

地铁深基坑周边土体沉降预测对比

李佼^{1,2}, 龙四春^{1,2*}, 罗桂军³

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对地铁深基坑周边地表沉降变形预测, 运用偏态、正态分布函数对其沉降特征进行估算, 并采用多条线路多个地铁深基坑开挖为例, 结合实测数据对比分析。结果表明: 偏态分布函数地表沉降估算结果更接近于现场实测值, 且其偏态修正参数 ξ 的取值范围在1.4~3.0内变化, 土体抗剪强度对数与偏态修正系数成反比关系。

关键词: 深基坑; 地表沉降; 曲线拟合; 正态分布; 偏态分布

中图分类号: TU478 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2018)02-0051-05

Comparative Study on Settlement Prediction of Soil Around Deep Foundation Pit Based on Partial and Normal Distribution Function

Li Jiao^{1,2}, Long Sichun^{1,2}, Luo Guijun³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd, Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the prediction of ground settlement deformation around deep foundation pit of subway, the settlement characteristic is estimated by using partial and normal distribution function, and the excavation of several deep foundation pits with multiple lines is taken as an example, and compared with the measured data. Results show that the estimating results of the surface subsidence of the partial distribution function are closer to the field observations and the values of the partial correction parameters ξ range from 1.4 to 3.0. The logarithm of shear strength and the partial correction coefficient have inverse relations.

Keywords: deep foundation pit; surface subsidence; curve fitting; normal distribution; partial distribution

关于地铁深基坑施工引起地表沉降的研究, 主要包括理论解析法^[1-3], 有限元法^[4-6]、反分析法^[7]及经验估算法。国内外学者对经验估算法做了大量的研究工作, 首先由 Peck^[8]提出针对不同土性及开挖深度的地表沉降经验估算方法, 已作为我国现行基坑设计规范采用的计算方法。唐孟雄^[9]用回归分析方法求得基坑侧墙位移函数, 并导出侧墙剖面位移计算方法, 通过地表沉降与侧墙位移之间关系求得地表沉降计算公式。张尚根^[10]运用正态分布密度函数求得由支护结构变位引起的地表沉降估算方法。王翠^[11]对由正态分布密度函数推导出的地表沉降计算公式进行了改进, 并使其在天津地区得到了很好的运用。之后聂宗泉^[12]提出基于偏态分布的地表沉降计算方法对基坑工程作预测分析。张尚根^[13]运用偏态分布密度函数的

收稿日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41474014); 湖南省教育厅重点资助项目(15A060)

* 通信作者, E-mail: sclong@hnust.edu.cn

地表沉降估算方法对深基坑开挖引起的地表沉降进行了计算预测研究.刘小丽^[14]对正态和偏态分布的地表沉降估算方法作了进一步改进.储小宇^[15]通过试算法对偏态分布公式中关键参数进行调整,确定偏态曲线的解析式.庄海洋^[16]、梅源^[17]对深基坑开挖引起地表沉降变形规律进行了统计分析研究.

本文在已有的研究成果基础上,对多条不同线路的多个地铁深基坑开挖引起的地表沉降进行统计分析,并运用正态与偏态分布的地表沉降估算方法对比分析地铁深基坑施工引起的周边地表沉降,以便对未来同类工程的设计和施工提供参考价值.

1 正态偏态分布地表沉降估计原理

1.1 正态分布函数的地表沉降估算方法

设基坑开挖深度为 h , 支护结构长度为 H , 在极值点 (z_m, y_m) 处侧向位移达到最大偏移值 θ_{\max} . 基坑开挖引起的地表沉降通常在距离基坑边一定距离 d 处达到最大沉降值 δ_{\max} . 正态分布地表沉降计算原理如图 1 所示.

地表沉降曲线形态可用正态分布函数^[9]来表示.

$$\delta(x) = \delta_{\max} e^{-\pi \left(\frac{x-d}{r}\right)^2}. \quad (1)$$

式中: δ_{\max} 为最大下沉量, mm; r 为沉降范围的影响半径, m; 且 $r=d$.

支护结构侧向位移面积 A_h 与地表沉降曲线面积 A_d 的关系如下:

$$A_d = 0.85A_h. \quad (2)$$

其中, 支护结构侧向位移面积可按最小二乘法求得. 设拟合曲线为

$$f(z) = az^2 + bz + c. \quad (3)$$

系数按下式求出:

$$\begin{cases} a = \frac{c - y_m}{z_m^2}; \\ b = -2 \frac{c - y_m}{z_m}. \end{cases} \quad (4)$$

地表最大沉降量 δ_{\max} 与支护结构侧向最大位移量 θ_{\max} 的关系为

$$\theta_{\max} = 1.4\delta_{\max}. \quad (5)$$

地表沉降曲线围成的面积 A_d :

$$A_d = \int_{-m}^{\infty} \delta(x) dx = \delta_{\max} r \varphi\left(\sqrt{2\pi} \frac{m}{r}\right). \quad (6)$$

式中: m 为支护结构顶部竖向位移, mm.

