

DOI: 10.11779/CJGE201503009

苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析

廖少明^{1, 2}, 魏仕峰³, 谭 勇^{1, 2}, 柳骏茜¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 广东省建筑设计研究院, 广东 广州 510010)

摘要: 以苏州广播电视台现代传媒广场大尺度深基坑(面积为33500 m²)为工程背景, 并收集了该地区11个采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的方形基坑(长宽比1.01~2.68)及至少23个采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑的实测数据, 全面地对比分析了苏州地区采用不同挡土结构、不同形状的大尺度深基坑的变形性状。研究结果表明: ①方形基坑连续墙最大侧移值(δ_{hm})平均值为0.08% H_e ; 地铁车站基坑连续墙 δ_{hm} 平均值为0.20% H_e ; ②方形基坑和地铁车站基坑的围护结构最大侧移点埋深(H_m)分别落于(H_e-10 , H_e+5)和(H_e-7 , H_e+8)范围内。采用混凝土支撑的基坑的 H_m 稍小于采用钢支撑的基坑的 H_m ; ③同样采用地下连续墙围护的本工程方形基坑和长条形地铁车站基坑的墙后地表沉降最大值(δ_{vm})的范围分别为(0.01%~0.09%) H_e 和(0.04%~0.27%) H_e 。地铁车站基坑墙后地表沉降影响范围约为4.5 H_e , 大于方形基坑墙后地表沉降的影响范围; ④本工程方形基坑和地铁车站基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的范围分别为0.13~1.07和0.22~1.65; ⑤方形基坑和地铁车站基坑的立柱隆起值(δ_{cu})分别为(0.07%~0.26%) H_e 和(0.10%~0.23%) H_e ; ⑥大尺度方形基坑和地铁车站基坑表观土压力包络线峰值分别为0.80 γH_e 和0.87 γH_e , 皆出现在开挖面以下(0.21~0.64) H_e 处。采用Terzaghi和Peck及日本土木学会建议的土压力分布模式会显著低估该地区大尺度深基坑表观土压力峰值。

关键词: 大尺度深基坑; 地下连续墙; 钻孔灌注桩; 基坑形状; 变形性状

中图分类号: TU470.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)03-0458-12

作者简介: 廖少明(1966-), 男, 湖北天门人, 博士, 教授, 主要从事深基坑工程、盾构法隧道设计与施工的教学与科学研究工作。E-mail: liaosm@126.com。

Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou

LIAO Shao-ming^{1, 2}, WEI Shi-feng³, TAN Yong^{1, 2}, LIU Jun-xi¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510010, China)

Abstract: The performance of large-scale deep excavations in Suzhou, China is comprehensively examined based on a great deal of field data, concerning the excavation of Suzhou Modern Media Plaza (SMMP), 11 rectangular excavations (i.e., aspect ratio of length to width is around 1.01~2.68) constructed by the bottom-up method and supported by auger-cast-in-place piles, and at least 23 long and narrow metro station excavations supported by diaphragm walls in the same area reported in literatures. On the basis of the analysis of monitoring data, some major findings are obtained: (1) the average of the maximum lateral wall deflection, δ_{hm} , is 0.08% H_e for the rectangular excavations and 0.20% H_e for the metro excavations, where H_e is the excavation depth; (2) the depth H_m , where δ_{hm} occurs, falls between $H_m = H_e - 10$ and $H_m = H_e + 5$ for the rectangular excavations and between $H_m = H_e - 7$ and $H_m = H_e + 8$ for the metro excavations. H_m of the excavation propped by steel-reinforced concrete struts is a little smaller than that propped by steel pipe struts; (3) the maximum ground surface settlement, δ_{vm} , is around (0.01%~0.09%) H_e for the rectangular excavation of SMMP supported by diaphragm walls and around (0.04%~0.27%) H_e for the metro excavations. The ground settlement zone is about 4.5 H_e behind the retaining walls for the metro stations which is larger than that of the rectangular excavations; (4) the ratio of δ_{vm}/δ_{hm} is around 0.13~1.07 for the excavation of SMMP and around 0.22~1.65 for the metro excavations; (5) the vertical column movement, δ_{cu} , is around (0.07%~0.26%) H_e for the rectangular excavations and around (0.10%~0.23%) H_e for the metro excavations; and (6) the peak value of the envelope of the

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378389); 上海市教育委员会科技创新重点项目(13zz027)

收稿日期: 2014-07-14

derived apparent earth pressure is $0.80\gamma H_e$ for the large-scale rectangular excavations and $0.87\gamma H_e$ for the metro excavations. They both occur at the depth from $0.21H_e$ to $0.64H_e$. The envelopes proposed by Terzaghi & Peck and Japan Society of Civil Engineering significantly underestimate the peak values of the apparent earth pressure of the large-scale deep excavations in Suzhou.

Key words: large-scale deep excavation; diaphragm wall; auger-cast-in-place pile; excavation shape; deformation behavior

0 引言

在中国软土地区的中心城区, 由于地上土地资源有限, 大规模地下空间需求较大, 许多地下工程紧邻既有道路及建(构)筑物^[1-6], 并形成尺度、形状各异的深大基坑。工程实践表明, 不同地区、不同尺度和形状的深基坑引起的地层变形性状差异较大, 这给基坑设计、邻近建(构)筑物的变形预测及保护带来较大困难。显然, 在地下工程领域, 要得到较为可靠的指导地下工程设计、施工的结论或建议, 对当地大量基坑工程实测数据进行统计分析, 是一条重要且有效的途径。

目前, 已有一些专家学者通过实测数据对中国软土地区基坑工程的变形性状进行研究。Wang 等^[7]研究了上海地区采用不同围护结构以及不同施工方案的基坑的变形性状; Peng 等^[8]对采用气压沉箱法的上海某隧道工作井基坑的变形性状进行研究; Tan 等^[9]研究了上海某顺作法地铁车站深基坑的变形性状, 发现长条型基坑的墙后土体沉降小于一般基坑, 但由于其长边效应, 长边墙后地表沉降影响范围却比一般基坑要大; Tan 等^[10-11]对上海环球金融中心基坑的监测数据进行分析, 同时与上海地区的方形基坑(长宽比 1~2)、长条形地铁车站基坑(长宽比 6.6~14.5)的监测数据相比较, 发现基坑的形状对其变形性状的影响不容忽视。同时, 文献[10, 11]通过对上海地区不同直径的圆形基坑、不同开挖面积的方形基坑的监测数据进行对比分析, 发现大尺寸的基坑将引发更大的基坑围护结构变形; 武朝军等^[12]统计了苏州地区采用地下连续墙和咬合桩围护的地铁车站基坑围护结构变形实测数据; 张德富等^[13]通过实测数据研究了苏州地铁 1 号线车站基坑的变形性状。魏仕锋等^[14]通过实测数据对比分析了杭州钱塘江富水砂层地区采用逆作法、顺逆作结合法以及顺作法 3 种方案的深基坑变形性状的差异性。

苏州地处长江以南, 太湖东岸, 是中国典型的软土地区之一, 第四系覆盖层厚度较大。文献[12, 13]已对采用地下连续墙、咬合桩及 SMW 工法桩围护的苏州地铁车站基坑(长条形)部分变形性状(围护结构侧移、墙后地表沉降最大值)进行研究, 但对于该

