

上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析

王卫东¹, 徐中华¹, 王建华²

(1. 华东建筑设计研究院地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200030)

摘要: 收集了上海软土地区 35 个具有墙后地表沉降实测资料的深基坑工程案例, 从统计角度研究了深基坑的墙后地表变形性状。最大地表沉降随着开挖深度的增大而增大, 其值介于 $0.1\%H \sim 0.8\%H$ 之间, 平均值为 $0.38\%H$, 其中 H 为基坑开挖深度。影响因素分析表明最大地表沉降随着墙后软土层厚度的增大而增大, 随着坑底抗隆起稳定系数的增加而减小, 而与围护墙的插入比及支撑系统刚度的关系不大。最大地表沉降与最大墙体侧移的比值基本介于 $0.4 \sim 2.0$ 之间, 其平均值约为 0.84。统计了墙后地表沉降的分布模式, 给出了墙后地表沉降的包络线。最大地表倾斜量介于 $0.001 \sim 0.017$ 之间, 给出了根据最大地表沉降量来预测最大地表倾斜量的统计关系。

关键词: 深基坑; 地表沉降; 统计分析; 软土

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)11-1659-08

作者简介: 王卫东(1969-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事基坑及桩基的设计与研究工作。

E-mail: weidong_wang@ecadi.com。

Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils

WANG Wei-dong¹, XU Zhong-hua¹, WANG Jian-hua²

(1. Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils are studied based on a database of 35 case histories. The magnitude of the maximum ground surface settlement generally increases with the increase of excavation depth. Values of the maximum ground surface settlement generally range from $0.1\%H$ to $0.8\%H$, with an average value of $0.38\%H$, where H is the excavation depth. The maximum ground surface settlements increase with the increase of the thickness of soft soils above wall toe, but decrease with the increase of the factor of safety against basal heave. The maximum ground surface settlement is independent of the system stiffness of the retaining system and the embedded depth ratio of retaining wall. The lower and upper bound values of the ratio between the maximum ground surface settlement and the maximum lateral displacement of wall are 0.4 and 2.0, respectively, with an average value of 0.84. Distribution of the ground settlement is analyzed. The upper bounds of the ground settlement profiles are proposed for the case histories in Shanghai. The maximum ground surface distortion ranges from 0.001 to 0.017. Relationship between the maximum ground surface distortion and the maximum ground surface settlement is also established.

Key words: deep excavation; ground settlement; statistical analysis; soft clay

0 引言

近年来,随着上海地区建设事业的飞速发展,越来越多的基坑工程紧邻建筑物、地铁隧道、地铁站、地下管线等。基坑开挖必然会引致周边地层不同程度的移动,从而对基坑周边的建(构)筑物产生不同程度的影响,这使得基坑工程的环境保护问题日显突出。在这种情况下,预测基坑开挖引起的地表沉降成为工程师必须面对的工作。

预测墙后的地表沉降主要有两种方法,即有限元

方法和经验方法。目前有限元方法已经广泛地在基坑工程中得到应用,其在预测围护墙的侧移方面一般能达到较好的精度,但在预测墙后地表沉降方面则往往效果较差。部分原因是难以较好地模拟土体的变形行为、墙体与土体之间的接触面以及选择合适的计算参数^[1]。近年来, Simpson 等^[2]、Whittle 等^[3]、Hight 等^[4]、Finno 等^[5]的研究表明考虑土体在小应变时的变形

基金项目:上海市科学技术委员会科技攻关重点项目(08201200900)

收稿日期:2010-08-23

行为能显著地提高预测墙后地表沉降的精度,但小应变本构关系往往需要高质量的实验设备确定计算参数,从目前来看,直接应用于工程设计尚有距离。经验方法基于多个基坑工程案例的实测资料,采用统计分析的方法,探讨地表沉降形态及沉降量与基坑有关物理力学参数之间的关系。许多学者如 Peck^[6]、Mana 等^[7]、Clough 等^[8]、Ou^[9]、Hsieh 等^[11]、Long^[10]、Moormann^[11]、Leung 等^[12]等均采用经验方法对基坑开挖引起的地表沉降进行了研究,相关的研究成果对于理解墙后地表的变形性状、预测墙后地表沉降及用于数值分析结果的校验等发挥了积极的作用。

由于基坑工程具有很强的区域特性,各个地区的地层条件、支护方式、设计与施工技术水平等存在差异,因此基于其它地区基坑工程墙后地表沉降数据统计得到的规律是否适用于上海地区的沉降变形预测尚有待进一步研究。虽然自 20 世纪 90 年代以来上海地区已经完成了大量基坑工程的施工,但是关于墙后地表沉降实测的资料并不多见,因而相关的文献一般只是侧重于单个工程案例数据的分析,尚缺乏较多基坑工程案例实测数据的统计分析。本文在收集上海地区已经成功实践的 35 个具有地表沉降实测资料的基坑工程案例的基础上,对上海软土地区基坑的墙后地表沉降特性进行统计分析,并研究相关因素对地表沉降的影响规律,以期为基坑工程的设计提供参考。