其中, $\varphi(\sqrt{2\pi}(m/r))$ 服从标准正态分布, 可由标准正态分布表查得; 联立式(2)~式(6)可得 δ_{\max}, r . 再由式(1)即可求出支护结构后地表任意点的沉降值.

1.2 偏态分布函数的地表沉降估算方法

在前人的研究基础上, 聂宗泉根据大量的深基坑地表沉降实测资料, 结合数理统计方法, 提出地表沉降曲线为偏态分布函数的沉降估算方法. 偏态分布地表沉降计算原理图如图 2 所示.

地表沉降曲线为偏态分布函数^[12]时的表达式为

$$\delta(x) = \xi \frac{A_d}{\sqrt{2\pi}wx} \exp\left(-\frac{(\ln \frac{x}{2d})^2}{2w^2}\right). \quad (7)$$

式中: x 为待求点与基坑边的距离, m; w 为经验系数, 一般可取 0.6~0.7; ξ 为修正系数.

沉降曲线面积 A_d 与支护结构侧向曲线面积 A_h 有如下关系:

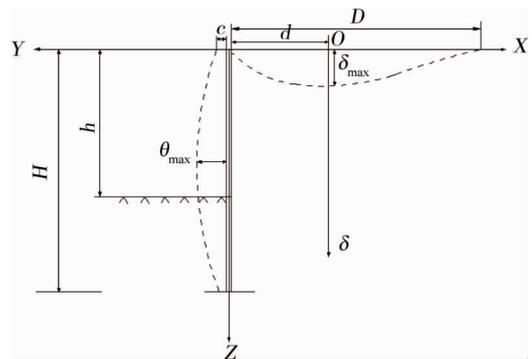


图 1 正态分布的地表沉降计算原理

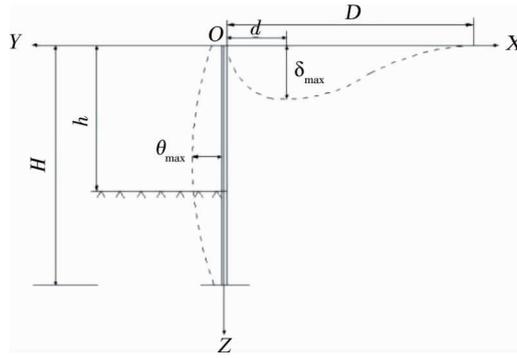


图2 偏态分布的地表沉降计算原理

$$A_d = aA_n \tag{8}$$

式中: α 为比例系数.根据经验, α 取值与插入比 φ 有关,当插入比 $\varphi \leq 0.5$, α 取 1~1.2;当插入比 $\varphi > 0.5$, α 取 0.8~1.0.

最大沉降点位置与基坑开挖深度有如下关系:

$$d = \beta h. \tag{9}$$

式中: β 为比例系数.根据经验, β 取值与插入比 φ 有关,当插入比 $\varphi \leq 0.5$, β 取 0.5~0.6;当插入比 $\varphi > 0.5$, β 取 0.6~0.7.

由支护结构插入比 φ 确定比例系数 α, β ,修正系数 ξ 可依具体工程选定,再由实测数据求得支护结构侧向曲线面积 A_n ,由式(7)可求得基坑周围地表任一点的沉降量 $\delta(x)$.

综上所述,偏态正态分布函数地表沉降估算流程图如图3所示.

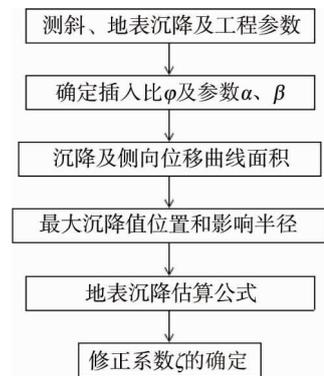


图3 地表沉降估算流程

2 工程实例

2.1 工程参数

以多个地铁深基坑工程为例,选用深基坑中间监测点位进行计算分析,将基坑周边地表沉降曲线分别用正态和偏态分布函数进行估算.基于以上原理与流程,求得各车站的相关参数见表1.

表1 计算有关参数

工程名称	H/m	h/m	α	β	φ	ξ	τ
蟠龙路站 ^[5]	25	18.1	1.2	0.5	0.38	1.4	71.1
六沟垅站 ^[4]	30	18.7	0.8	0.7	0.60	3.0	70.7
汉王陵公园站 ^[4]	25	16.1	1.0	0.6	0.55	1.6	64.2
长沙火车站 ^[3]	30	21.1	1.1	0.5	0.42	1.9	60.5
星沙大道站 ^[3]	25	17.8	1.1	0.5	0.40	1.5	54.9

注:工程名称右上角数字表示不同地铁线路.