地区地铁车站基坑的其他变形性状(如立柱隆沉、表观土压力等), 以及该地区采用其他围护结构及其他形状的基坑变形性状, 目前工程界仍缺乏较好的认识。

本文以苏州广播电视台总台现代传媒广场基坑为工程背景, 并结合已报道的当地多个基坑工程实测数据, 全面、系统地研究苏州地区采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的方形基坑及采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑的变形性状, 具体包括围护结构侧移、墙后地表沉降、立柱隆沉以及表观土压力。

1 工程概况

苏州市广播电视台总台现代传媒广场位于苏州工业园区, 北临翠园路, 西临南施街, 东侧及南侧临近中央河, 西北侧与苏州地铁 1 号线南施街站相接。基坑平面布置如图 1 所示, 开挖面积约 33500 m^2 , 基坑周长约 770 m。地下室裙房开挖深度 15.6 m, 局部区域开挖深度 16.6 m; 塔楼厚底板区域开挖深度 17.6 m。

本工程基坑安全等级为一级, 临近地铁侧环境保护等级为一级。基坑设计变形控制值^[15]如表 1 所示。

表 1 本工程基坑变形控制标准

Table 1 Deformation control criteria for excavations in this study

基坑范围	基坑变形控制标准	
	墙体最大侧向位移 /mm	坑外最大地表沉降 /mm
北侧	25	20
西侧	30	25
中隔墙侧	35	30
东侧及南侧	35	30

由于周边环境保护要求严格, 本工程基坑外围采用地下连续墙围护, 其中, 北侧(靠近地铁侧)的地下连续墙厚度为 1000 mm, 其余侧为 800 mm。如图 2 所示, 基坑沿深度方向布置 3 层混凝土支撑, 其中第一层支撑截面尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, 其余两层支撑截面尺寸均为 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 。

同时, 本工程采用考虑“时空效应”^[16-17]的设计施工方法。基坑内部采用中隔墙将基坑分为①-1 区、①-2 区和② 区。中隔墙采用钻孔灌注桩+三轴搅拌桩止水帷幕的型式, 钻孔灌注桩尺寸均为 $1100 \text{ mm} @ 1300 \text{ mm}$ 。施工时, 首先开挖①-1 区和①-2 区, 待这两个区的底板施工完成后开始开挖② 区。如此安排可以加快塔楼工程的工期进度, 有利于施工场地的布置, 同时

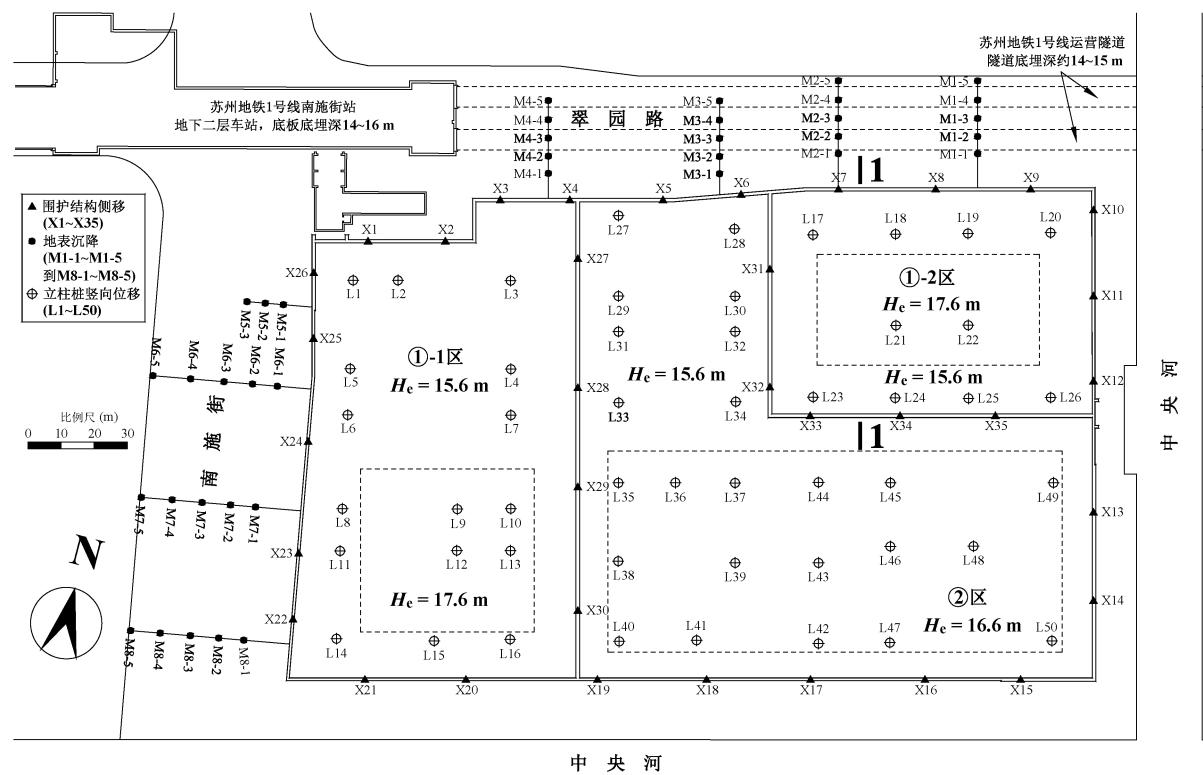


图1 基坑平面布置图

Fig. 1 Site plan of excavations

分区开挖也可减少基坑大面积开挖卸载对邻近地铁设施的不利影响。

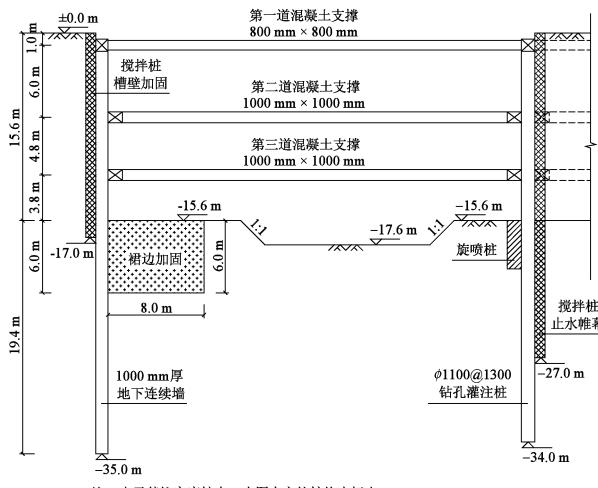


图2 基坑1-1剖面图

Fig. 2 Cross section 1-1 of excavation

2 土层条件

拟建场地地势总体较平缓, 地表为绿化草坪。经勘探揭露, 拟建场地自然地面以下150 m以内的土层为第四系早更新世以来沉积的地层, 主要由黏性土、粉土和砂土组成。勘探揭露的主要土层及其物理力学

参数如表2所示。浅层地下水埋深为0.0~1.8 m; 微承压水主要分布于③层、④₁层及④₃等浅层粉质黏土夹粉土层中; 第I承压水层主要分布于⑧层粉质黏土夹粉土及⑧-a层粉土中。