1 工程案例的收集

收集了上海地区 35 个具有墙后地表实测数据的深基坑工程案例,如表 1 所示。数据包括基坑开挖的深度(H)、软土层顶面埋深(h_{st})、软土层厚度(h_s)、围护结构的形式、围护墙的深度(H_w)与抗弯刚度(EI)、水平支撑情况与平均支撑间距(h)、坑底抗隆起稳定系数(F_s)、围护墙的最大侧移(δ_{hm})及墙后地表最大沉降(δ_{vm})。其中软土层的厚度是指上海地区软弱的第 1 层淤泥质粉质黏土土层和第 2 层淤泥质黏土层的厚度之和。有关符号的定义如图 1 所示。

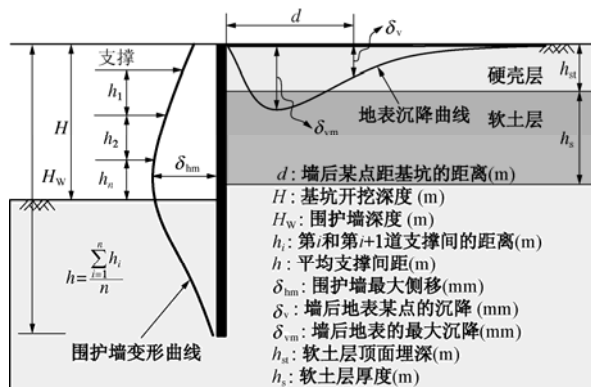


图 1 有关变量的意义

Fig. 1 Definition of excavation variables

所收集的工程案例的支护形式全部为板式支护,其中采用地下连续墙围护的基坑 26 个,采用钻孔灌注桩围护的基坑 7 个,采用 SMW 工法的基坑 2 个,基本包含了上海地区常用的板式支护形式。

2 最大地表沉降分析

2.1 最大地表沉降

图 2 为墙后最大地表沉降与开挖深度之间的关系。从图 2 中可以看出,最大地表沉降随着开挖深度的增大而呈现出增大的趋势,其大小基本介于 $0.1\%H$ 与 $0.8\%H$ 之间,平均值为 $0.38\%H$;这远小于 Moormann^[11] 统计的软黏土地层中大量基坑的最大地表沉降(基本介于 $0.5\%H \sim 2.0\%H$, 平均值约为 $1.0\%H$),也小于 Long^[10] 统计的墙后软土层厚度大于 $0.6H$ 且开挖面为软土地层中基坑的最大地表沉降(平均值约为 $0.8\%H$),表明上海地区的基坑能较好地控制墙后的地表沉降;但大于 Clough 等^[8] 统计的硬黏土、残积土及砂土地层中基坑的最大地表沉降(基本介于 $0 \sim 0.5\%H$, 平均值约为 $0.15\%H$),更大于 Leung 等^[12] 统计的香港地区混合地层(包括填土、海相沉积土及风化岩)中基坑的最大地表沉降(基本小于 $0.2\%H$)。这也说明地层条件是影响地表沉降的重要因素。

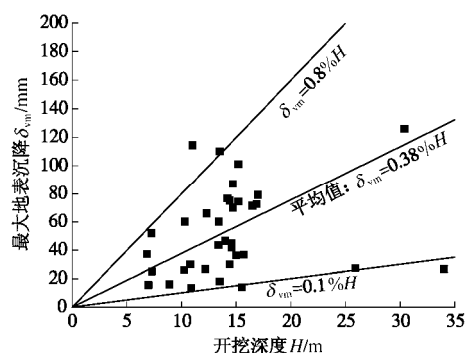


图 2 最大地表沉降与开挖深度之间的关系

Fig. 2 Relationship between maximum ground settlement and excavation depth

2.2 墙底以上软土厚度对最大地表沉降的影响

上海地区的第 1 层淤泥质粉质黏土层和第 2 层淤泥质黏土层三轴不排水剪(UU)的抗剪强度仅为 $18 \sim 44$ kPa,其强度低、变形大、灵敏度高,且具有流变特性,因而对基坑的变形影响较大。定义围护墙底以上软土厚度为 h_{sw} ,则 h_{sw} 可通过软土层顶面埋深 h_{st} 、墙体的深度 H_w 及软土层厚度 h_s 由下式算出:

$$\begin{cases} h_{sw} = h_s & (h_{st} + h_s \leq H_w) \\ h_{sw} = H_w - h_{st} & (h_{st} + h_s > H_w) \end{cases} \quad (1)$$

将墙底以上软土厚度与墙体深度的比值 h_{sw}/H_w 作为横坐标,最大地表沉降与开挖深度的比值 δ_{vm}/H (无量

表 1 上海软土地区深基坑围护墙后地表沉降的有关数据

Table 1 Data of ground surface settlement of deep excavations in Shanghai soft soils

