

软土基坑开挖引起的坑外地表沉降预测数值分析

尹盛斌^{1,2}, 丁红岩¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 汤臣(中国)有限公司, 上海 200122)

摘 要: 通过对基坑开挖过程的有限元数值模拟可知, 当围护结构发生正向、反向转动及挠曲等 3 种基本变形模式时, 坑外地表沉降分布具有较为明显的规律, 均可采用统一格式的指数曲线进行模拟, 即可得到坑外地表沉降曲线的经验公式。利用正向、反向转动及挠曲等 3 种基本变形模式对围护结构的任意变形模式进行拟合, 求得 3 种基本模式的最大位移值, 然后根据 3 种基本模式所对应的坑外地表沉降经验公式, 求得每一基本模式所对应的坑外地表沉降分量, 并进行叠加, 从而求得坑外地表沉降分布曲线。

关 键 词: 基坑开挖; 地表沉降; 数值分析; 基本变形形式

中图分类号: TU 478

文献标识码: A

Numerical analysis of estimation of ground surface settlement outside pit induced by soft-soil excavation

YIN Sheng-bin^{1,2}, DING Hong-yan¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tomson Group, Shanghai 200122, China)

Abstract: The numerical simulation of the excavation shows that, for each basic deformation modes of the retaining wall, for example the forward rotation, reverse rotation and deflection, distribution of the ground surface settlement outside pit shows obvious regularity, which can be fitted by the exponential curve with a unified format, then the empirical formulas are got. Arbitrary deformation mode of the retaining wall can be fitted using the three basic deformation modes above, and the maximum displacement value for each basic deformation mode can be obtained. Using the empirical formulas above, the corresponding ground surface settlement for each basic deformation mode can be calculated. Then superimpose the settlement and obtain the distribution curve of ground surface settlement.

Key words: excavation; ground surface settlement; numerical analysis; basic deformation mode

1 引 言

在软土地区的基坑开挖过程中, 坑内土体的开挖不仅将引发坑底隆起及围护墙位移, 还将导致坑外土体产生水平位移与竖向沉降, 而坑外土体的位移将对周边环境产生重要影响, 尤其是市中心区域的基坑工程, 在基坑周边往往密布着建筑物、市政道路及管线等, 对基坑变形的控制提出了极其严格的要求, 环境保护等级很高。因此, 为了保证基坑工程施工的顺利进行, 并有效地保护周边环境安全, 有必要对坑外地表沉降进行研究。

针对坑外地表沉降, 诸多学者^[1-5]进行了较为深入的研究, 无论是从工程实践的角度, 还是从理

论分析的角度, 都得到了较为丰富的成果。然而, 由于基坑工程本身所特有的复杂性与特殊性, 针对坑外土体的位移研究仍然存在许多不足之处, 尤其是针对软土地区的坑外土体位移预测。因此, 本文采用数值分析方法对坑外地表沉降进行预测研究。

2 围护结构的基本变形模式

关于围护结构的变形模式, 国内外许多学者均对此做了较多的研究, 并在对工程实例分析的基础上提出了相应的围护结构变形模式。如 Peck^[6]认为, 在开挖的初始阶段, 围护结构基本呈悬臂状态, 此时围护结构的最大位移往往发生在顶部; 而随着开挖的进行以及支撑的架设, 围护结构的最大位移则

逐渐下移。Goldberg 等^[7]通过对大量的工程实测数据的研究,认为刚度较大的刚性围护结构,其变形模式主要表现为刚体的平移和转动,包括围护墙的平行移动、绕墙体底部的倾覆转动和绕墙顶部的踢脚转动;而对于柔性围护结构,除了将发生上述的刚体位移外,还将发生墙体的变形。针对内支撑系统及锚拉系统,Clough 等^[8]认为,围护结构所产生的变形模式主要包括以下3种,即悬臂式、内凸式及组合式。龚晓南等^[9]认为,围护结构的变形模式与围护结构的插入深度、土层性质及开挖工况等因素紧密相关,并可分为以下4种形式:①弓形变形曲线;②上段呈正向弯曲,下段呈反向弯曲的变形曲线;③前倾变形曲线;④踢脚变形曲线。崔江余等^[10]认为,围护结构的变形模式与其自身刚度、插入深度、土层性质等因素紧密相关。