表2 土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

层号	土层名称	厚度 /m	γ (kN·m ⁻³)	c /kPa	φ (°)	E_s MPa	N /击
①	素填土	1.8	18.5	12.0	10.0	4.07	2
②	黏土	2.7	19.7	46.7	10.7	6.47	9
③	粉质黏土夹 粉土	1.6	18.8	40.2	11.9	6.85	10
④ ₁	粉质黏土夹 粉土	2.0	18.9	27.8	12.8	4.72	9
④ ₂	粉质黏土	3.3	19.3	34.6	12.6	5.55	7
④ ₃	粉质黏土夹 粉土	4.1	19.2	30.6	14.8	7.58	8
⑤	粉质黏土	6.4	19.3	33.4	12.4	5.33	7
⑥ ₁	黏土	3.1	20.3	55.4	10.6	7.96	17
⑥ ₂	粉质黏土	4.0	19.4	38.5	12.2	7.26	17
⑦	粉质黏土	6.5	19.0	33.0	13.7	6.43	17
⑧	粉质黏土夹 粉土	6.7	18.9	31.2	15.1	6.23	19
⑧-a	粉土	5.2	19.2	6.2	21.8	6.50	29

注: γ 为土的重度, c为黏聚力, φ 为内摩擦角, E_s 为压缩模量, N为标准贯入击数。

表3 苏州地区方形基坑汇总
Table 3 Summary of rectangular excavations in Suzhou

编号	工程名称	围护结构	A $/m^2$	L/B	H_e $/m$	围护结构尺寸 $/mm$	R	\bar{h} $/m$	开挖方式
1	国际会展中心 ^[18]	钻孔灌注桩	27000	N/A	12.5	$\phi 900$	0.68	N/A	分三区开挖
2	圆融星座 ^[19]	钻孔灌注桩	25998	N/A	17.8	$\phi 1000@1150$	N/A	5.9	N/A
3	东方之门 ^[20-21]	钻孔灌注桩	24319	1.58	20.5	$\phi 1050@1250 /$ $\phi 1200@1400$	N/A	6.8	盆式开挖
4	金沙广场 ^[22]	钻孔灌注桩	15000	1.31	9.9	$\phi 800@1800$ 双排	1.48	—	N/A
5	凤凰国际书城 ^[23-24]	钻孔灌注桩	13000	2.68	16.5	$\phi 950@1150$	0.98	5.5	先两端后中部
6	交通银行大厦 ^[25]	钻孔灌注桩	9120	1.01	14.6	$\phi 900@1100$	0.83	4.9	N/A
7	天翔国际大厦 ^[26]	钻孔灌注桩	8697	1.06	14.9	N/A	N/A	4.9	N/A
8	信托大厦 ^[26]	钻孔灌注桩	7600	1.03	13.8	$\phi 900@1100$	0.93	4.6	N/A
9	某商业大厦 ^[27]	钻孔灌注桩	5530	N/A	9.2	$\phi 900@1100$	0.41	4.6	N/A
10	某办公大楼 ^[28]	钻孔灌注桩	4292	1.27	17.7	$\phi 1050@1250$	0.75	5.9	盆式开挖
11	金鸡湖 A 岛风井 ^[29]	钻孔灌注桩	341	1.58	25.6	$\phi 1200@1300$	0.72	4.3	N/A

注: A 为基坑平面面积, L/B 为方形基坑长宽比, H_e 为基坑最终开挖深度, R 为围护结构插入比, \bar{h} 为支撑竖向间距平均值。

表4 苏州地区地铁车站基坑汇总

Table 4 Summary of metro excavations in Suzhou

编号	工程名称	围护结构	H_e $/m$	t $/mm$	R	\bar{h} $/m$
1	火车站站 ^[30]	地下连续墙	23.4	800	1.20	7.8
2	某地铁车站东端头井 ^[31]	地下连续墙	20.4	1000	0.81	3.4
3	人民路站 ^[32-33]	地下连续墙	20.3	1000	0.63	4.1
			12.1	800	1.07	4.0
4	塔园路站 ^[34]	地下连续墙	18.9	800	0.74	4.7
5	苏州乐园站 ^[12, 35]	地下连续墙	18.5	800	0.86	4.5
6	桐泾路站 ^[36]	地下连续墙	17.0	800	N/A	4.3
7	滨河路站 ^[12, 37]	地下连续墙	16.5	800	1.03	4.1
8	广济路站 ^[38-39]	地下连续墙	16.0	800	0.81	5.3
9	某地铁车站 ^[40]	地下连续墙	15.9	800	0.76	5.3
10	仓街站 ^[41]	地下连续墙	15.3	800	0.83	3.8
11	华池街站 ^[12, 42] 1号线车站基坑实测数据 ^[13]	地下连续墙	15.0	600	0.80	3.8

注: H_e 为基坑最终开挖深度, t 为地下连续墙厚度, R 为围护结构插入比, \bar{h} 为支撑竖向间距平均值。

图4表示的是围护结构最大侧移值(δ_{hm})与基坑开挖深度(H_e)的关系。可以看出, 本工程中地下连续墙的 δ_{hm} 变化范围为(0.03%~0.12%) H_e , 平均值为0.08% H_e , 这些值稍小于本工程中钻孔灌注桩的 δ_{hm} , 这表明, 本工程选用的地下连续墙限制基坑变形的能力稍强于所选用的钻孔灌注桩。然而, 本工程的所有 δ_{hm} 均在表1要求的控制范围内, 这表明, 本工程所选用

3 监测方案

为全面掌握施工中基坑自身变形及对周边环境的影响, 对本工程的基坑从以下几个方面进行了动态监控: 围护结构侧向变形、墙后地表沉降、混凝土支撑轴力、立柱桩竖向位移, 测点布置如图1所示。其中, 地下连续墙共26个测斜点, 分别为X1~X26, 钻孔灌注桩共9个测斜点, 分别为X27~X35; 地表沉降监测分为8个区域, 分别为M1~M8, 除M5外, 各区域分布5个监测点, 共计38个沉降监测点; 支撑轴力监测按层分为ZL1~ZL3, 各层分布48个测点; 立柱桩竖向位移监测共设50个测点, 分别为L1~L50。

4 监测结果分析

为更好地掌握苏州地区采用不同围护结构、不同形状的深基坑变形性状, 收集了苏州地区11个方形基坑(长宽比1.01~2.68)以及至少23个长条形地铁车站基坑的监测数据, 并将它们与本工程的实测数据一并纳入进行对比分析。其中, 方形基坑全部采用钻孔灌注桩围护, 并采用顺作法施工; 地铁车站基坑全部采用地下连续墙围护。各基坑的详细信息如表3和表4所示。

4.1 围护结构侧移

本工程基坑X8和X35测点处的围护结构侧移如图3所示。可以看出, 当基坑开挖深度较浅时, 围护结构呈现出轻微的“悬臂状”变形; 随着开挖深度的增加, 围护结构变形逐渐转变为“胀肚型”。

