

粉砂地层地铁深基坑周边地表沉降分析及预测

罗战友¹, 丁 康¹, 邹宝平¹, 张 帆², 李 兵²

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江交工集团股份有限公司, 杭州 310051)

摘 要: 为研究典型粉砂地层地铁深基坑周边地表沉降变化规律,以杭州地区数十个地铁深基坑工程为例,通过实测数据分析基坑周边地表沉降及水平位移的变化规律,推导出粉砂地层地铁深基坑周边地表沉降预测模型。研究表明:基坑周边地表最大沉降均值为 $1.77\%_0 H_e$ (H_e 为基坑开挖深度),最大沉降主要发生在墙后距离 $0.35 H_e \sim 1.08 H_e$;基坑最大水平位移平均值为 $2.73\%_0 H_e$,最大位移深度为 $0.7 H_e \sim 1.2 H_e$;基坑周边地表最大沉降约为最大水平位移的 $0.75 \sim 1.21$ 倍;地连墙插入比平均值为 1.45 ,插入比大小与基坑水平位移量和周边地表沉降量呈负相关。进而由基坑周边地表沉降和水平位移的统计分析结果,推导正态和偏态分布密度函数下的基坑周边地表沉降预测公式,并与实测结果进行对比,发现偏态分布密度函数下的预测方法更合理。这可为类似地层条件下的基坑周边地表沉降预测提供理论依据和工程指导。

关键词: 粉砂地层;地铁深基坑;地表沉降;水平位移;沉降预测

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2022)03-0261-09

Analysis and prediction of surface settlement around subway deep foundation pit in silty stratum

LUO Zhanyou¹, DING Kang¹, ZOU Baoping¹, ZHANG Fan², LI Bing²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the change law of surface settlement around the subway deep foundation pit in the typical silty stratum, taking dozens of subway deep foundation pit projects in Hangzhou area as examples, the change law of surface settlement and horizontal displacement around the foundation pit was analyzed through measured data, deducing the prediction model of surface settlement around the subway deep foundation pit in the silty stratum. The results show that the mean value of the maximum surface settlement around the foundation pit is $1.77\%_0 H_e$ (H_e as the excavation depth of the foundation pit), the maximum

收稿日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602308,41572299);浙江省自然科学基金项目(LY20E080005);浙江科技学院研究生教学改革研究项目(2019yjsjg01)

通信作者: 罗战友(1974—),男,河南省漯河人,教授,博士,主要从事隧道工程和岩土工程研究。E-mail: lzy0395@163.com。

settlement occurred between $0.35H_e$ and $1.08H_e$ behind the wall; the average value of the maximum horizontal displacement of the foundation pit is $2.73\% H_e$, and the maximum horizontal displacement depth is mainly distributed between $0.7H_e$ and $1.2H_e$; the maximum surface settlement around the foundation pit is approximately $0.75 - 1.21$ times of the maximum horizontal displacement; the average insertion ratio of diaphragm wall is 1.45 , in which the insertion ratio is negatively correlated with the horizontal displacement and the surface settlement around the foundation pit. Based on the statistical analysis results of surface settlement and horizontal displacement around the foundation pit, the prediction formulas were deduced with regard to surface settlement around the foundation pit under normal and skew distribution density function, and compared with the measured results. It is found that the prediction method under skew distribution density function is more reasonable. This provides a theoretical basis and engineering guidance for the prediction of surface settlement around the foundation pit under similar stratum conditions.

Keywords: silty stratum; subway deep foundation pit; surface settlement; horizontal displacement; settlement prediction

随着城市快速发展,深基坑工程施工环境及地质条件越来越复杂,工程安全要求越来越高。城市中环境复杂且地下管线及管廊工程众多,深基坑工程的施工必然会对邻近基坑建筑物和市政管线等产生不良影响,如沉降过大会引起建筑物下沉、管廊开裂等工程事故,因此深基坑开挖引起的周边地表沉降问题^[1]备受关注。

在深基坑周边地表沉降性状方面,Zahmatkesh 等^[2-3]结合大量实际工程数据,对比分析了多个基坑围护结构变形及基坑周边地表沉降的情况,总结出日本、欧洲各国等不同地区基坑水平位移及周边地表沉降的规律;钟俊辉等^[4-5]统计分析了福州和厦门等地多个基坑围护结构最大水平位移与墙后最大地表沉降之间的关系,总结出了相应地区深基坑开挖过程的变形规律;程康等^[6-7]对杭州地区某基坑的变形特征进行研究,总结出了软土地区基坑最大侧向水平位移与墙后最大地表沉降的范围及分布规律。

