 论

本文通过对基坑开挖后土体变形和其对上层建筑物影响研究, 主要结论与建议如下:

(1) 由于建筑物基础刚度远大于周围土体, 故建筑沉降主要来自下卧土体变形, 建筑物沉降等于基础底面土体沉降。

(2) 坑外土体沉降分布可根据变形衰减特征划分为折线衰减区、线性衰减区和无影响区, 不同区域采用不同的折减函数表示。

(3) 通过引入折减系数, 得到了深层土体沉降分布曲线, 再结合经验系数式 β , 可以计算建筑物沉降。

(4) 通过更多工程实践反馈分析可使经验系数 β 更为准确, 计算原理更加清晰, 使简化算法能将基础、地基形式等纳入考虑, 使沉降预测更加准确、客观。

参 考 文 献:

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969: 225~290.
- [2] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (DING Yong-chun. Excavation-induced deformation and control in soft deposits [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese))
- [3] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136(7): 985~994.
- [4] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in site walls[C]// ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures. New York, 1990: 439~470.
- [5] OU C Y, LIAO J T, LIN H D. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 798~808.
- [6] 刁伟轶. 钻孔咬合桩受力变形规律及在地铁车站设计施工中的应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006. (DIAO Wei-ji. Research on the principle and design of borehole cast-in-place pile and the construction in deep excavation next to metro station[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [7] 田军. 地铁车站深基坑半逆作法施工的环境变形控制分析 [J]. 上海交通大学学报, 2012(6): 30. (TIAN Jun. Environment deformation caused by semi-top-down excavation of metro station[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012(6): 30. (in Chinese))