通过上述围护结构的变形性状的介绍可知,围护结构变形的影响因素较为复杂,不同的围护结构类型、支撑体系刚度、支撑布置与架设、土层参数,尤其是软土层的分布均对围护结构的变形产生重要影响。但通过对各种变形模式的分析可知,任意一种变形模式均可以由如图1所示的3种基本模式来组成。

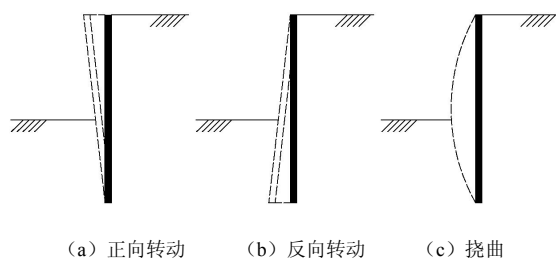


图1 围护结构的基本位移模式
Fig.1 Basic deformation modes of the retaining wall

针对坑外地表沉降的预测研究,本文将通过上述3种基本变形模式展开如下分析:

(1) 利用杆系有限元法计算围护结构变形,或利用测斜仪器监测围护墙的位移,从而得到如图2(a)所示的围护结构位移曲线;

(2) 根据上述3种基本模式,划分第1步计算或监测所得的围护结构变形曲线,并得到所对应3种基本模式的位移最大值,如图2(a)所示的3种基本位移模式中正向转动、反向转动和挠曲所对应的位移最大值分别为 δ_{h1} 、 δ_{h2} 和 δ_{h3} 。

(3) 根据第2步所得的基本模式及对应模式的位移最大值,利用数值分析手段,分析各种基本变

形模式所引发的坑外地表沉降的分布规律,并采用经验公式拟合每一基本模式所对应的坑外地表沉降曲线,如图2(b)~(d)所示,然后对各种位移模式所得的坑外沉降经验曲线进行叠加,得到最终的坑外地表沉降曲线。

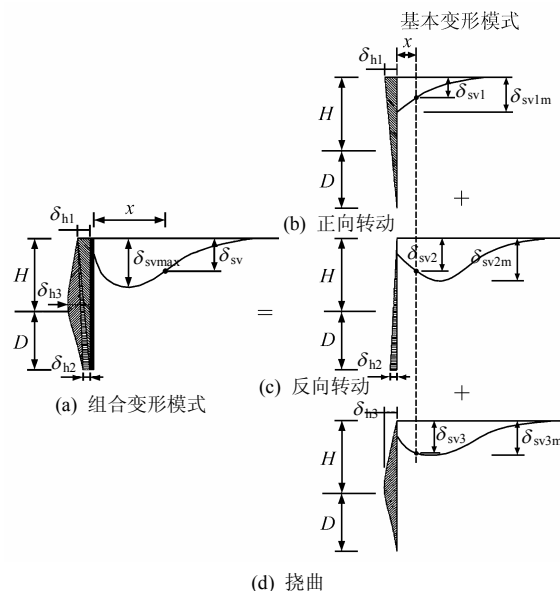


图2 基坑变形分析示意图
Fig.2 Sketch of deformation of excavation

为了得到坑外地表沉降曲线,需利用数值分析方法了解3种基本变形模式所引发的坑外地表沉降曲线分布规律。

3 数值模型的建立

3.1 土层参数

土体采用 Hardening Soil 模型进行模拟,其具体物理力学参数如表1所示。其中, γ 为土体的饱和重度, c 、 φ 分别为土体的有效黏聚力及内摩擦角, E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 分别为标准三轴排水试验中的割线刚度模量、主固结加载切线刚度模量及卸载/再加载刚度模量, m 为与刚度应力水平相关的幂指数, R_{inter} 为界面强度折减系数, K_0^{nc} 为正常固结下的侧压力系数, R_f 为破坏比。