在深基坑周边地表沉降预测方面,宋楚平^[8]基于改进后反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)对基坑开挖过程中周边地表沉降进行预测,并与实测值进行了对比,发现改进后的预测方法能成功预测基坑施工未来 $2 \sim 5$ d 的变形情况,对基坑变形监测具有一定帮助;张尚根等^[9-10]采用正态分布密度函数公式对粉砂地层深基坑周边地表沉降进行计算,并结合工程实例进行了验证,发现正态分布法对基坑沉降的预测有较强的实用性;钟国强^[11]基于基坑地表最大沉降预测模型与实例对比计算验证其精度和泛化能力;李涛等^[12]、刘长文等^[13]分别基于二维平面计算方法和有限单元法得出基坑开挖引起的地表沉降计算方法,并运用实例分析了公式的合理性;王翠等^[14]依托天津地区某工程案例,结合有限元分析软件,采用正态分布密度函数推导了适合该地区的基坑周边地表沉降估算方法。

综上所述,国内外对基坑变形特性展开了大量研究,但对采用地连墙+内支撑围护体系的地铁深基坑研究还不充分,特别是针对粉砂地层地铁深基坑中的周边地表沉降统计分析和预测较少。因此,本研究结合杭州地区典型粉砂地层条件,对数十个深基坑剖面实测数据进行统计分析,以推导杭州地区典型粉砂土地层地铁深基坑周边地表沉降预测公式,为类似地层条件下的基坑周边地表沉降预测提供理论依据和工程指导。

1 杭州地区典型粉砂地层地铁深基坑实测数据

1.1 杭州地区典型粉砂地层及土工参数

杭州地区软土地区多指拱墅区、下城区和余杭区,滨江区、下沙区、萧山区等地区主要为粉砂地层。本研究统计的基坑案例属于粉砂地区,土层主要包括杂填土、粉土、粉砂、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、圆砾。土层分布及土工参数见表 1。

表 1 土层分布及土工参数

Table 1 Soil layer distribution and geotechnical parameters

序号	土层名称	土层厚度/m	天然重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	孔隙比	泊松比
①	杂填土	0.6~3.1	17.9	3.5	9.5	0.88	0.28
②	砂质粉土	0.8~5.1	19.2	8.4	26.9	0.80	0.31
③	粉砂	1.3~11.0	19.5	4.2	31.9	0.70	0.27
④	淤泥质粉质黏土	5.1~11.7	18.0	14.4	10.3	1.08	0.39
⑤	粉质黏土	4.5~10.4	17.9	20.2	11.2	1.09	0.37
⑥	圆砾	未揭穿	22.0	1.0	42.0		0.17

1.2 地铁深基坑围护结构形式及参数

杭州地区地铁深基坑常采用地连墙+内支撑相结合的围护体系,表 2 为地铁深基坑围护形式和参数统计表,主要涉及基坑尺寸、标准段开挖深度、围护结构深度、插入比等具体参数。

表 2 地铁深基坑围护形式和参数统计表

Table 2 Enclosure types and parameter statistics of subway deep foundation pit

序号	基坑名称	基坑平面尺寸/(m×m)	标准段开挖深度/m	开挖最大深度/m	围护结构深度/m	围护结构形式	插入比
①	新兴路站	519.20×21.70(25.80)	15.79	17.32	32.0	0.8 m 地连墙+内支撑 (部分采用 1.0 m 厚地连墙)	1.03
②	桥头堡站	352.66×20.00(27.40)	17.00	18.60	45.0	0.8 m 地连墙+内支撑 (部分采用 1.0 m 厚地连墙)	1.65
③	河景路站	229.96×21.70(25.80)	15.20	17.12	42.0	0.8 m 地连墙+内支撑	1.76
④	金家渡站	320.40×23.10(27.15)	24.90	27.60	56.0	1.0 m 地连墙+内支撑 (部分采用 1.2 m 厚地连墙)	1.20
⑤	义蓬东二路站	374.16×23.10(27.20)	17.31	19.19	25.0	0.8 m 地连墙+内支撑	0.44
⑥	新湾路站	624.16×21.70(27.40)	17.40	19.80	29.7	0.8 m 地连墙+内支撑	0.71
⑦	萧山机场站	535.50×71.40(80.00)	18.80	20.30	57.0	1.0 m 地连墙+内支撑	2.03
⑧	塘新线站	211.00×21.70(25.80)	16.50	18.19	52.0	0.8 m 地连墙+内支撑	2.24
⑨	青蓬路站	229.96×21.70(25.80)	15.80	17.50	42.0	0.8 m 地连墙+内支撑	1.66
⑩	河庄站	535.16×21.70(25.80)	17.80	19.70	50.0	0.8 m 地连墙+内支撑	1.81