2.2 正态偏态分布的地表沉降估算实例分析

以蟠龙站为例,支护结构长度 $H=25$ m,开挖深度 $h=18.1$ m,支护结构墙顶坐标(0,0)及侧墙位移曲线的极值点(12,-35.1),插入比 $\varphi=0.38$,参数 $\alpha=1.2, \beta=0.5$,修正系数 ξ 取 1.4.

由式(4)可得, $a = -0.244e-3, b = 5.85e-3$;由式(2)得 $A_n = 0.548, A_d = 0.466$;再由式(5)知, $\theta_{max} = -35.1, \delta_{max} = -25.1$;联立式(6)可得 $r = 18.57$,故正态分布的地表沉降估算公式可表达为

$$\delta(x) = -251e^{-\pi(\frac{x-18.57}{18.57})^2} \tag{10}$$

由 α 和 β 联立式(8)和式(9)可得 $A_d = 0.658, d = 14$,代入式(7)可得偏态分布的地表沉降估算公式为

$$\delta(x) = \frac{-614.14}{x} \exp[-1.39(\ln \frac{x}{28.06})^2] \tag{11}$$

由正态偏态分布地表沉降估算公式计算的结果及与现场实测值对比如图 4a 及表 2 所示.其他车站的计算值与实测值的结果比较图如图 4b~图 4e 所示.

表 2 蟠龙路站计算值与实测值比较

与坑边距离/m	正态分布计算值/mm	偏态分布计算值/mm	实测值/mm
6	-5.95	-3.78	-5.23
14	-20.75	-22.49	-24.56
21	-23.78	-26.06	-26.92
28	-11.16	-21.93	-23.12
35	-2.14	-16.37	-17.61