编号	工程名称	H/m	h_{st}/m	h_{s}/m	H_{w}/m	$EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$	h/m	F_{s}	$\delta_{\text{hm}}/\text{mm}$	$\delta_{\text{vm}}/\text{mm}$
1	上海明天广场*	14.6	3.4	13.1	28	2,630,000	4.87	2.16	20.9	45
2	地铁 R1 线陕西南路站*	14.2	0	10	30	1,280,000	—	—	64.5	76.7
3	上海铁路南站南广场*	13.38	3.12	12.8	25.4	1,280,000	6.4	—	26	43.6
4	兴业银行东侧**	12.2	2.95	14.2	25.2	1,280,000	4.1	2.62	36.1	26.7
5	地铁 R1 线常熟路车站*	14.4	3	12	26.84	1,280,000	—	—	23.5	75
6	由由国际广场**(钻孔灌注桩支护)	10.9	9.6	1.3	21.95	602,880	5.5	1.69	28.24	13.48
7	上海徐汇商城*	13.4	—	—	26	1,280,000	3.92	—	100	60
8	上海南洋广场*	15.7	3.7	16.3	30.5	2,500,000	4.67	3.44	45.45	36.8
9	地铁明珠二期宜山路站*	15.5	5	13	28	540,000	2.8	—	38	13.95
10	上海地铁 R1 线上体馆站*	14	2.89	12.4	25.96	1,280,000	3.23	—	50	46.5
11	M8 线黄兴路车站*	14.7	9.2	10.4	26.5	540,000	3.5	2.59	39.2	70
12	上海外滩金融中心*	16.87	2.75	14.8	32	2,500,000	4.96	—	101.9	72.4
13	2 号线河南中路站标准段*	15.2	2	11.3	30.4	1,280,000	2.53	—	97.8	101
14	地铁 R1 线人民广场站*	13.5	—	—	24.4	1,280,000	—	1.5	72.5	110
15	地铁 R1 线漕宝路站*	12.3	—	—	18.5	686,560	4.1	—	51.4	66
16	同济大学图书馆*	8.9	2.7	27.8	16.5	540,000	2.18	—	27	16
17	亚龙投资(集团)有限公司总部大楼*	13.5	3.3	9.1	24.75	1,280,000	4	2.7	18.94	18
18	胜康廖氏大厦*	11	2.56	14.89	22.3	1,280,000	3.33	2.41	89	114.3
19	外环隧道浦西基坑工程*	30.4	10.08	9.6	44	4,320,000	4.7	—	123	125.86
20	地铁 R1 线徐家汇车站*	17	7	8.3	30	1,280,000	3.1	1.5	167	79
21	地铁 R2 中央公园站*	15	6.8	11.8	26	540,000	3.38	2.28	50	36.4
22	M8 线延吉中路站标准段*	14.42	9.25	8.65	27	1,280,000	3.26	—	70	30
23	招商大厦*(钻孔灌注桩支护)	10.3	2.8	14.7	26	1,471,900	4.08	1.88	71	60
24	上海港汇广场*(钻孔灌注桩支护)	14.7	4.08	12.18	30	1,471,900	4.23	1.92	98.6	87
25	坤阳国际商务广场*(钻孔灌注桩支护)	7.25	4.8	9.5	18	602,880	4.55	—	57	52
26	卢湾 117 地块基坑*(钻孔灌注桩支护)	6.85	3.5	13	12.7	602,880	4.95	—	30.5	37.2
27	上海金穗大厦*(钻孔灌注桩支护)	10.25	3	14.56	21	900,000	4.13	—	63	26
28	永银大厦*(钻孔灌注桩支护)	10.8	3.67	14.6	24	919,700	5.18	1.7	62.5	30
29	上海某大厦*(SMW 工法)	7	3.2	11.86	12	69,300	3	—	27.5	15.5
30	申海大厦*(SMW 工法)	7.3	3.15	11.55	12	306,600	2.8	—	28	25
31	7 号线常熟路站南端头井 ^[13]	25.9	3.9	14.8	52	2,500,000	3.08	—	27.5	27.3
32	10 号线某车站标准段 ^[14]	14.6	—	—	27.5	540,000	3.55	—	48.22	41.7
33	浦电路站 ^[15]	16.5	—	—	26.5	540,000	3.02	—	64.2	71.5
34	延长路站 ^[15]	15.2	—	—	27	540,000	3.3	—	62.6	74.3
35	上海世博 500kV 地下变电站**	34	3.45	14	57.5	4,320,000	4.53	—	43.98	26.7

注：1. 标有*号的案例已在文献[16]中列出其具体的参考文献；2. 标有**号的案例为华东建筑设计研究院内部资料。3. 由于上海的地区基坑环境保护要求一般较高，因此上海地区的基坑工程普遍采用隔水帷幕进行止水（隔水帷幕进入相对不透水层），并在坑内进行降水。由于上海浅层土层以黏性土为主，在隔水帷幕的作用下，坑内降水一般不会引起坑外地下水位的大幅变化，因此基坑的降水对地表沉降的影响很小。本表所收集的基坑全部采用隔水帷幕进行止水，然后在坑内进行疏干降水，降水对抗外地表沉降影响基本可以忽略。

纲化最大地表沉降)作为纵坐标，绘出墙底以上软土厚度与最大沉降的关系如图 3 所示。虽然数据离散性较大，但大致可以看出，随着墙底以上软土厚度的增大，最大沉降有增大的趋势。