表1 土层物理力学参数

γ /(kN/m ³)	c /kPa	φ /(°)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	m	R_{inter}	K_0^{nc}	R_f
20	20.0	25.0	8	8	40	0.5	0.5	0.58	0.5

3.2 几何尺寸

土层厚度取4倍开挖深度,基于对称性及计算速度的考虑,仅取1/2基坑模型进行分析,1/2坑内

开挖宽度为 20 m, 坑外土体宽度为 4 倍开挖深度。

3.3 基本变形模式分组

针对 3 种不同的基本变形模式, 在数值分析过程中, 每一基本变形模式的最大位移的取值如表 2 所示。

表 2 数值分析分组情况

Table 2 Groups of the numerical analysis

基本模式	开挖深度/m	最大位移值/cm
正向转动	8、10、12	4、5、6、7、8、9、10、11
	16、18、20	4、6、8、10、12、14、16、18
反向转动	8、10、12	4、5、6、7、8、9、10、11
	16、18、20	4、6、8、10、12、14、16、18
挠曲挠曲	8、10、12	4、5、6、7、8、9、10、11
	16、18、20	4、6、8、10、12、14、16、18

3.4 基坑开挖工序模拟

在围护结构深度范围内, 分别施加符合上述 3 种基本变形模式的位移值, 使得基坑发生相应的变形, 并得到坑外地表沉降曲线。

4 计算结果分析

4.1 正向转动

当围护结构仅发生正向转动时, 随着基坑开挖深度及正向转动最大位移值的变化, 其引发的坑外地表沉降曲线如图 3 所示。其中, 图 3~5 中空心圆点均表示数值计算所得的坑外地表沉降点, 实线表示拟合经验曲线, 其后的图 4、5 类同。

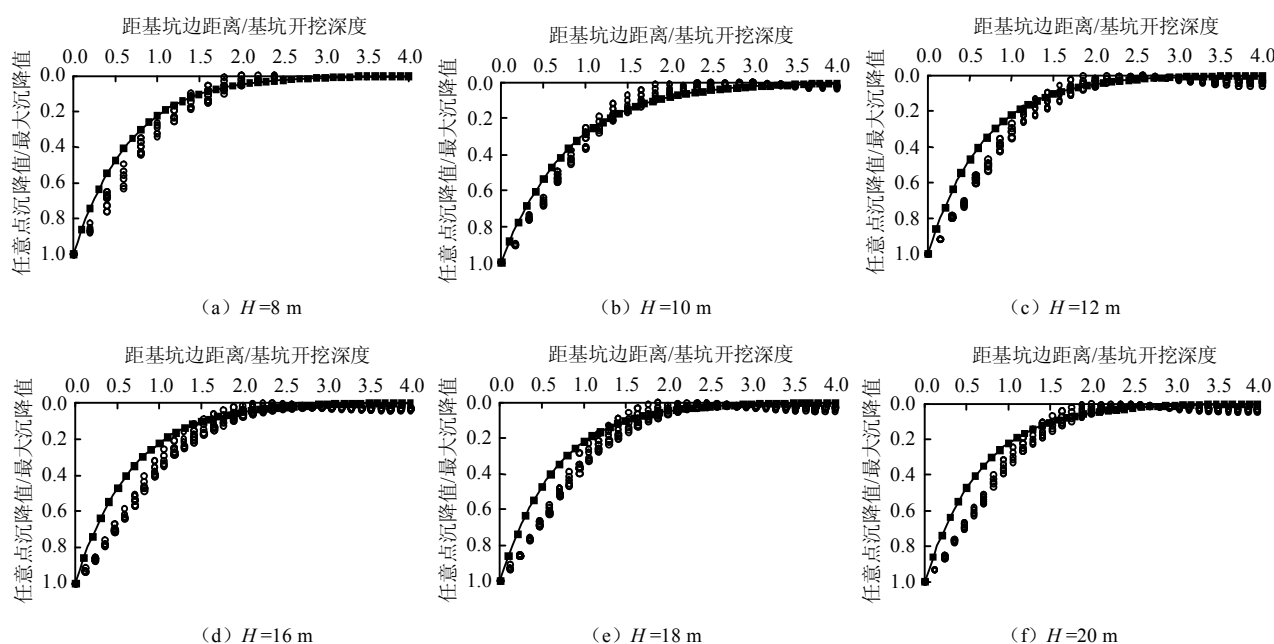


图 3 基坑不同开挖深度下围护结构正向转动时坑外地表沉降曲线

Fig.3 Curves of ground surface settlement with different excavation depth for the forward rotation mode