1.3 基坑变形实测数据统计

为了获得地铁深基坑变形规律,对地铁深基坑数十个典型剖面的实测数据进行了统计分析,见表 3。

表 3 地铁深基坑工程变形实测数据

Table 3 Measured deformation data of subway deep foundation pit

序号	剖面	最大水平位移/mm	最大水平位移深度/m	地表最大沉降/mm	最大沉降与围护距离/m
①	1-1	45.16	15.5	31.16	7.0
	1-2	42.33	14.5	29.61	7.0
	1-3	44.25	15.5	35.45	17.0
	1-4	47.16	15.5	32.53	7.0
	1-5	39.99	14.5	27.19	2.0
②	2-1	31.04	15.5	30.46	7.0
	2-2	35.06	17.5	22.35	17.0
	2-3	48.12	19.0	20.18	7.0
	2-4	36.93	12.5	25.35	17.0
	2-5	65.81	15.5	23.92	2.0
③	3-1	21.96	13.5	29.88	7.0
	3-2	36.18	14.0	26.68	17.0
	3-3	27.77	14.5	20.67	7.0
	3-4	30.01	10.5	19.52	7.0
	3-5	30.87	15.5	28.86	7.0

表 3(续)

序号	剖面	最大水平位移/mm	最大水平位移深度/m	地表最大沉降/mm	最大沉降与围护距离/m
④	4-1	45.88	22.5	40.25	3.0
	4-2	39.87	21.5	39.94	10.5
	4-3	49.44	26.5	40.14	10.5
	4-4	51.21	23.5	39.67	10.5
	4-5	44.56	22.0	40.25	10.5
⑤	5-1	47.79	15.5	45.11	7.0
	5-2	37.82	17.5	52.72	7.0
	5-3	43.85	20.5	36.66	7.0
	5-4	53.59	18.5	45.05	12.0
	5-5	41.66	19.5	37.19	7.0
⑥	6-1	43.80	19.5	38.96	7.0
	6-2	53.41	13.0	40.94	15.0
	6-3	42.50	15.0	39.63	7.0
	6-4	60.14	16.0	37.42	15.0
	6-5	55.82	17.5	43.34	7.0
⑦	7-1	33.32	13.0	26.76	7.0
	7-2	32.96	14.5	26.85	15.0
	7-3	31.40	15.5	25.68	15.0
	7-4	34.12	13.5	25.21	7.0
	7-5	27.87	12.5	26.99	7.0
⑧	8-1	30.15	20.0	26.52	7.0
	8-2	35.38	16.5	28.02	12.0
	8-3	24.11	20.5	35.33	7.0
	8-4	31.77	16.0	21.93	12.0
	8-5	29.23	20.5	19.18	22.0
⑨	9-1	34.41	18.5	31.32	7.0
	9-2	27.26	17.5	27.26	17.0
	9-3	29.27	15.5	28.03	17.0
	9-4	28.43	16.0	17.88	7.0
	9-5	30.91	19.5	22.08	17.0
⑩	10-1	42.05	19.0	28.66	12.0
	10-2	42.88	16.5	22.30	7.0
	10-3	38.10	19.5	30.12	12.0
	10-4	29.03	19.0	23.77	7.0
	10-5	63.00	18.0	34.16	12.0

2 深基坑周边地表沉降及水平位移分析

深基坑变形受到开挖深度、土层性质、施工工况等多因素影响而呈现不同变形特点,主要表现在基坑周边地表沉降和水平位移两方面,图 1 为基坑周边地表沉降和水平位移示意图。图 1 中, H_e 为基坑开挖深度; H_d 为嵌固深度; δ_{vm} 为深基坑周边地表最大沉降量; δ_{hm} 为基坑最大水平位移; L_h 为最大水平位移对应深度; L_v 为最大沉降点墙后水平距离; x_0 为基坑开挖地表沉降影响范围; r 为沉降曲线计算影响半径; H 为围护结构深度; $\Delta\delta_2$ 为地连墙顶倾斜水平位移。