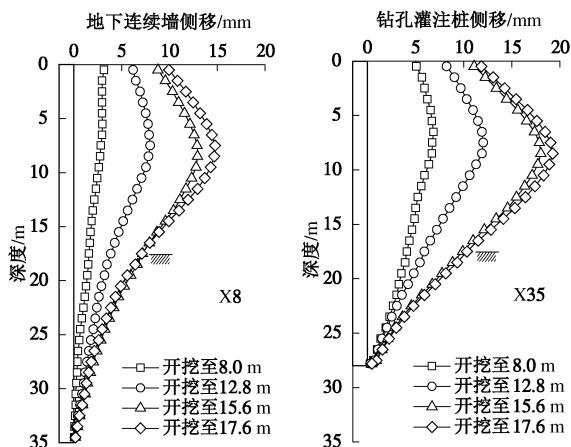


图 3 X8 和 X35 处围护结构的侧移

Fig. 3 Deflections of retaining walls at X8 and X35

的支护结构总体上能够较好地控制基坑围护结构的变形。同时,由图 4 的统计可知,苏州地区采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的方形基坑的 δ_{hm} 变化范围为 $(0.04\% \sim 0.40\%) H_e$, 平均值为 $0.13\% H_e$; 而苏州地区地铁车站基坑地下连续墙的 δ_{hm} 变化范围为 $(0.05\% \sim 0.40\%) H_e$, 平均值为 $0.20\% H_e$ 。与文献[10]不同,在本文统计中,并未观察到由于基坑形状差异导致围护结构侧移存在显著差异的现象,这可能是由于:①方形基坑的统计样本相对较少;②方形基坑和长条形基坑围护结构不同。对围护结构而言,地下连续墙的整体性要优于钻孔灌注桩,因而其控制基坑变形的能力应强于钻孔灌注桩。然而图 4 中显示采用钻孔灌注桩的 δ_{hm} 平均值小于采用地下连续墙的 δ_{hm} 。这主要是由于本文的统计中采用钻孔灌注桩围护的基坑样本及相应的数据点数量相对较少。同时,由于该原因,在图 9 中也将出现与图 4 相同的现象,下文不再赘述。

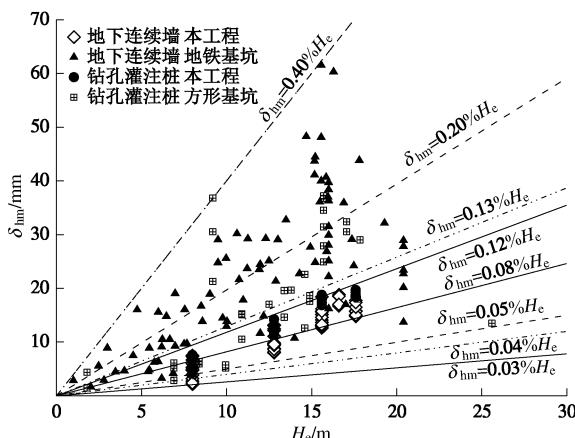


图 4 围护结构最大侧移量与基坑开挖深度的关系

Fig. 4 Relationship between maximum deflections of retaining walls and excavation depths

对于中国华东软土地区深基坑围护结构的变形性状,目前已有一些学者进行统计。Wang 等^[7]统计的上海地区采用钻孔灌注桩围护的基坑 δ_{hm} 的变化范围为 $(0.10\% \sim 1.00\%) H_e$, 其上下限均大于本文相应的统计。这主要是由于①苏州地区土层工程性质优于上海地区;②文献[7]中统计的样本数量较多,其数据离散性较大。在 4.2 节的分析中也将出现类似情况,下文将不再赘述其原因。Tan 等^[10-11]统计的上海地区采用地下连续墙围护,采用顺作法和逆作法施工的地铁车站基坑 δ_{hm} 的变化范围分别为 $(0.02\% \sim 0.50\%) H_e$ 和 $(0.02\% \sim 0.45\%) H_e$, 这与本文中相应的统计范围相近。

Ou 等^[43]通过对台北地区 10 个基坑工程监测数据进行分析,发现围护结构最大侧移点埋深 (H_m) 大致在开挖面附近,即 $H_m = H_e$ 。图 5 表示的是围护结构最大侧移点埋深 (H_m) 与基坑开挖深度 (H_e) 的关系。可以看出,本工程中地下连续墙的 H_m 主要落于 $(H_e - 11, H_e - 1)$ 范围内;苏州地区采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的方形基坑的 H_m 主要落于 $(H_e - 10, H_e + 5)$ 范围内;苏州地区地铁车站基坑地下连续墙的 H_m 主要落于 $(H_e - 7, H_e + 8)$ 范围内,这与 Tan 等^[10]统计的上海地区采用地下连续墙围护、顺作法施工的地铁车站基坑的 H_m 的范围 $(H_e - 7, H_e + 7)$ 相近。

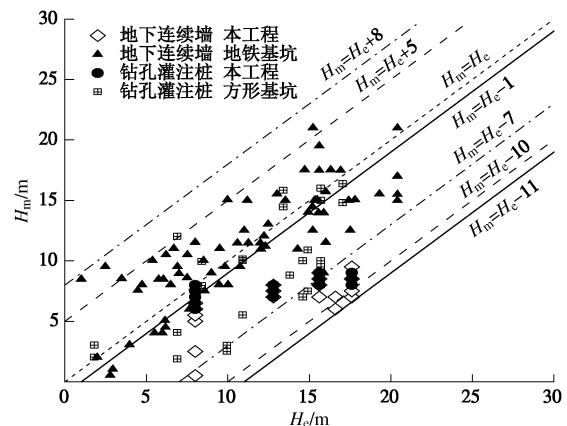


图 5 围护结构最大侧移点埋深与基坑开挖深度的关系

Fig. 5 Relationship between locations of maximum wall deflections and excavation depths

由图 5 可以看出,地铁车站基坑围护结构的 H_m 总体上稍大于方形基坑的 H_m 。这主要是由于本文统计的方形基坑支撑主要为混凝土支撑,混凝土浇筑后无法立即达到所需强度;而苏州地铁车站基坑除第一层支撑采用混凝土支撑外,其余支撑主要为钢支撑^[44],钢支撑安装好后通过施加预应力可以立即发挥效用,有效地限制围护结构侧移,迫使围护结构的最大侧移点下移。因而当挖去一层土后,采用钢支撑的基坑的

围护结构最大侧移点下移量要大于采用混凝土支撑的基坑。这与魏仕锋等^[14]针对富水砂层地区基坑的研究结论相同。

图6表示的是围护结构最大侧移率(δ_{hm}/H_e)与围护结构插入比(R)的关系, 其中, R 为最终开挖面下围护结构的入土深度与基坑最终开挖深度的比值。可以看出, 苏州地区基坑围护结构的插入比主要集中于0.7~1.0。对于本工程, R 从0.60变化至1.25, 但并未引起 δ_{hm}/H_e 发生显著变化。同时, 从方形基坑和地铁车站基坑的统计数据也可以看出, 随着 R 的增长, 基坑围护结构的 δ_{hm}/H_e 也未出现显著的随之减小的趋势。这与Moermann^[45]及Wang等^[7]的研究结论相同。

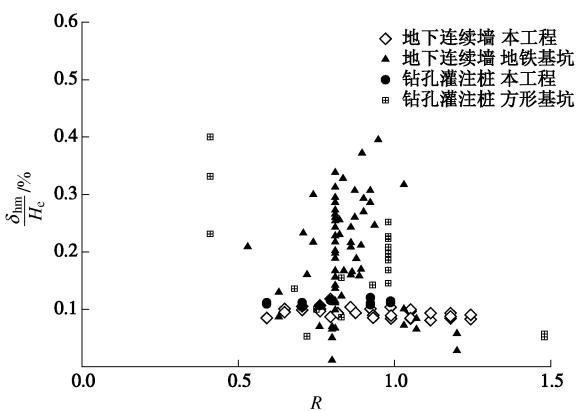


图6 围护结构最大侧移率与围护结构插入比的关系

Fig. 6 Relationship between normalized maximum wall deflections and wall penetration ratios