通过围护结构正向转动所引发的坑外地表沉降分布可知, 当围护结构转动位移值及基坑开挖深度发生变化时, 坑外地表沉降曲线的分布模式基本保持一致, 根据归一化地表沉降曲线的分布特点, 正向转动所产生的坑外地表沉降分布可近似采用指数函数进行模拟, 如图 3 中的曲线, 其曲线方程为

$$\delta_{sv1} = 0.8\delta_{h1} e^{-1.5x} \quad (1)$$

因此, 当围护结构发生正向转动或者围护结构的位移曲线中存在正向转动分量时, 只要求得正向转动最大位移值, 即可由式 (1) 求得坑外地表沉降分布曲线。

4.2 反向转动

当围护结构发生反向转动时, 随着反向转动最

大位移值的变化, 其引发的坑外地表沉降曲线如图 4 所示。

与围护结构发生正向转动所产生的坑外地表沉降曲线分布不同, 围护结构反向转动所引发的坑外地表沉降曲线呈凹槽形分布, 坑外地表沉降最大点发生在距离基坑边约 1 倍基坑开挖深度处的位置。尽管坑外地表沉降曲线的分布随着基坑开挖深度的增大发生轻微的变化, 但总体上仍呈现有规律的分布, 所得的归一化地表沉降分布曲线可近似地拟合指数分布曲线, 如图 4 所示的实线, 具体方程为

$$\delta_{sv2} = 0.8\delta_{h2} e^{-0.5(x-1)^2} \quad (2)$$

通过式 (2) 可知, 只要知道围护结构所发生的反向转动的最大位移值, 即可求得坑外地表沉降分

布曲线。

4.3 挠曲

除了上述两种基本变形模式外, 围护结构还可能发生挠曲变形, 本文将围护结构所发生的挠曲变

形简化为抛物线分布, 且最大的挠曲值(抛物线顶点)位于围护结构 midpoint 处。针对不同幅值的围护结构挠曲变形及不同的基坑开挖深度, 所引发的坑外地表沉降分布如图 5 所示。