2.1 深基坑周边地表沉降分析

为了获得深基坑周边地表最大沉降与对应位置的变化规律,对表 3 中的沉降数据进行无量纲分析。基坑周

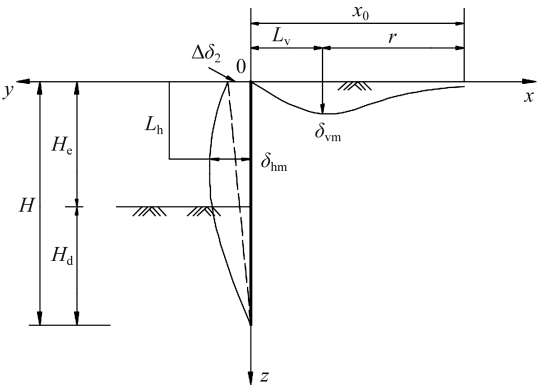


图 1 基坑周边地表沉降和水平位移示意图
Fig.1 Schematic diagram of surface settlement and horizontal displacement around foundation pit

边地表最大沉降分布情况如图2所示,由图可知:1)深基坑周边地表最大沉降为 $1.2\% H_e \sim 3.12\% H_e$,平均值约为 $1.77\% H_e$,主要集中在 $1.26\% H_e \sim 2.51\% H_e$;2)最大沉降为墙后距离 $0.11 H_e \sim 1.4 H_e$,平均值约为 $0.57 H_e$,主要分布在墙后距离 $0.35 H_e \sim 1.08 H_e$ 。杭州地区深基坑最大沉降相比谢锡荣等^[15]统计的金华地区最大沉降($0.035\% H_e$)更大,主要原因是杭州地区属于粉砂地层,而金华地区是土岩复合地层。

基坑地连墙插入比的最大值、最小值及平均值分别为2.24、0.44、1.45,相比福州、厦门多个深基坑地连墙插入比均值更大^[4~5]。图3为 δ_{vm}/H_e 与地连墙插入比的关系图,由图可知, δ_{vm}/H_e 随着地连墙插入比的增大呈现逐渐减小的趋势,后期趋于平缓。 δ_{vm}/H_e 与地连墙插入比 λ 可用如下公式拟合:

$$\delta_{vm} = \frac{(0.45\lambda^2 - 1.76\lambda + 3.2)H_e}{1\ 000} \quad (1)$$