Clough等^[46]提出了综合考虑围护结构和支撑体系作用的无量纲参数——支撑系统刚度($EI/\gamma_w \bar{h}^4$), 其中, \bar{h} 为支撑竖向间距平均值。此后, Clough等^[47]提出采用支撑系统刚度预测围护结构最大侧移的图表。图7表示的是苏州地区基坑支撑系统刚度与围护结构最大侧移率的关系。可以看出, 苏州地区基坑的 δ_{hm}/H_e 几乎位于 $FOS = 2.0$ 曲线以下(FOS 为坑底抗隆起安全系数), 其 $EI/\gamma_w \bar{h}^4$ 主要落于100~1000范围内。由图7可以看出, 无论是方形基坑还是长条形地铁车站基坑, 其 δ_{hm}/H_e 并不随着 $EI/\gamma_w \bar{h}^4$ 的增加呈现出明显的减小趋势。这是由于Clough等^[47]提出的该预测图表针对的是柔性支护结构, 对于刚度较大的围护结构, 当其刚度超过一定数值后, 继续增大对进一步减小围护结构变形的作用并不显著。这与Long^[48]、Moermann^[45]及Tan等^[9]的研究结论相同。

图8表示的是采用钻孔灌注桩围护的方形基坑围护结构最大侧移率(δ_{hm}/H_e)和基坑平面面积(A)的关系。可以看出, 苏州地区采用钻孔灌注桩围护的方形基坑规模主要集中于(5000~15000) m^2 。当 A 从

零逐渐增大至(8000~13000) m^2 时, δ_{hm}/H_e 随之增大。由于各基坑的支撑系统刚度较为接近(图7), 因此可认为, 虽然大尺度基坑(如凤凰国际书城基坑)采用分区挖土的方法, 但其较大的总开挖卸载面积却仍引发了相对大的基坑变形。然而随着 A 的进一步增加, δ_{hm}/H_e 却呈现出减小的趋势。这可能是由于为了控制变形, 超大基坑(如本工程)一般设置了中隔墙, 且该措施控制基坑变形的效果显著强于仅采用分区挖土的方法。图8表明, 设置中隔墙及分区挖土等措施能有效控制大尺度方形基坑的变形。

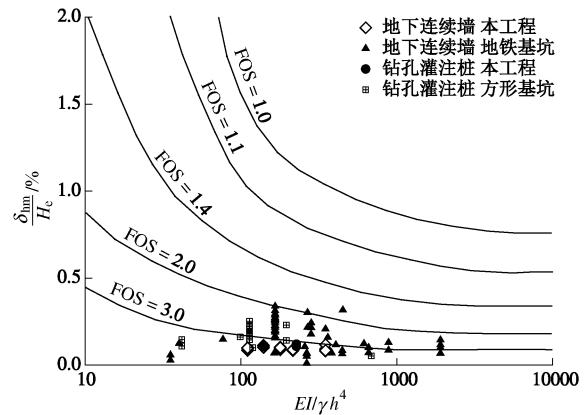


图7 支撑系统刚度与地下连续墙最大侧移率的关系

Fig. 7 Relationship between normalized maximum wall deflections and normalized system stiffnesses

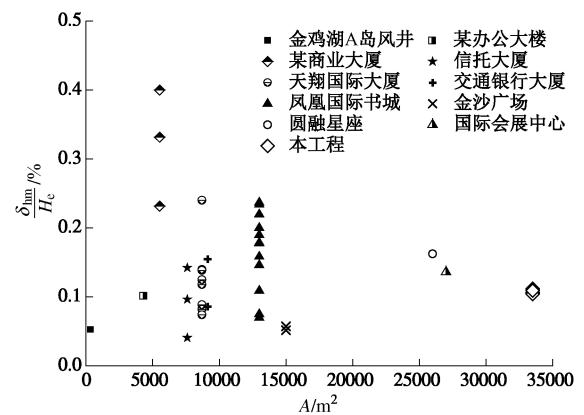


图8 围护结构最大侧移率与方形基坑面积的关系

Fig. 8 Relationship between normalized maximum wall deflections and excavation areas for rectangular excavations

4.2 墙后地表沉降

由于本工程中M4~M8的地表沉降值在基坑前期开挖(①-1区和①-2区的第二层土开挖完毕之前)并未监测, 因此在本节的分析中, 将对M1~M3、M4~M8的实测数据予以区分。基坑墙后最大地表沉降(δ_{vm})与基坑开挖深度的关系如图9所示。在本工程中, 随着基坑开挖深度的增加, M4~M8的 δ_{vm} 逐渐趋近于M1~M3的 δ_{vm} , 并在开挖至坑底时二者几乎

相等。这是由于 M1~M3 区域位于地铁隧道正上方，隧道的刚度远大于土层，因此当邻近基坑开挖时，隧道在一定程度上限制了该侧地层沉降。这与文献[3]中作者对靠近地铁车站侧的基坑墙后地表沉降特点的研究结论相同。在本工程中， δ_{vm} 的变化范围为 (0.01%~0.09%) H_e ，平均值为 0.06% H_e ，且 δ_{vm} 均在本工程基坑变形控制标准范围内，这表明本工程选用的支护系统能够较好的控制基坑开挖对周边环境的影响。苏州地区地铁车站基坑 δ_{vm} 的变化范围为 (0.04%~0.27%) H_e ，平均值为 0.13% H_e ；Tan 等^[10]通过对实测数据进行分析，发现长条形地铁车站基坑相比于方形基坑能够更好地控制墙后地表沉降值。在本文的研究中，由于方形基坑的样本及 δ_{vm} 数据有限，因此无法对两种形状基坑的 δ_{vm} 进行对比分析。

目前，已有一些学者对我国华东地区不同形状基坑的 δ_{vm} 进行统计。Wang 等^[7]统计的上海地区采用地下连续墙围护、顺作法施工的方形基坑 δ_{vm} 的变化范围为 (0.10%~0.80%) H_e ，其上下限均大于本工程；Tan 等^[10]统计的上海地区采用地下连续墙围护，采用顺作法和逆作法施工的地铁车站基坑 δ_{vm} 的变化范围分别为 (0.03%~0.20%) H_e 及 (0.05%~0.15%) H_e ，该范围与本文中对苏州地铁车站基坑的统计相近。

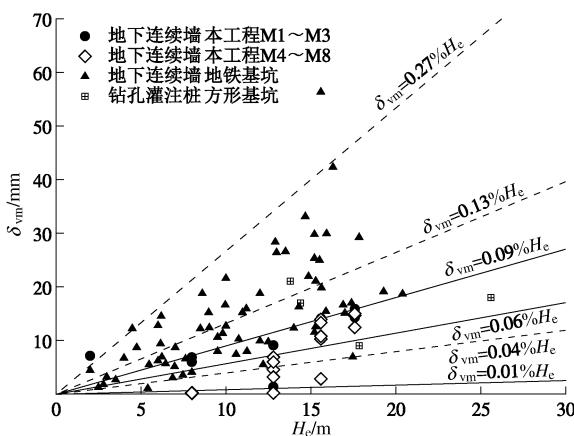


图 9 墙后最大地表沉降与基坑开挖深度的关系

Fig. 9 Relationship between maximum ground settlements and excavation depths

图 10 表示的是基坑墙后地表沉降形态。其中，图 10 (a) 表示的是 δ_v / H_e 与 d / H_e (其中 d 为到基坑边缘的距离) 的关系。本工程及苏州地区采用地下连续墙围护的地铁车站基坑的沉降主要发生在 Peck^[49] 提出的 I 区内，只有少量且较轻微的沉降发生在 II 区。本工程中，由于前期没有监测，M4~M8 的地表沉降值总体上小于 M1~M3。同时，本工程墙后地表沉降呈现出梯形分布形态：较大沉降发生在 (0~1.5) H_e