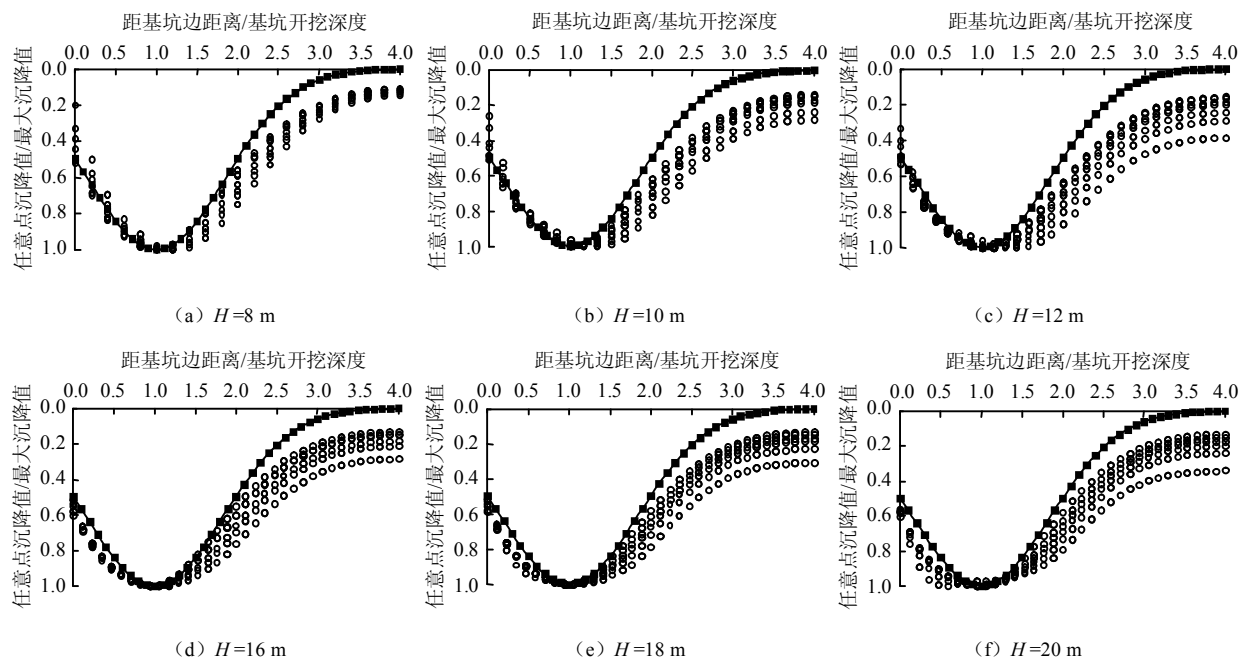


图 4 基坑不同开挖深度下围护结构反向转动时坑外地表沉降曲线

Fig.4 Curves of ground surface settlement with different excavation depth for the reverse rotation mode

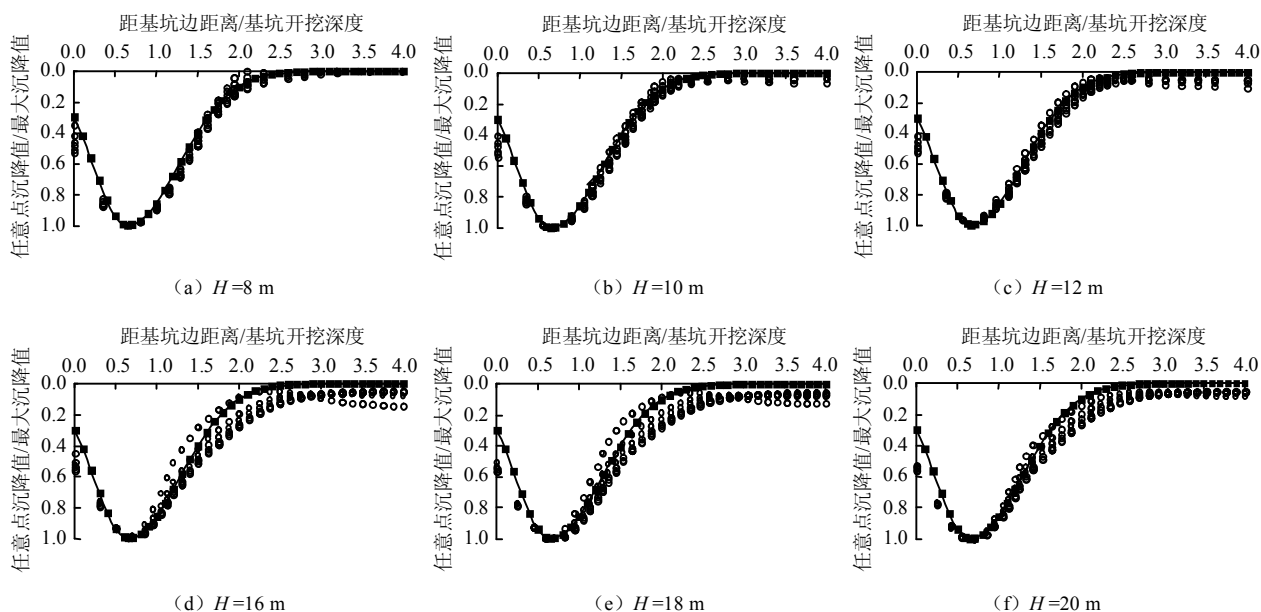


图 5 基坑不同开挖深度下围护结构挠曲时坑外地表沉降曲线

Fig.5 Curves of ground surface settlement with different excavation depth for the deflection mode

由图 5 可知, 同围护结构发生反向转动所产生的坑外地表沉降曲线分布类似, 当围护结构发生挠曲变形时, 所引发的坑外地表沉降曲线亦呈凹槽形分布, 且坑外地表的最大沉降值发生在距离基坑边