式(1)中: λ 取值一般情况下为1~3。

由式(1)可知,通过增加插入比减小深基坑周边地表沉降变形的技术在技术上具有可行性,但实际工程中要结合工程造价、工期及施工难度等方面综合考虑。

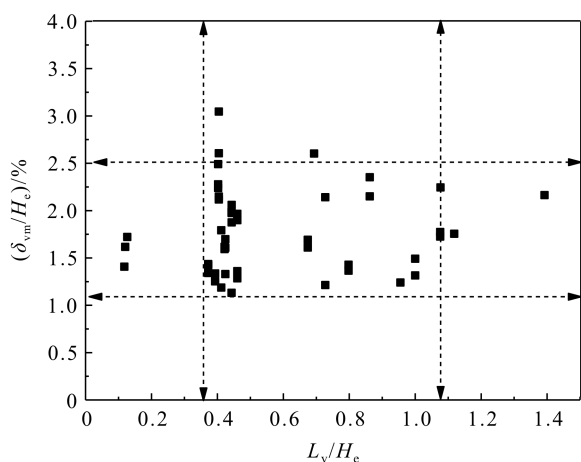


图2 基坑周边地表最大沉降分布情况

Fig. 2 Distribution of maximum surface settlement around foundation pit

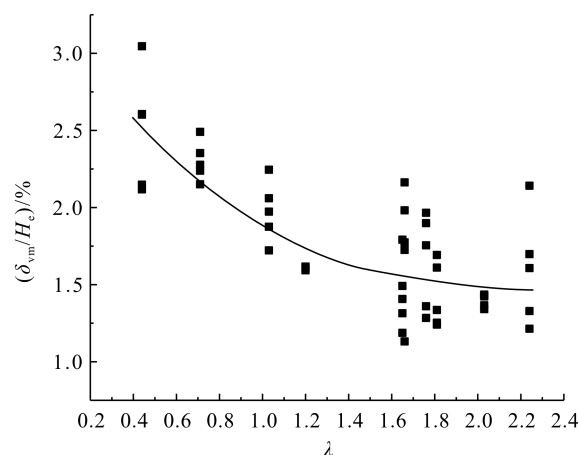


图3 δ_{vm}/H_e 与地连墙插入比的关系

Fig. 3 Relationship between δ_{vm}/H_e and insertion ratio of diaphragm wall

2.2 深基坑水平位移分析

基坑水平位移与基坑周边地表沉降密切相关,为了获得杭州地区典型粉砂地层深基坑的水平变形规律,对表3中的水平位移数据进行无量纲处理,基坑最大水平位移分布情况如图4所示,由图可知: δ_{hm} 约为 $1.49\% H_e \sim 3.91\% H_e$,平均值约为 $2.73\% H_e$,主要集中在 $1.6\% H_e \sim 3.25\% H_e$;基坑最大水平位移深度平均值约为 $0.95 H_e$,最大水平位移深度主要分布在 $0.7 H_e \sim 1.2 H_e$ 。

图5为 δ_{hm}/H_e 与地连墙插入比的关系图,由图可知, δ_{hm}/H_e 随地连墙插入比增大而逐渐减小,但减小趋势随地连墙插入比增大而逐渐变缓。基坑最大水平位移 δ_{hm} 在插入比大于1.6以后,位移减缓,再增加插入比,深层水平位移减少效果不理想,主要是深部的地连墙为负弯矩,两侧土压力性质发生改变所致。图5中存在个别监测点数据竖向比值接近4.0,主要原因是实际工程测量中人为因素极易造成个别环境监测数据出现失真现象。

基坑最大水平位移变化与地连墙插入比关系可用以下上限和下限公式拟合:

$$\delta_{hm}^1 = \frac{(1.03\lambda^2 - 3.20\lambda + 6.03)H_e}{1\ 000}; \quad (2)$$

$$\delta_{hm}^2 = \frac{(1.45\lambda^2 - 3.70\lambda + 4.70)H_e}{1\ 000} \quad (3)$$

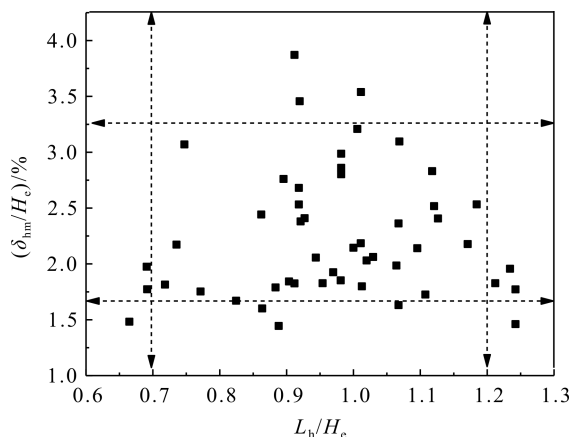


图 4 基坑最大水平位移分布情况

Fig. 4 Distribution of maximum horizontal displacement of foundation pit

2.3 深基坑周边地表沉降与水平位移的关系

由于深基坑工程中基坑周边地表沉降与水平位移存在较大关联,对表 3 中的实测数据进行无量纲处理,获得了周边地表沉降归一化指标 δ_{vm}/H_e 与水平位移归一化指标 δ_{hm}/H_e 之间的关系。 δ_{vm}/H_e 与 δ_{hm}/H_e 的关系如图 6 所示,由图可知: δ_{vm} 约为 δ_{hm} 的 0.75~1.21 倍,比韩焱等^[16]研究粉土、砂土等较好地层得出 δ_{vm} 为 0.5 δ_{hm} 的结果更大,这说明杭州地区粉砂地层深基坑周边地表沉降会对周边建筑物、地下管廊等产生较大的影响,需要采取措施严格控制地表变形以减少基坑开挖对周边环境的影响;杭州地区粉砂地层基坑周边地表沉降与水平位移随着开挖深度的增大呈线性增长。