范围内，而当 $d / H_e > 2.0$ 时，墙后地表沉降可忽略不计。苏州地区采用地下连续墙围护的地铁车站基坑墙后地表沉降呈现出凹槽型分布形态：较大沉降出现在 (0.5~1.0) H_e 范围内，当 $d / H_e > 2.0$ 时，地表沉降值较小。Hashash 等^[50] 根据美国高速路工程之一的主干道/隧道工程中的基坑工程实测数据，提出了图 10 (a) 所示的墙后地表沉降曲线包络线。Tan 等^[9~10] 通过对大量实测数据进行分析，发现文献[50]提出的预测曲线可作为上海地区地铁车站基坑墙后地表沉降值的包络线。然而若采用该曲线预测同处于华东软土地区的苏州地铁车站基坑墙后地表沉降时，则可能低估 (0~1.5) H_e 范围的沉降值，高估 (1.5~5.0) H_e 范围的沉降值。

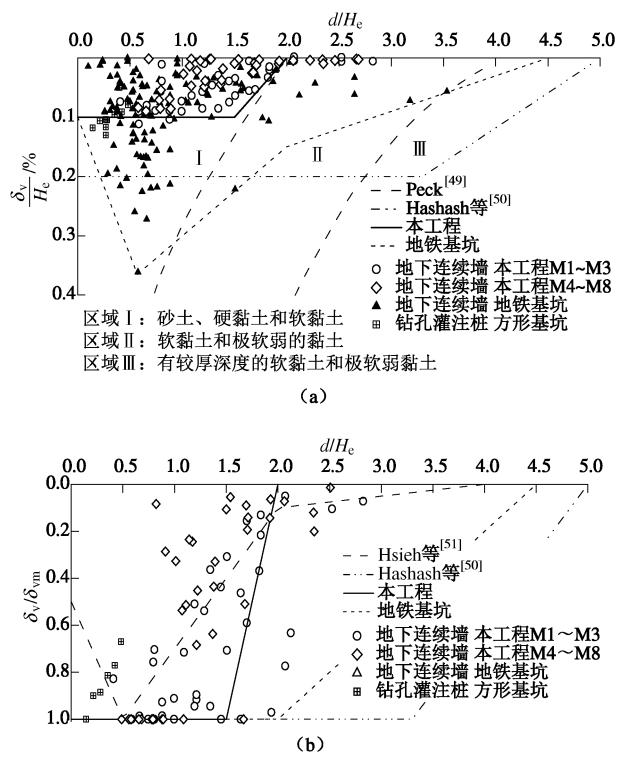


图 10 墙后地表沉降形态

Fig. 10 Profiles of observed settlements

结合图 10 (a) 和图 10 (b) 可以发现，长条形地铁车站基坑的墙后地表沉降影响范围要大于方形基坑，这与 Tan 等^[9] 对上海地区顺作法地铁车站基坑的研究结果相同。

图 10 (b) 表示的是 δ_v / δ_{vm} 与 d / H_e 的关系。可以看出，本工程的墙后地表沉降数据点分布在 (0~3.0) H_e 范围内。然而，由图 10 (a) 可以看出，在 $2.0 H_e$ 以外，墙后地表沉降值接近于零；同时由于 M4~M8 处地表沉降值前期并未监测，导致这些断面的最大地表沉降值偏小， δ_v / δ_{vm} 将偏大。因此笔者认为图 10 (b) 中本工程相对合理的地表沉降包络线可取为：沉降最

大值位于($0\sim1.5$) H_e 范围内, 在此范围外逐渐减小, 并于 $2.0H_e$ 处减至零; 苏州地区采用地下连续墙围护的地铁车站基坑墙后地表沉降影响范围延伸至墙后约 $4.5H_e$ 处, 最大值位于($0\sim2.0$) H_e 范围内。这两种不同形状的基坑墙后地表沉降影响范围均大于Hsieh等^[51]针对台北软土提出的影响范围, 并小于Hashash等^[50]针对中至硬土提出的影响范围。

4.3 δ_{vm} 与 δ_{hm} 的关系

图11表示的是 δ_{vm} 与 δ_{hm} 的关系。可以看出, 本工程中 δ_{vm}/δ_{hm} 变化范围为 $0.13\sim1.07$, 平均值为 0.64 ; 苏州地区采用地下连续墙围护的地铁车站基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 变化范围为 $0.22\sim1.65$, 平均值为 0.76 。Wang等^[7]针对上海地区采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的方形基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的统计值变化范围为 $0.4\sim0.9$, 其范围小于本工程; Tan等^[10]针对上海地区采用地下连续墙围护、顺作法施工的地铁车站基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的统计值变化范围为 $0.1\sim2.0$, 其范围大于本文中针对苏州地区相应的统计。

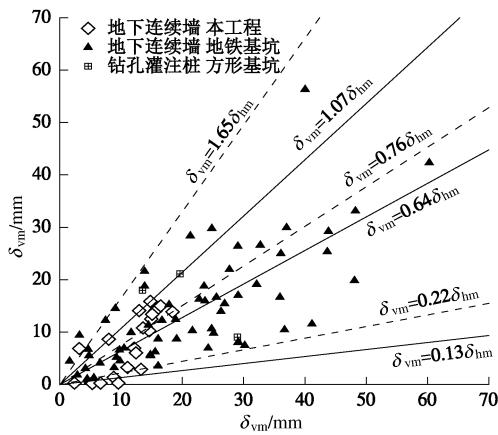


图11 δ_{vm} 与 δ_{hm} 的关系

Fig. 11 Relationship between maximum wall deflections and maximum ground settlements

4.4 立柱隆沉

基坑开挖后, 受坑底土体隆起、上方支撑自重以及施工荷载的共同作用, 立柱桩将呈现出一定的隆沉。图12表示的是基坑立柱隆沉值(δ_{cu})与基坑开挖深度的关系。其中, δ_{cu} 为正表示立柱隆起, 反之表示沉降。可以看出, 在苏州地区, 采用钻孔灌注桩及地下连续墙围护的本工程与只采用钻孔灌注桩围护的方形基坑的立柱隆沉值变化范围无显著区别, 为($0.07\%\sim0.26\%$) H_e , 平均值为 $0.14\%H_e$; 苏州地区采用地下连续墙围护的地铁车站基坑立柱隆沉值变化范围为($0.10\%\sim0.23\%$) H_e , 平均值为 $0.14\%H_e$ 。可见, 立柱隆沉大小与基坑开挖深度相关, 而与基坑形状、挡土结构形式关系不大。Tan等^[10]针对上海地区采用地

下连续墙围护、顺作法施工的方形基坑和地铁车站基坑立柱隆起值的统计范围分别为($0.05\%\sim0.30\%$) H_e 及($0.05\%\sim0.18\%$) H_e , 这与本文中相应的统计范围相近。