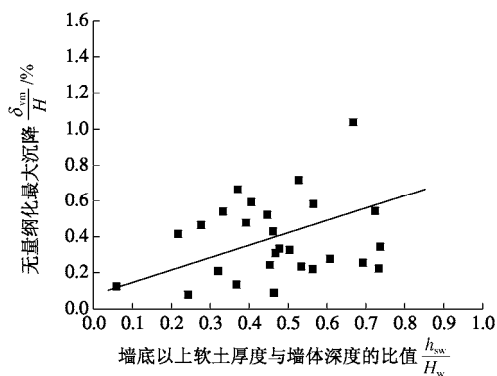


图3 墙底以上软土厚度对最大地表沉降的影响

Fig. 3 Effect of thickness of soft soil above wall toe on normalized maximum ground settlement

2.3 插入比对最大地表沉降的影响

定义围护墙的插入比为坑底以下的围护墙深度与基坑开挖深度的比值,即为 $(H_w - H)/H$ 。一般认为增大插入比能起到控制基坑变形的作用。图4给出了无量纲化最大地表沉降与围护墙的插入比之间的关系。大部分基坑的插入比介于0.7~1.1之间,平均值为0.9。从图4中可以看出,数据点的离散性很大,至少在插入比大于0.7后,最大地表沉降与围护墙插入比并无显著的关系,说明插入比对地表沉降的影响很小。

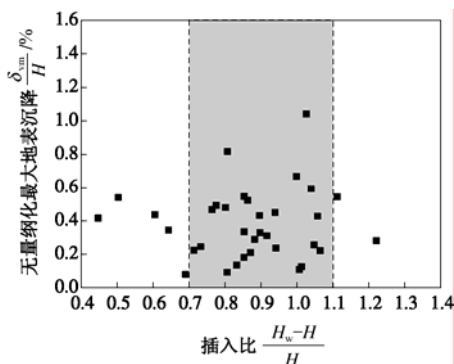


图4 围护结构插入比对最大地表沉降的影响

Fig. 4 Effect of embedded depth ratio on normalized maximum ground settlement

Hashash 等^[14]基于 MIT-E3 模型采用有限元分析研究了围护墙的深度对地表沉降的影响如图5所示。从图5中可以看出,当开挖深度为15 m时,围护墙深度为20 m的基坑(对应的插入比为0.33)和围护墙深度为40 m的基坑(对应的插入比为1.67)的最大地表沉降分别为47.8, 40.8 mm;当开挖深度为10 m时,围护墙深度为20 m的基坑(对应的插入比为1.0)和围护墙深度为40 m的基坑(对应的插入比为3.0)的最大地表沉降分别为19.9, 22.6 mm,这表明围护墙的深度对地表沉降的影响并不大。Hashash 的理论分析与上海地区的实测地表沉降所反映的规律基本一致,表明提高插入比并不能有效地起到减少地表沉降

的作用。

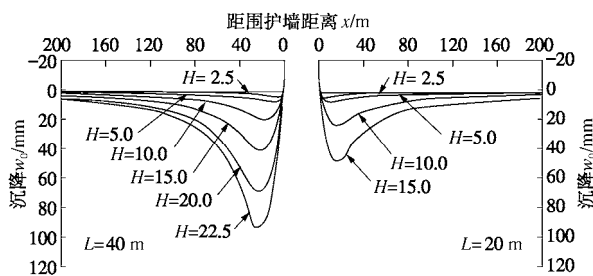
图5 围护墙深度对地表沉降的影响 (Hashash 等^[17])

Fig. 5 Effect of wall length on ground surface settlement (Hashash^[17])

2.4 支撑系统刚度对最大地表沉降的影响

Clough 等^[18]、Goldberg 等^[19]、Addenbrooke 等^[20]的研究表明,支撑系统的刚度是影响基坑变形的重要因素。支撑系统的刚度与围护墙的抗弯刚度、水平支撑的抗压刚度、支撑的位置及支撑的间距密切相关。图6给出了无量纲化最大地表沉降与平均支撑间距的关系,其中平均支撑间距的定义如图1所示。所收集案例的平均支撑间距基本介于3~5 m,其平均值为3.87 m。从图6中可以看出,最大地表沉降与平均支撑间距并无显著的关系。图7给出了无量纲化最大侧移与Clough 等^[8]定义的支撑系统刚度 $EI/\gamma_w h^4$ (其中 γ_w 为水的重度)之间的关系。从图7中可以看出,支撑系统刚度大于100以后,墙后地表沉降与支撑系统刚度的关系不大,这与Leung 等^[12]统计的香港地区混合地层中基坑地表沉降的规律一致。

支撑系统刚度与实测地表沉降的这种统计关系对于基坑工程设计的经济性有重要的意义。它表明,支撑系统刚度与地表沉降无直接(至少无线性)关系,即显著地增大支撑系统的刚度并不能相应地减少地表沉降。这个统计结果与工程实践中经常采用的通过采用刚度很大的围护结构来控制地表沉降的经验作法并不一致。这或许也说明目前的支撑刚度可能已经达到了一个较高的水平,再增加刚度已难以对本身就不算很大的地表沉降产生显著的影响。