约 0.65 倍基坑开挖深度的位置处。为了利用指数曲线对坑外地表沉降曲线进行拟合, 文中对坑外地表沉降曲线采用归一化的地表沉降值, 并利用如图 5 所示的曲线进行拟合, 其具体的曲线方程为

$$\delta_{sv3} = 0.8\delta_{h3} \cdot \begin{cases} e^{-2.85(x-0.65)^2}, & (x \leq 0.65) \\ e^{-1.26(x-0.65)^2}, & (x > 0.65) \end{cases} \quad (3)$$

因此, 根据围护结构的变形曲线确定其挠曲变形最大值后, 即可利用式 (3) 求得坑外地表沉降分布曲线。

通过上述的分析可知, 在基坑围护结构变形已知的前提下, 只要对围护结构的变形曲线根据 3 种基本的变形模式进行划分, 得到各个基本模式的最大位移值, 并分别利用上述各个模式所对应的坑外地表沉降经验曲线, 求解各自的坑外地表沉降分量, 最后对所求得的 3 个沉降分量进行叠加, 即可得到坑外地表沉降分布曲线。

5 工程实例验证

为了验证上述所得的经验公式的准确性, 下文将分别针对上海兴业大厦、台北 TNEC 大厦、上海外滩金融中心等基坑工程的坑外地表沉降监测结果, 对上述经验公式进行对比验证。

(1) 上海兴业大厦^[11-12]

兴业大厦基坑工程的开挖深度为 12.4 ~ 14.4 m, 开挖面积为 84 m×82 m, 所得的地下连续墙水平位移曲线如图 6 中实线所示。

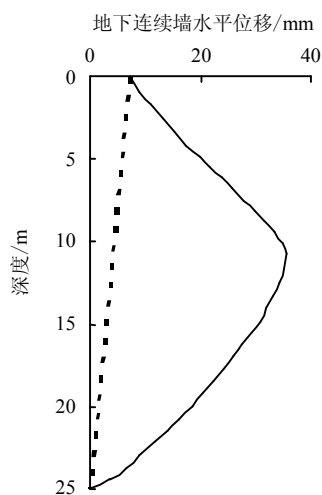


图 6 兴业大厦地下连续墙水平位移曲线
Fig.6 Horizontal displacement of the diaphragm wall under Xingye building

由于墙趾的位移几乎为 0, 故无反向转动模式的位移分量, 即可利用图 6 所示的虚线将地下连续墙变形曲线划分为正向转动和挠曲变形两部分, 故可得 3 种基本变形模式的最大位移值, 具体如表 3 所示。

表 3 兴业大厦基本变形模式最大位移值
Table 3 Maximum displacement values of the basic deformation mode of Xingye building

正向转动 δ_{h1} /cm	反向转动 δ_{h2} /cm	挠曲 δ_{h3} /cm
7.0	0.0	32.0

利用式 (1)、(3), 即可求得坑外地表沉降曲线如图 7 所示。

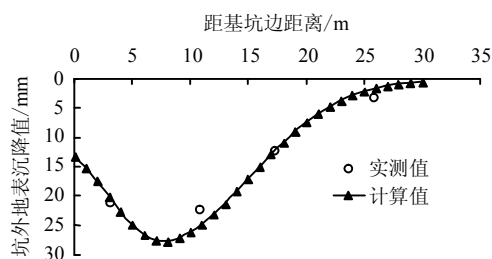


图 7 兴业大厦坑外地表沉降计算结果与实测结果对比
Fig.7 Comparison between calculated and measured results of the ground surface settlement of Xingye building

由图 7 可知, 采用上述的经验曲线所求得的坑外地表沉降曲线同实测值较为吻合, 该经验公式具有较好的实用性。

(2) 台北 TNEC 大厦^[13-14]

台北 TNEC 大厦基坑工程最大的开挖深度为 19.7 m, 北侧长度为 61 m, 南侧长度为 106 m, 基坑宽度为 43 m。所取的围护结构侧移曲线如图 8 中实线所示。