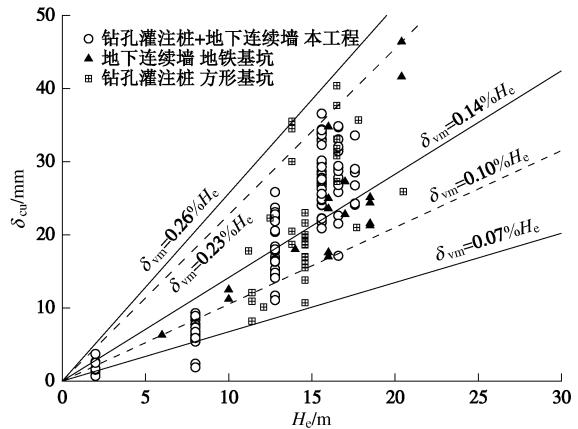


图12 立柱隆沉值与基坑开挖深度的关系

Fig. 12 Relationship between column uplifts and excavation depths

4.5 表观土压力

基坑土方开挖后, 坑周侧向土压力将绝大部分由坑内支撑承担, 因此, 可采用支撑轴力进行反算得到作用于围护结构上的表观土压力(P_a)。选取基坑各层支撑的最大轴力(斜撑的最大轴力分解至横向和纵向), 采用Terzaghi等^[52]建议的反算方法, 得到表观土压力沿深度方向分布如图13所示。本工程基坑最终开挖面位于粉质黏土层, 十字板剪切强度 $S_u=58\text{ kPa}$, 取 $\gamma=19.0\text{ kN/m}^3$ 。可以看出, 本工程基坑的表观土压力峰值为 $0.70\gamma H_e$ 。而采用Terzaghi等^[52]建议的土压力分布模式, 其表观土压力峰值仅为 $0.22\gamma H_e$, 与本文的计算结果存在较大偏差。这可能是由以下原因引起的: 虽然本工程基坑围护结构侧移值较小, 但是基坑开挖至坑底后, 围护结构最大侧移点主要出现在开挖面以上约 10 m 处(图3, 5), 即第二道支撑处附近(图2), 这导致第二道支撑轴力显著增大(轴力峰值范围为 $5000\sim8500\text{ kN}$), 因而以此反算获得的表观土压力比采用Terzaghi等^[52]建议的分布模式计算获得的表观土压力要高出许多。

由图13可知, 苏州地区采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的方形基坑(含本工程)表观土压力包络线峰值为 $0.80\gamma H_e$, 出现在开挖面以下($0.21\sim0.64$) H_e 处, 并在($0.64\sim1$) H_e 范围内逐渐减小至 $0.5\gamma H_e$; 苏州地区采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑表观土压力包络线峰值为 $0.87\gamma H_e$, 出现在开挖面以下($0.21\sim0.64$) H_e 处, 并在($0.64\sim1$) H_e 范围内逐渐减小至 $0.75\gamma H_e$ 。日本土木学会提出黏性土中表观

土压力呈梯形分布, 峰值介于 $(0.2\sim0.4)\gamma H_e$ 之间, 出现在开挖面以下 $0.4H_e$ 处, 该预测结果与实际有较大差距。这可能是由以下原因引起的: 如4.1节所述, 虽然深基坑支护系统刚度较大, 但是大尺度深基坑的开挖卸载仍不可避免的引发相对较大的变形, 因此支撑轴力也随之增大, 以此反算获得的表观土压力也将显著高于日本土木学会提出的表观土压力。因此, 若想采用该模式对苏州地区大尺度深基坑的表观土压力分布进行较为准确的预测, 则必须将基坑尺度这一重要因素纳入当前的预测模式之中。

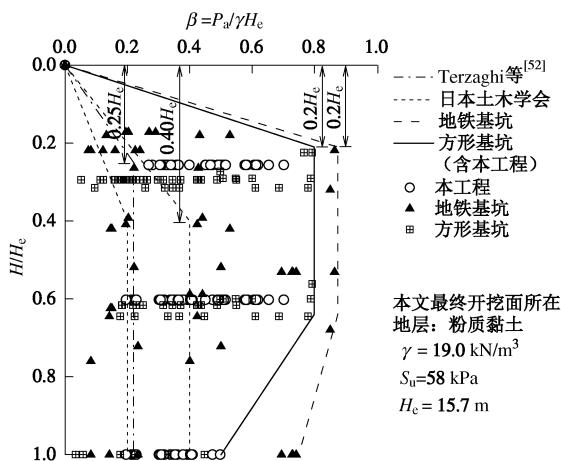


图 13 围护结构表观土压力包络线

Fig. 13 Derived apparent earth pressure envelopes

5 结 论

本文以苏州广播电视台现代传媒广场基坑为工程背景, 并结合已报道的当地多个基坑工程实测数据, 分析了苏州地区顺作法施工的大尺度方形基坑以及长条形地铁车站基坑的变形性状, 得出如下结论:

(1) 设置中隔墙及分区挖土等措施能有效控制大尺度基坑的变形; 本工程采用的“地下连续墙/钻孔灌注桩+混凝土支撑”支护方式, 以及分区开挖方法有效地控制了基坑自身的变形及开挖对周边环境的影响。

(2) 采用地下连续墙围护的本工程方形基坑挡墙最大侧移 δ_{hm} 平均值为 $0.08\%H_e$; 采用钻孔灌注桩围护的方形基坑 δ_{hm} 平均值为 $0.13\%H_e$; 采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑 δ_{hm} 平均值为 $0.20\%H_e$ 。

(3) 采用钻孔灌注桩围护的方形基坑的围护结构最大侧移点埋深(H_m)主要落于 (H_e-10, H_e+5) 范围内; 采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑的 H_m 主要落于 (H_e-7, H_e+8) 范围内。采用混凝土支撑的基坑的 H_m 稍小于采用钢支撑的基坑的 H_m 。

(4) 苏州地区基坑围护结构插入比主要集中于 $0.7\sim1.0$ 范围内, 支撑系统刚度($EI/\gamma_w \bar{h}^4$)主要集

中于 $100\sim1000$ 范围内; 但随着插入比或支撑系统刚度的增加, 围护结构最大侧移率并未显著的减小。

(5) 对于墙后最大地表沉降(δ_{vm}), 采用地下连续墙围护的本工程方形基坑 δ_{vm} 的范围为 $(0.01\%\sim0.09\%)H_e$ 。采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑 δ_{vm} 的范围为 $(0.04\%\sim0.27\%)H_e$ 。

(6) 苏州地区基坑墙后地表沉降主要发生在Peck^[49]划分的I区(砂土、硬黏土和软黏土)内。地铁车站基坑墙后地表沉降影响范围约为 $4.5H_e$, 大于方形基坑墙后地表沉降的影响范围(本工程为 $2H_e$)。

(7) 采用地下连续墙围护的本工程方形基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的范围为 $0.13\sim1.07$; 采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑 δ_{vm}/δ_{hm} 的范围为 $0.22\sim1.65$ 。

(8) 采用“地下连续墙围护”、“钻孔灌注桩+地下连续墙”围护以及单独采用钻孔灌注桩围护的基坑立柱隆沉值(δ_{cu})无显著区别, 均值为 $0.14\%H_e$ 。立柱隆沉大小与基坑形状、挡土结构形式关系不大。

(9) 采用钻孔灌注桩围护、顺作法施工的大尺度方形基坑表观土压力包络线峰值为 $0.80\gamma H_e$, 出现在开挖面以下 $(0.21\sim0.64)H_e$ 处; 采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑表观土压力包络线峰值为 $0.87\gamma H_e$, 出现在开挖面以下 $(0.21\sim0.64)H_e$ 处。采用Terzaghi等^[52]、以及日本土木工程学会建议的土压力分布模式将显著低估表观土压力峰值。

参 考 文 献:

- [1] TAN Y, LI M W. Measured performance of a 26 m deep top-down excavation in downtown Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48: 704–719.
- [2] LIAO S M, FAN Y Y, SHI Z H, et al. Optimization study on the reconstruction and expansion of an underground rail transit center in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 435–446.
- [3] 魏仕锋. 临近深基坑地铁车站结构的安全及保护标准研究[D]. 上海: 同济大学, 2014. (WEI Shi-feng. Investigation on safety and protection criteria of metro stations adjacent to deep excavations[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))
- [4] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 454–465.
- [5] 青二春. 地铁隧道上方大面积卸载下的变形及控制模式研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (QING Er-chun. Research on subway tunnel deformation due to large-scale unloading and