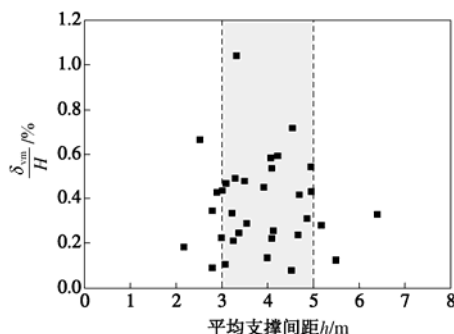


图6 平均支撑间距与最大地表沉降的关系

Fig. 6 Normalized ground settlement versus average spacing of struts

软土地层中支撑间距与支撑系统刚度对地表沉降影响不大的原因尚难以辨别。但至少可以说明,除了支撑系统的刚度外,还有其它更复杂的因素对基坑的变形产生影响。实际的基坑工程中,基坑的几何形状、地层条件、施工方法与工艺水平、开挖顺序、基坑降水、持续时间及不可预见因素等均会对地表沉降产生不同程度的影响。

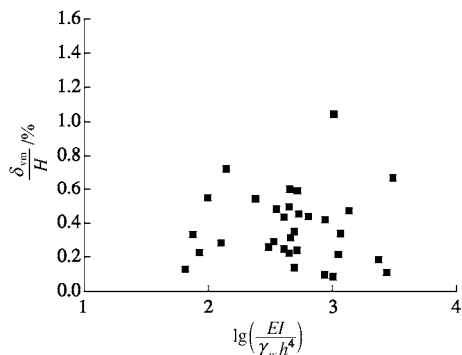


图 7 支撑系统刚度与最大地表沉降的关系

Fig. 7 Normalized maximum ground settlement versus system stiffness

2.5 坑底抗隆起稳定系数对最大地表沉降影响

Mana 等^[7]认为坑底抗隆起稳定系数 F_S 不仅与围护结构的最大侧移有关,而且也与墙后最大地表沉降有关,并通过有限元计算给出了根据 F_S 来预测墙后最大地表沉降的曲线。Mana 采用了 Terzaghi^[21]给出的 F_S 计算方法。由于上海地区的基坑工程均按上海市基坑工程设计规程^[22]推荐的方法计算 F_S ,因此本文讨论 F_S 对地表沉降的影响时, F_S 均按上海市基坑工程设计规程推荐的方法计算。表 1 给出了部分基坑工程案例的 F_S 。

图 8 为本文统计的墙后最大地表沉降与 F_S 之间的关系,Mana 等^[7]的理论预测曲线亦在图中绘出。总体而言,墙后最大地表沉降随着 F_S 的增大而呈现出减小的趋势,并且大多数数据点落于 Mana 等的理论预测曲线的上部,说明采用 Mana 等的理论曲线来预测上海地区基坑的最大地表沉降时结果会偏小。图 8 通过将 Mana 等的理论预测曲线适当平移,给出了根据 F_S 预测上海地区最大地表沉降的上、下限。

2.6 最大地表沉降与最大墙体侧移的关系

影响基坑变形的因素很多,这些因素不仅影响墙后地表的沉降,也影响围护结构的侧移,因而墙后地表沉降与围护结构的变形密切相关。建立墙后地表沉降与围护结构侧移之间的关系后,就可以通过围护结构的侧移来预测墙后地表的沉降。在地表最大沉降与围护结构最大侧移的关系方面,Goldberg^[19]的统计结果表明,不管是砂土、硬黏土还是软黏土,最大地表

沉降大部分等于 0.5 ~ 1.5 倍的最大墙体侧移,但也有超过 2 倍的情况。Mana 等^[7]的统计表明黏土地层中的基坑最大沉降 δ_{vm} 等于 0.5 ~ 1.0 倍的最大墙体侧移 δ_{hm} 。Ou^[8]统计的台北盆地 10 个基坑的数据表明最大地表沉降大多落在 $0.5 \delta_{hm}$ 和 $0.7 \delta_{hm}$ 之间,其上限为 δ_{hm} 。Moormann^[11]统计的结果表明软黏土中 δ_{vm} 一般为 $0.5 \delta_{hm} \sim 2.0 \delta_{hm}$,平均约为 1.0。

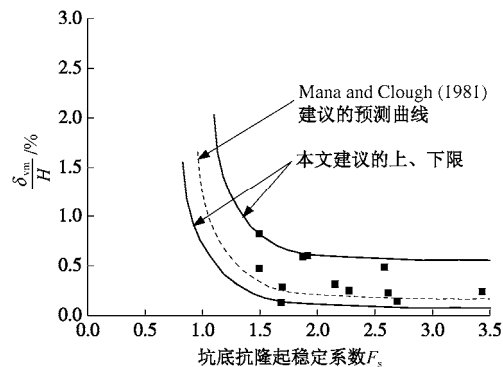


图 8 最大地表沉降与坑底抗隆起稳定系数 F_S 的关系

Fig. 8 Relationship between normalized maximum ground surface and F_S

图 9 为上海地区基坑的无量纲化最大地表沉降与无量纲化的最大墙体侧移之间的关系。从图 9 中可以看出,数据的离散性较大, δ_{vm} 基本介于 $0.4 \delta_{hm}$ 和 $2.0 \delta_{hm}$ 之间,平均值为 $0.84 \delta_{hm}$,这与 Moormann^[11]针对软黏土的统计规律很接近。