3 深基坑变形预测

3.1 围护墙(桩)水平位移预测

假设深基坑地连墙水平位移由两部分组成:1) 墙体本身受土压力弯曲而产生的位移;2) 墙体整体倾斜产生的刚体位移。因此,可设深基坑最大水平位移如下:

$$\delta_{hm} = \delta_1 + \delta_2. \quad (4)$$

式(4)中: δ_1 为 L_h 处地连墙弯曲产生的水平位移; δ_2 为 L_h 处地连墙整体倾斜产生的水平位移。

由文献[17]可知支护结构位移包络曲线可看成抛物线,即

$$y_1 = Az^2 + Bz + C. \quad (5)$$

式(5)中: A 、 B 、 C 分别为常数项系数; z 为地连墙竖向深度。

将已知两点(0,0)、(H ,0)代入式(5)进一步求出

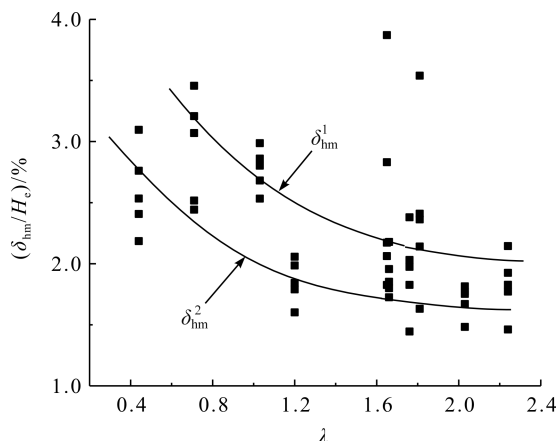
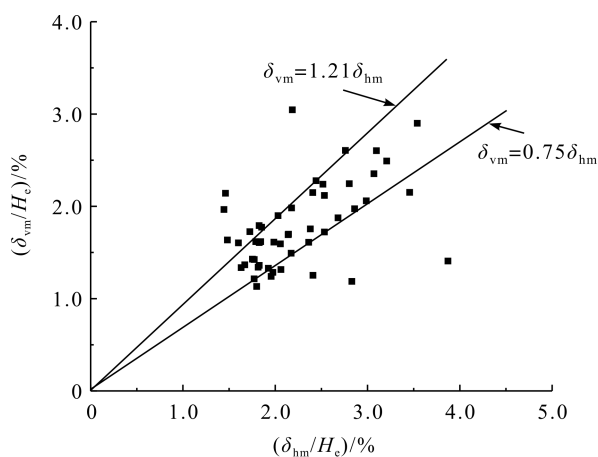
$$y_1 = Az^2 - AHz. \quad (6)$$

假设引起 δ_2 的线性方程为

$$y_2 = \Delta\delta_2 - \frac{z\Delta\delta_2}{H}. \quad (7)$$

δ_{hm} 与 δ_2 存在如下关系:

$$\Delta\delta_2 = D\delta_{hm}. \quad (8)$$

图 5 δ_{hm}/H_e 与地连墙插入比的关系Fig. 5 Relationship between δ_{hm}/H_e and insertion ratio of diaphragm wall图 6 δ_{vm}/H_e 与 δ_{hm}/H_e 的关系Fig. 6 Relationship between δ_{vm}/H_e and δ_{hm}/H_e

式(8)中; D 为常数项系数。

将式(8)代入式(7)后,联立式(4)、式(6)可得基坑地连墙水平位移包络曲线公式,即

$$y = y_1 + y_2 = \frac{AHz^2 - AH^2z}{H + zD - DH} \quad (9)$$

式(9)中; A 、 D 为经验系数,分别取0.075、-0.6,由表3中的基坑变形数据获得。

3.2 深基坑周边地表沉降预测

随着城市的高速发展,地铁深基坑施工面临的地质状况及作业环境越来越复杂,质量安全要求越来越高。城市地下复杂的管线及构筑物对地铁深基坑施工带来许多不良影响,因此深基坑施工所引起的周围地表沉降问题备受关注。由于不同地区土层性质的差异对深基坑围护结构及周围地表变形影响较大,因此本研究结合实测规律对原有理论公式进行改进,并与实测结果进行对比分析,验证改进公式的合理性。

3.2.1 正态分布法

设地表沉降曲线为正态分布^[9],即

$$\delta(x) = \delta_{vm} \exp\left[-\pi\left(\frac{x}{r}\right)^2\right] \quad (10)$$

式(10)中; x 为以最大沉降位置为原点的水平方向坐标; $\delta(x)$ 为 x 处地表沉降量; $r = x_0 - L_v$ 。

由图2和图6的统计规律可取 $L_v = 0.57H_e$ 、 $\delta_{vm} = 1.2\delta_{hm}$,代入式(10)得:

$$\delta(x) = 1.2\delta_{hm} \exp\left[-\frac{\pi x^2}{(x_0 - 0.57H_e)^2}\right] \quad (11)$$

将式(9)代入式(11)得到修正后正态分布沉降预测表达式,即

$$\delta(x) = \frac{0.09H_e^2 - 0.09HH_e}{1.6 - \frac{H_e}{H}} \exp\left[-\frac{\pi x^2}{(x_0 - 0.57H_e)^2}\right] \quad (12)$$