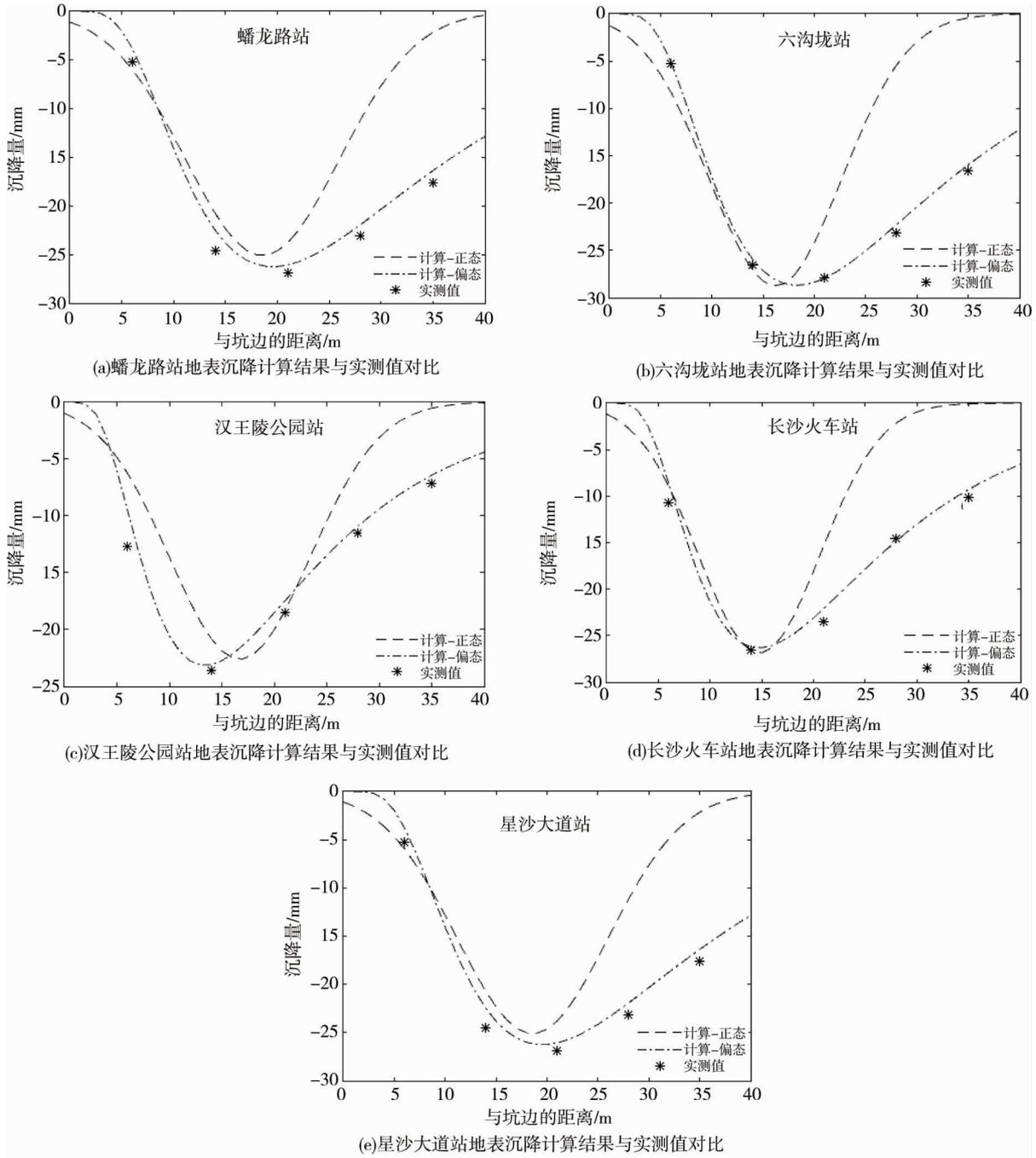


图 4 车站地表沉降计算结果与实测值对比

由表 2 和图 4 可以看出,偏态分布曲线地表沉降估算方法的计算结果更接近于现场实测值.以地表沉降最大值为中点把曲线分为左右两部分,沉降曲线的左半部分,正态偏态曲线估算结果较为接近实测值;

而沉降曲线的右半部分,正态偏态曲线的估算结果却差别很大.本文在聂宗泉^[12]等人提出的基于偏态分布的地表沉降估算公式的基础上增加了修正参数 ξ ,从表1可知,修正参数 ξ 的取值在1.4~3.0内变化.

2.3 地表沉降预测

基坑周边地表沉降与土体强度有关,通常用抗剪强度 τ 来表示.由上述分析结果得知,偏态分布的沉降估算方法更优,故有必要研究偏态分布沉降估算方法中的修正系数与土体强度的关系.对表1中偏态修正参数 ξ 和土体抗剪强度 τ 进行曲线拟合,拟合结果可用式(12)表示:

$$\tau = \exp\left(\frac{0.7}{\xi} + 3.76\right). \quad (12)$$

令 $y = \ln(\tau) - 3.76$, $x = \xi$, $k = 0.7$,则有 $xy = k$ 且 k 为常数,故有土体抗剪强度对数与修正系数成反比关系,拟合结果见图5.

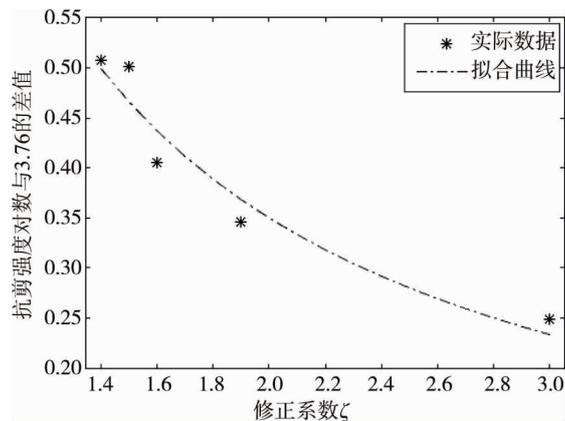


图5 修正参数 ξ 和土体抗剪强度 τ 曲线拟合结果

从图5可以看出,实际数据非常接近拟合曲线,且图像符合反比关系.故基坑在开挖之前,通过地质勘察得到土体的抗剪强度进而求出偏态修正系数,再由偏态分布估算方法预测基坑地表沉降,可对基坑工程的安全作出预测分析.

3 结论

1) 偏态分布曲线地表沉降估算方法的计算结果更接近于现场实测值,偏态分布地表沉降计算方法中修正参数 ξ 的取值在1.4~3.0内变化.

2) 以地表沉降最大值为中点把曲线分为左右2部分,沉降曲线的左半部分,正态偏态曲线预测结果较为接近,而沉降曲线的右半部分,正态偏态曲线的预测结果却差别很大.

3) 土体抗剪强度对数与偏态修正系数成反比关系.

4) 基坑周围地层移动贯穿于整个施工过程,除了基坑开挖引起的地表沉降之外,还与基坑降水引起的土体固结沉降、渗流及周边荷载等因素有关,其他影响因素引起地表沉降的计算方法有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 沈路遥,钱建固,张戎泽.挡墙水平变位诱发地表沉降的简化解析[J].岩土力学,2016,37(8):2293-2298.
- [2] 顾剑波,钱建固.任意柔性挡墙变位诱发地表沉降的解析理论预测[J].岩土力学,2015,36(s1):465-470.
- [3] 钱建固,王伟奇.刚性挡墙变位诱发墙后地表沉降的理论解析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(s1):2698-2703.
- [4] 童建军,王明年,于丽,等.成都地铁车站深基坑周围地表沉降规律研究[J].水文地质工程地质,2015,42(3):97-101.