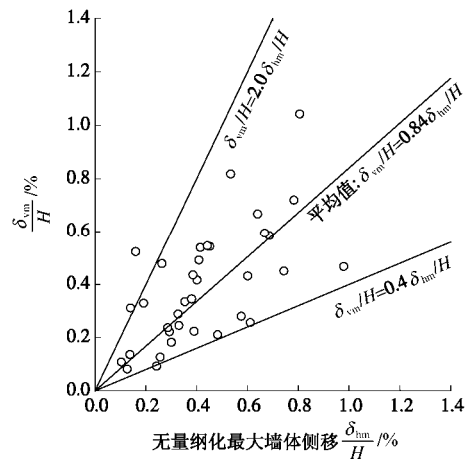


图 9 地表最大沉降与墙体最大侧移的关系

Fig. 9 Relationship between maximum ground surface settlement and maximum lateral displacement of wall

3 地表沉降分布模式及地表倾斜量

3.1 地表沉降分布模式

表 1 所收集的工程案例中有 21 个工程具有墙后地表的沉降曲线,图 10 给出了这些案例的墙后地表沉降的分布情况。其中横轴为墙后某点距基坑的距离 d 与

基坑开挖深度 H 之间的比值,而纵轴为无量纲化地表沉降(某点的沉降 δ_v 与基坑开挖深度 H 的比值)。从图中可以看出,除了两个工程的地表沉降呈现出三角形分布外,其余工程的地表沉降均为凹槽形分布。图中还给出了根据这些数据点的分布情况确定的地表沉降包络线,可由三折线表示,表达式为

$$\begin{cases} \frac{\delta_v}{H} = 0.5 + 0.8 \frac{d}{H} & (0 \leq \frac{d}{H} < 0.5) \\ \frac{\delta_v}{H} = 1.167 - 0.533 \frac{d}{H} & (0.5 \leq \frac{d}{H} < 2.0) \\ \frac{\delta_v}{H} = 0.2 - 0.05 \frac{d}{H} & (2.0 \leq \frac{d}{H} < 4) \end{cases} \quad (2)$$

其中 δ_v/H 为百分数。该包络线可用来预测上海地区基坑开挖可能引起的最大的地表沉降。

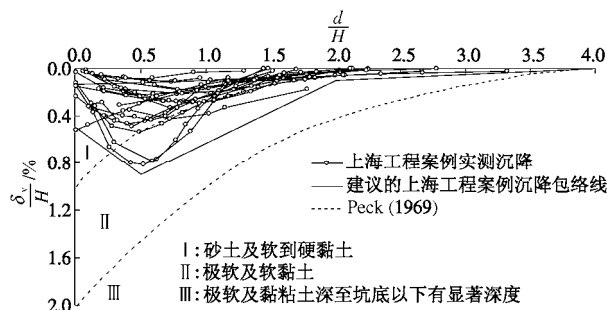


图 10 采用开挖深度进行无量纲化的墙后地表沉降分布

Fig. 10 Distribution of ground settlement normalized by excavation depth

Peck^[6]绘制了类似的墙后沉降分布图,根据土层和支撑条件将墙后地表沉降数据分成 3 类,分别给出了 I、II、III 区的沉降范围。图 10 中同时画出了 Peck 的分区沉降范围。从图 10 中可以看出,上海地区地表沉降的数据点绝大部分落于 Peck 所分的 I 区范围内,只有很少部分数据点落在 II 区范围内。本文统计的基坑为上海软土地层条件,而 Peck 的 I 区对应的土层条件为砂土及软到硬黏土,II、III 区对应的地层条件才与上海地区的地层条件相似。这表明在相似的地层条件下上海地区的地表沉降要较 Peck 统计的沉降小得多,这可能是由于 Peck 所统计的基坑的主要围护形式为钢板桩等柔性支护体系,而这里统计的上海地区的基坑是采用地下连续墙、钻孔灌注桩和 SMW 工法等刚度较大的围护结构的缘故,此外 Peck 的数据是根据 40 多年前的基坑工程案例,经过几十年的发展,现在的基坑工程施工技术与工艺水平也要较原来提高很多,从而在变形控制方面更加有效。

将墙后地表沉降 (δ_v) 与最大地表沉降 (δ_{vm}) 的比值作为纵轴,而横轴仍为墙后某点距基坑的距离 d 与基坑开挖深度 H 之间的比值,将图 10 中的数据重新

绘出如图 11 所示。对于两个三角形地表沉降分布的基坑,最大地表沉降发生于紧贴围护墙处。对于凹槽形地表沉降分布的基坑,紧贴于围护墙处的地表沉降一般介于 $0 \sim 0.5\%H$,最大地表沉降一般发生于距离围护墙 $0.3H \sim 1.0H$ 之间的位置,而在 $1.0H \sim 4.0H$ 的范围内沉降逐渐衰减至可以忽略的大小。从墙后地表沉降的影响范围来看,不超过 $4.0H$ 。图中还给出了沉降包络线,该沉降包络线围成了一个梯形区域,其中在距离围护墙 $0 \sim 1.0H$ 的范围内为沉降最大区域,而在 $1.0H \sim 4.0H$ 的范围为沉降过渡区域。