3.2.2 偏态分布法

设地表沉降曲线为偏态分布^[18],即

$$\delta(x) = \frac{S_w}{\sqrt{2\pi}wx} \exp\left[-\frac{\left(\ln \frac{x}{2L_v}\right)^2}{2w^2}\right] \quad (13)$$

式(13)中; x 为待求沉降点距坑边水平距离; S_w 为沉降曲线包络面积; w 为经验系数。

由于不同地区经验系数 w 存在一定区别,现对 w 进行修正。对式(13)进行一阶求导可得:

$$\delta'(x) = \exp\left(-\frac{1}{2w^2} \ln^2 \frac{x}{2L_v}\right) \left[-\frac{S_w}{\sqrt{2\pi}w} \frac{\frac{1}{w^2} \ln \frac{x}{2L_v} + 1}{x^2}\right] \quad (14)$$

由于 $\delta(x)$ 取极值时 $\delta'(x) = 0$,由图2可得; x 为 L_v ,取 $0.57H_e$,代入式(14)求出经验值 w 为0.91。

设沉降曲线包络面积存在如下关系^[19]:

$$S_w = \beta S_p \quad (15)$$

式(15)中; S_p 为基坑围护结构水平位移包络曲线面积; β 为比例系数,根据统计分析结果及经验,当插入比 $H_d/H_e \leq 0.5$ 时, β 可取1.0~1.2,当插入比 $H_d/H_e > 0.5$ 时, β 可取0.8~1.0。本研究统计杭州地区深基坑插入比平均值为1.45,因此参数 β 取1.0。

由式(9)积分求得:

$$S_p = \left| \int_0^H y(z) dz \right| = 0.0109H^3 - 0.0056H^2 \quad (16)$$

将式(15)、式(16)代入式(13)得到修正后偏态分布沉降预测表达式,即

$$\delta(x) = \frac{0.0109H^3 - 0.0056H^2}{2.28x} \exp\left[-\frac{\left(\ln \frac{x}{1.14H_e}\right)^2}{1.66}\right] \quad (17)$$

3.3 深基坑周边地表沉降预测值与工程实测值对比

为了验证预测公式的合理性,选取塘新线站、青蓬路站基坑工程中相应参数进行预测和验证。基坑地表沉降影响范围 x_0 取 $3.0H_e$ [20], 分别将基坑开挖深度 H_e 及围护结构深度 H 代入式(12)与式(17)进行计算,将两种预测方法计算结果与塘新线站、青蓬站实测结果进行对比分析,正态、偏态分布下沉降估算结果及实测值对比如图 7 所示。由图 7 可知:1) 正态、偏态分布下沉降预测曲线及实测分布曲线均呈现明显“凹槽”形,说明两种沉降预测方法均符合一般地铁深基坑周边地表沉降分布规律;2) 采用偏态分布的沉降预测结果与实际工程更符合,说明基坑开挖引起的周边地表沉降更接近不对称偏态分布,因此,杭州地区粉砂地层地铁深基坑地表沉降预测可采用偏态分布进行预测。