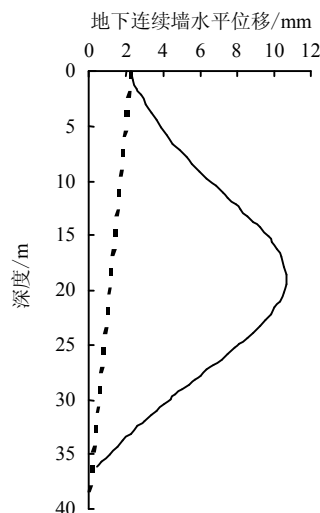


图 8 TNEC 大厦地下连续墙水平位移曲线
Fig.8 Horizontal displacement of the diaphragm wall under TNEC building

利用如图 8 所示的虚线将地下连续墙变形曲线划分为正向转动和挠曲变形 2 种基本模式, 由于墙

趾的位移几乎为 0, 亦不考虑反向转动模式的位移分量, 故可得上述 3 种基本变形模式的最大位移值如表 4 所示。

表 4 TNEC 大厦基本变形模式最大位移值
Table 4 Maximum displacement values of the basic deformation mode of TNEC building

正向转动 δ_{h1} /cm	反向转动 δ_{h2} /cm	挠曲 δ_{h3} /cm
2.2	0	9.5

利用式 (1)、(3), 即可求得坑外地表沉降曲线如图 9 所示。

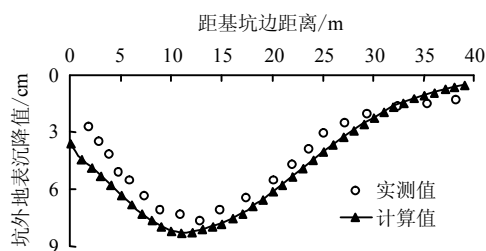


图 9 TNEC 大厦坑外地表沉降计算结果与实测结果对比
Fig.9 Comparison between calculated and measured results of the ground surface settlement of TNEC building

由图可知, 采用上述的经验预测方法所求得的坑外地表沉降曲线, 与实测值较为吻合。

(3) 上海外滩金融中心^[11, 15-16]

上海外滩金融中心的基坑周长为 506 m, 开挖面积为 12 000 m², 最大开挖深度为 17.5 m。监测所得的围护结构变形如图 10 所示。

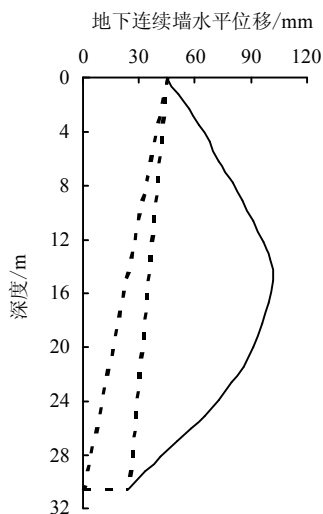


图 10 外滩金融中心地下连续墙水平位移曲线
Fig.10 Horizontal displacement of the diaphragm wall under bund financial center

利用图 10 所示的虚线将地下连续墙变形曲线划分为正向转动、反向转动和挠曲变形 3 种基本模式, 可得上述 3 种基本变形模式的最大位移值如表 5 所示。

表 5 外滩金融中心基本变形模式最大位移值
Table 5 Maximum displacement values of the basic deformation mode of bund financial center

正向转动 δ_{h1} /cm	反向转动 δ_{h2} /cm	挠曲 δ_{h3} /cm
44.9	22.2	66.9

利用式 (1) ~ (3), 即可求得坑外地表沉降曲线如图 11 所示。

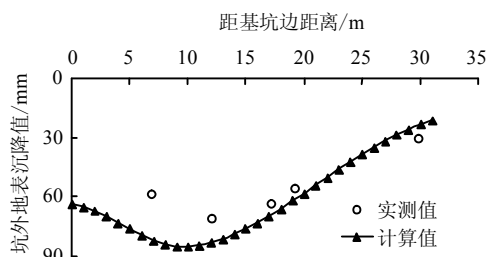


图 11 外滩金融中心坑外地表沉降计算结果与实测结果对比
Fig.11 Comparison between calculated and measured results of the ground surface settlement of bund financial center