为了对比,图 11 亦给出了 Clough 等^[8]及 Hsieh 等^[1]建议的沉降分布曲线。从图 11 中可以看出,上海地区工程案例的墙后沉降包络区域与 Clough 和 O'Rourke 统计的规律相似,但前者的梯形包络区域较后者的统计范围要大。Hsieh 等^[1]建议的沉降分布曲线可以大致看作是上海地区工程案例地表沉降的“中值线”,因此采用 Hsieh 和 Ou 建议的沉降分布曲线来预测上海地区的地表沉降时具有一定的可靠性。

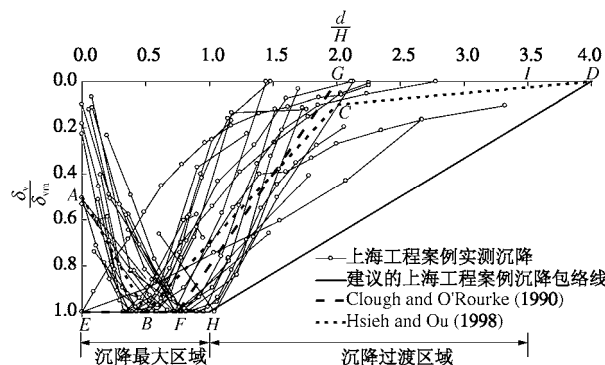


图 11 采用最大地表沉降进行无量纲化的墙后地表沉降分布

Fig. 11 Distribution of ground settlement normalized by maximum ground settlement

3.2 地表倾斜量

对基坑周边建筑物或地下管线影响最大的是墙后地表的差异沉降,衡量墙后地表差异沉降的一个有效指标是地表倾斜量,地表的倾斜量定义为地表两点的差异沉降与这两点距离的比值,如图 12 所示,它们中的最大值称为最大地表倾斜量。Burland 等^[23]曾将最大地表倾斜量用作衡量基坑开挖对建筑物的潜在破坏的重要指标。

根据图 10 的数据计算出各个基坑工程的最大地表倾斜量,并将其与最大地表沉降的关系绘出如图 13 所示。最大地表倾斜量介于 $0.001 \sim 0.017$ 之间,图中给出了用线性方程来拟合数据点的结果,并给出了上、下限。因此,知道了最大地表沉降,就可以根据这个统计结果来预测最大地表倾斜量,进而用于初步评价基坑开挖对建筑物的影响。

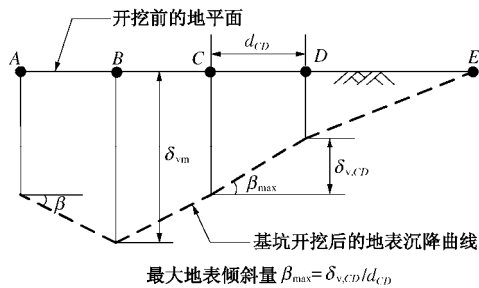


图 12 最大地表倾斜量的定义

Fig. 12 Definition of maximum angular distortion of ground surface

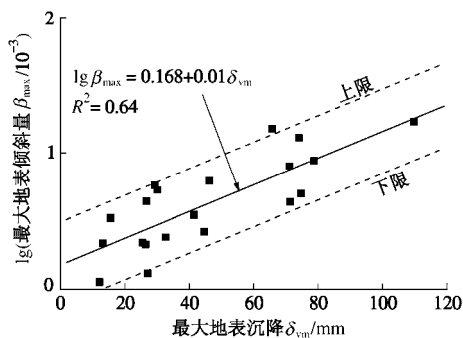


图 13 最大地表倾斜量与最大地表沉降的关系

Fig. 13 Relationship between maximum angular distortion and maximum ground settlement

4 结 语

收集了上海地区 35 个具有墙后地表沉降观测资料的基坑工程案例, 从统计角度探讨了上海软土地区深基坑的墙后地表变形特性, 得到结论如下:

(1) 最大地表沉降随着开挖深度的增大而具有增大的趋势, 基本介于 $0.1\%H$ 与 $0.8\%H$ 之间, 其平均值为 $0.38\%H$, 并与世界其它地区的统计结果进行了对比。

(2) 研究了最大地表沉降的影响因素, 结果表明最大地表沉降随着墙后软土层厚度的增大而增大, 随着坑底抗隆起稳定系数的增加而减小, 而与围护墙的插入比及支撑系统刚度的关系不大。

(3) 最大地表沉降与最大墙体侧移的比值基本介于 $0.4 \sim 2.0$ 之间, 其平均值约为 0.84 。这与 Moormann^[11]统计的软土地区基坑的规律很接近。

(4) 统计了墙后地表沉降的分布模式, 给出了墙后地表沉降的包络线, 并与有关学者的研究结果进行了对比。对于凹槽形地表沉降分布的基坑, 紧贴于围护墙处的地表沉降一般介于 $0 \sim 0.5\%H$ 之间, 最大地表沉降一般发生于距围护墙 $0.3H \sim 1.0H$ 的范围内, 而在 $1.0H \sim 4.0H$ 的范围内衰减至可忽略的值。