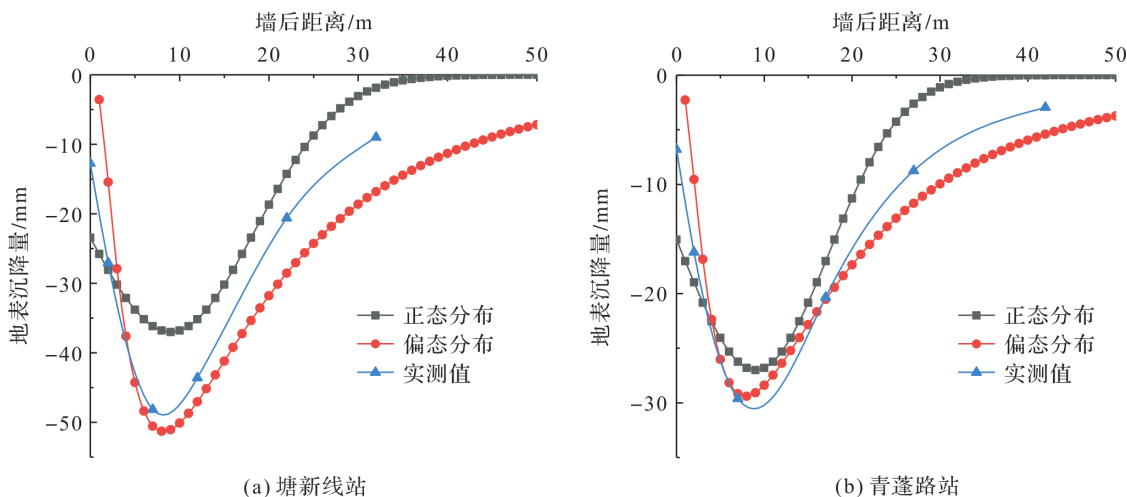


图 7 正态、偏态分布下沉降估算结果与实测值对比

Fig. 7 Comparison of settlement estimation results and measured values under normal and skew distribution

4 结 论

基于杭州地区粉砂地层多个深基坑工程实测数据,分析了深基坑周边地表沉降和水平位移的变形性状,推导了正态及偏态分布下基坑周边地表沉降的预测公式,并与实测结果进行对比。主要结论如下:

1) 杭州地区粉砂地层地铁深基坑周边地表最大沉降均值为 $1.77\%H_e$, 基坑最大水平位移平均值为 $2.73\%H_e$ 。周边地表最大沉降整体上随着地连墙最大水平位移的增加而增大,基坑地表最大沉降约为最大水平位移的 $0.75\sim 1.21$ 倍;

2) 地铁深基坑周边地表最大沉降和水平位移整体上随地连墙插入比的增大而减小,且后期趋于平缓,说明插入比对基坑沉降控制存在一定极限,因此可适当增大插入比以控制基坑变形对周边环境的影响;

3) 推导了正态和偏态分布密度函数下的杭州地区粉砂地层地铁深基坑周边地表沉降预测方法,并与实测结果进行对比,发现偏态分布密度函数下沉降预测方法更加合理。

本研究沉降预测理论公式只针对粉砂地层,但深基坑开挖涉及地层种类广泛,对于其他地层下深基坑开挖的沉降预测还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 楼春晖,夏唐代,刘念武. 软土地区基坑对周边环境影响空间效应分析[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊 1):251.
- [2] ZAHMATKESH A, CHOBBASTI A J. Evaluation of wall deflections and ground surface settlements in deep excavations[J]. Arabian Journal of Geosciences,2015(8):3062.
- [3] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,127(3):214.

- [4] 钟俊辉,尹培林,滕超,等.福州软土地区地铁车站基坑墙体变形特性分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(增刊2):824-825.
- [5] 李少波.厦门地区地铁深基坑变形特征实测统计分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊1):382-383.
- [6] 程康,徐日庆,应宏伟,等.杭州软黏土地区某30.2m深大基坑开挖性状实测分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(4):862.
- [7] 朱建才,朱亦弘,王旭,等.杭州某软土超深基坑变形性状研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(增刊1):341.
- [8] 宋楚平.一种改进的BP神经网络深基坑变形预测方法[J].土木工程与管理学报,2019,36(5):49.
- [9] 张尚根,陈志龙,曹继勇.深基坑周围地表沉降分析[J].岩土工程技术,1999(4):7.
- [10] 李鑫,邹豫皖.软土基坑周围地表沉降估算[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2014,32(2):204-205.
- [11] 钟国强,王浩,李莉,等.基于SFLA-GRNN模型的基坑地表最大沉降预测[J].岩土力学,2019,40(2):797.
- [12] 李涛,杨依伟,贾奥运,等.空间效应下狭长深基坑地表三维变形预测[J].中国矿业大学学报,2020,49(6):1104.
- [13] 刘长文,陈怿凡,李旭东.考虑空间效应的深基坑周围地表沉降分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000(2):145.
- [14] 王翠.天津地区地铁深基坑变形及地表沉降研究[D].天津:天津大学,2005.
- [15] 谢锡荣,王立峰,韦康,等.土岩组合地层地铁深基坑开挖性状分析及预测[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊1):250.
- [16] 韩焯,王鑫.北京地区深基坑工程引起地表沉降规律研究[J].建筑科学,2020,36(增刊1):189.
- [17] 张珂峰,吴昌将,易礼.“两墙合一”地下连续墙基坑开挖对邻近建筑的变形影响与实测分析[J].建筑结构,2020,50(20):130.
- [18] 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(8):1219.
- [19] 张可能.深基坑开挖与支护工程设计计算与施工[M].武汉:中国地质大学出版社,1997:113.
- [20] 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 & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7):993.