由图可知, 除了紧邻基坑边的 10 m 范围区域外, 利用上述的经验曲线所求得的坑外地表沉降曲线与实测值较为吻合。

6 结 论

在数值分析所得经验公式的基础上, 本文提出了利用围护结构变形曲线预估坑外地表沉降的基本流程, 即:

(1) 计算围护结构位移曲线, 可以利用杆系有限元法等计算方法求得, 或根据工程实测结果确定。

(2) 根据所求得的围护结构变形曲线, 将其划分为正向转动、反向转动和挠曲变形 3 种基本变形模式, 并确定 3 种基本模式的位移最大值。

(3) 利用前文中所得的各种基本变形模式所对应的坑外地表沉降经验曲线, 计算每一基本变形模式位移作用下的坑外地表沉降曲线, 并对 3 种基本变形模式所得的坑外沉降曲线进行叠加, 得到最终的坑外地表沉降曲线。

(4) 本文所得坑外地表沉降经验曲线得到了工程实例的验证, 具有较好的拟合结果, 可行性强。

参考文献

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 唐孟雄, 赵锡宏. 深基坑周围地表沉降及变形分析[J]. 建筑科学, 1996, (4): 31—35.
TANG Meng-xiong, ZHAO Xi-hong. Analysis of ground settlement around deep excavation[J]. **Building Science**, 1996, (4): 31—35.
- [3] 刘兴旺, 施祖元, 益德清, 等. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 456—460.
LIU Xing-wang, SHI Zu-yuan, YI De-qing, et al. Deformation characteristics analysis of braced excavation on soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(4): 456—460.
- [4] 聂宗泉, 张尚根, 孟少平. 软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1218—1223.
NIE Zong-quan, ZHANG Shang-gen, MENG Shao-ping. Surface settlement of deep foundation pits by excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(8): 1218—1223.
- [5] 刘小丽, 周贺, 张占民. 软土深基坑开挖地表沉降估算方法的分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 99—103.
LIU Xiao-li, ZHOU He, ZHANG Zhan-min. Analysis of surface settlement estimation of deep foundation pit excavation in soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 33(Supp.1): 99—103.
- [6] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art-Volume. Mexico: [s. n.], 1969: 225—290.
- [7] GOLDBERG D T, JAWORSKI W E, GORDON M D. Lateral support systems and underpinning, Volume 2[C]. Washington: [s. n.], 1976.
- [8] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of insitu walls[C]//Proceedings of the design and performance of earth retaining structures. New York: [s. n.], 1990: 439—470.
- [9] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [10] 崔江余, 梁仁旺. 建筑基坑工程设计计算与施工[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999.
- [11] 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(增刊 1): 32—38.
WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.1): 32—38.
- [12] 蒋利学. 逆作法施工基坑对周围建筑沉降影响的工程实例分析[J]. 建筑结构, 2005, 35(7): 20—25.
JIANG Li-xue. Case analysis of the influence of foundation pit excavation by reverse sequence construction method on surrounding buildings[J]. **Building Structure**, 2005, 35(7): 20—25.
- [13] OU C Y, LIAO J T, CHENG W L. Building response and ground movements induced by a deep excavation[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(3): 209—220.
- [14] OU CHANG-YU, LIAO JUI-TANG, LIN HORN-DA. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 123(9): 798—808.
- [15] 朱合华, 崔茂玉, 刘学增, 等. 大型深基坑动态施工反演及稳定性分析[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(6): 74—80.
ZHU He-hua, CUI Mao-yu, LIU Xue-zeng, et al. Backward analysis of staged construction of big deep pit foundation and analysis of its stability[J]. **Journal of Building Structures**, 2000, 21(6): 74—80.
- [16] 刘学增, 朱合华. 支撑拆除过程对墙体变形与内力的影响分析[J]. 地下空间, 2000, 20(1): 47—50.
LIU Xue-zeng, ZHU He-hua. Analysis of the influence of support removing on the deformation of wall and the internal force[J]. **Underground Space**, 2000, 20(1): 47—50.