(5) 最大地表倾斜量介于 $0.001 \sim 0.017$ 之间, 给

出了根据最大地表沉降量来预测最大地表倾斜量的统计关系, 可用于初步评价基坑开挖对建筑物的影响。

参考文献:

- [1] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004 – 1017.
- [2] SIMPSON B. Development and application of a new soil model for prediction of ground movements[C]// Predictive Soil Mechanics, Proceedings of the Wroth Memorial. Houlby G T, Schofield A N, eds. Thomas Telford, Oxford, London, 1993: 628 – 643.
- [3] WHITTLE A J, HASHASH Y M A, WHITMAN R V. Analysis of deep excavation in Boston[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1993, **119**(1): 69 – 90.
- [4] HIGHT D W, HIGGINS K G. An approach to the prediction of ground movements in engineering practice: Background and Application[C]// International Symposium on Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol2. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1995: 909 – 945.
- [5] FINNO R J, XU T. Selected topics in numerical simulation of supported excavations[C]// Numerical Modeling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, keynote lecture at the International Conference of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment. Triantafyllidis T, ed. Bochum, Germany, Taylor & Francis, London, 2006: 3 – 20.
- [6] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art-Volume. Mexico City, 1969: 225 – 290.
- [7] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, **107**(6): 759 – 777.
- [8] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York: ASCE, 1990: 439 – 470.
- [9] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(5): 758 – 767.
- [10] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and

- Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001, **127**(3): 203 – 224.
- [11] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundations, 2004, **44**(1): 87 – 98.
- [12] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, **133**(2): 129 – 143.
- [13] 刘 涛. 基于数据挖掘的基坑工程安全评估与变形预测研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (LIU Tao. Research on safety analysis and deformation preview of deep excavation by data mining[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [14] 李 青. 软土深基坑变形性状的现场试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (LI Qing. Field test research on deformation behavior of deep foundation pit in soft clay area[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [15] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(5): 1243 – 1254.
- [16] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))
- [17] HASHASH Y M, WHITTLE A J. Ground movement prediction for deep excavations in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, **122**(6): 474 – 486.
- [18] CLOUGH G W, SMITH E M, SWEENEY B P. Movement control of excavation support systems by iterative design[C]// Proceedings of ASCE Foundation Engineering: Current Principles and Practice, Volume 2. New York: ASCE, 1989: 869 – 884.
- [19] GOLDBERG D T, JAWORSKI W E, GORDON M D. Lateral support systems and underpinning Report No. FHWA-RD-75-129, Volume 1[R]. Washington: Federal Highway Administration, 1976.
- [20] ADDENBROOKE T I. A flexibility number for the displacement controlled design of multi propped retaining walls[J]. Ground engineering, 1994, **27**(7): 41 – 45.
- [21] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [22] DBJ—60—97 基坑工程设计规程[S]. 1997. (DBJ—60—97 Code for design of excavation engineering[S]. 1997. (in Chinese))
- [23] BURLAND J B, WROTH C P. Settlement of buildings and associated damage[C]// Proceedings, Conference on Settlement of Structure. London, UK: Pentech Press, 1974: 611 – 654.

第六届“孙钧讲座”学术报告会

“孙钧”讲座已成功举办五届。今年,“孙钧讲座基金”理事会将分别于 2011 年 11 月 9 日(第一讲)和 12 月(第二讲)在同济大学举办第六届“孙钧讲座”学术报告会,届时将特邀国际岩石力学学会(ISRM)米勒奖(Mueller Award)第六个获得者、杰出的岩石力学与岩石工程专家 Nick Barton 博士、总裁(Nick Barton & Associates)作第六届“孙钧讲座”第一讲学术报告“Some good rock engineering reasons for avoiding building metro lines with shallow escalators”;拟特邀著名岩土工程与防护工程地质力学模型试验研究专家、中国工程院院士、总参工程兵科研三所研究员、中国矿业大学力学与建筑工程学院院长顾金才教授作第六届“孙钧讲座”第二讲学术报告“地质力学模型及其在岩土工程中的应用”。敬请各位专家及同行踊跃参加。请来宾务必提前 5 天通知理事会。

第一讲时间: 2011 年 11 月 9 日下午 2:00 ~ 4:30, 地点: 同济大学逸夫楼二楼报告厅; 第二讲时间: 2011 年 12 月, 地点: 待定。

主 办: “孙钧讲座基金”理事会。

协 办: 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系; 中国土木工程学会工程风险与保险研究分会; 上海市土木工程学会岩土力学与工程专业委员会; 上海市力学学会岩土力学专业委员会; 上海市土木工程学会地下工程专业委员会; 中国土木工程学会隧道及地下工程分会风险管理专业委员会。

联系人: 许建聪, 电话: 021-65982923; 13788907984, E-mail: xjc0702@163.com; 胡向东, 电话: 021-65988771; 13641791919; 艾智勇, 电话: 021-65982201; 13671536166。

(“孙钧讲座基金”理事会 供稿)