- its control[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [6] TAN Y, WEI B. Performance of an overexcavated metro station and facilities nearby[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, **26**(3): 241 - 254.
- [7] 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, 2010, **136**(7): 985 - 994.
- [8] PENG F L, WANG H L, TAN Y, et al. Field measurements and FEM simulation of a tunnel shaft constructed by pneumatic caisson method in Shanghai soft ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(5): 516 - 524.
- [9] TAN Y, WEI B. Observed behaviors of a long and deep excavation construction by cut-and-cover technique in Shanghai soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(1): 69 - 88.
- [10] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(11): 1875 - 1893.
- [11] TAN Y, WANG D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. II: Top-down construction of the peripheral rectangular pit[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(11): 1894 - 1910.
- [12] 武朝军, 陈锦剑, 叶冠林, 等. 苏州地铁车站基坑变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 458 - 462. (WU Chao-jun, CHEN Jin-jian, YE Guan-lin, et al. Deformation characteristics of foundation pits of subway stations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 458 - 462. (in Chinese))
- [13] 张德富, 童立元, 刘松玉, 等. 苏州地铁 1 号线车站深基坑围护结构变形性状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, **9**(增刊 2): 1961 - 1965. (ZHANG De-fu, TONG Li-yuan, LIU Song-yu, et al. Deformation behavior of support structures of deep excavations in Suzhou subway line 1[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(S2): 1961 - 1965. (in Chinese))
- [14] 魏仕锋, 谭勇, 廖少明, 等. 钱江隧道顺逆结合法深基坑变形性状实测分析[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(8): 112 - 119. (WEI Shi-feng, TAN Yong, LIAO Shao-ming, et al. Field measurement of a semi-top-down deep excavation for the shield-launching shaft of Qianjiang tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(8): 112 - 119. (in Chinese))
- [15] 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司. 苏州广播电视台总台现代传媒广场基坑支护开挖设计方案[R]. 上海, 2011. (Architectural Design and Research Institute of Tongji University Co., Ltd. Design of the excavation of Suzhou Modern Media Plaza[R]. Shanghai, 2011. (in Chinese))
- [16] 刘建航. 软土基坑工程中时空效应理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(增刊): 763 - 770. (LIU Jian-hang. Time-space-effect theory and practice for excavations in soft clays[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(S0): 763 - 770. (in Chinese))
- [17] TAN Y, WEI B, ZHOU X, et al. Lessons learned from construction of Shanghai metro stations – Importance of quick excavation, promptly propping, timely casting and segmented construction[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, in press.
- [18] 汪祖民, 马占勇. 苏州国际会展中心深基坑施工安全监测[J]. 地矿测绘, 2003, **19**(4): 18 - 21. (WANG Zu-min, MA Zhan-yong. Construction safety monitoring of deep base pit for international convention & exhibit center in Suzhou[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2003, **19**(4): 18 - 21. (in Chinese))
- [19] 朱世哲, 杨红亮, 余为东. 搅拌桩中套打灌注桩基坑支护技术研究[J]. 苏州大学学报(工学版), 2010, **30**: 236 - 238. (ZHU Shi-zhe, YANG Hong-liang, YU Wei-dong. Study on the excavation retaining technology of construction of the auger-cast-in-place piles in the mix-in-place columns[J]. Journal of Soochow University (Engineering Science), 2010, **30**: 236 - 238. (in Chinese))
- [20] 王进, 许娟. 土体参数对地表沉降影响的数值模拟分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2012, **25**(2): 55 - 58. (WANG Jin, XU Juan. Numerical simulation analysis of effects of soil parameters on ground settlement[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2012, **25**(2): 55 - 58. (in Chinese))
- [21] 许娟, 丁海平. 苏州东方之门基坑工程的变形监测与分析[J]. 岩土工程技术, 2011, **25**(1): 32 - 37. (XU Juan, DING Hai-ping. Monitoring and analyses of the foundation pit deformation for Suzhou Oriental Gate[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2011, **25**(1): 32 - 37. (in Chinese))
- [22] 韩树山, 程月红, 陈赟. 苏州地区某深基坑悬臂双排桩支护技术[J]. 施工技术, 2012, **41**(379): 22 - 25. (HAN

- Shu-shan, CHENG Yue-hong, CHEN Yun. Double rows of cantilever bored pile retaining technology for a deep foundation in Suzhou[J]. Construction Technology, 2012, 41(379): 22 - 25. (in Chinese))
- [23] 李苏春, 袁运涛. 苏州凤凰国际书城基坑监测分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 129 - 133. (LI Su-chun, YUAN Yun-tao. Analysis of excavation monitoring for the Phoenix International Bookstore in Suzhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(1): 129 - 133. (in Chinese))
- [24] 袁运涛, 李苏春. 临近地铁车站深基坑开挖综合控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 843 - 847. (YUAN Yun-tao, LI Su-chun. Integrated control of deep excavation nearby the subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 843 - 847. (in Chinese))
- [25] 吴洋. 基坑支护的优化设计与应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2013. (WU Yang. The foundation pit of the optimization design and application research[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese))
- [26] 李苏春, 袁运涛. 两紧邻基坑支护设计及监测分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(10): 89 - 94. (LI Su-chun, YUAN Yun-tao. Analysis of excavation retaining design and monitoring for two adjacent foundations[J]. Industrial Construction, 2012, 42(10): 89 - 94. (in Chinese))
- [27] 王晚中, 李为民, 温文富. 苏州某软土深基坑支护设计[J]. 山西建筑, 2011, 37(12): 51 - 52. (WANG Wan-zhong, LI Wei-min, WEN Wen-fu. Support design of deep foundation pit of a soft soil in Suzhou[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(12): 51 - 52. (in Chinese))
- [28] 张林元, 周山龙, 徐忠民, 等. 邻近既有轨道交通区间隧道深基坑施工技术研究[J]. 苏州大学学报(工学版), 2012, 32(6): 76 - 82. (ZHANG Lin-yuan, ZHOU Shan-long, XU Zhong-min, et al. Research on construction technology of deep excavation adjacent to the existing running tunnels of track traffic[J]. Journal of Soochow University (Engineering Science Edition), 2012, 32(6): 76 - 82. (in Chinese))
- [29] 刘建国. 排桩支护在软土地层超深基坑中的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(2): 215 - 219, 227. (LIU Jian-guo. Application of soldier pile retaining system in super-deep foundation pit in soft soil[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(2): 215 - 219, 227. (in Chinese))
- [30] 周小华. 苏州轨道交通苏州火车站站结构设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 150 - 154. (ZHOU Xiao-hua. Structural design for subway station in Suzhou trace transport[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 150 - 154. (in Chinese))
- [31] 贾彩虹, 杨国忠, 张雪颖. 苏州地铁超宽超深基坑工程监测与分析[J]. 铁道建筑, 2010(10): 61 - 65. (JIA Cai-hong, YANG Guo-zhong, ZHANG Xue-ying. Field measurement of an ultra-wide and ultra-deep metro excavation in Suzhou[J]. Railway Engineering, 2010(10): 61 - 65. (in Chinese))
- [32] 陈彪. 地铁车站深基坑开挖与支护方案优化的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. (CHEN Biao. Optimization study on excavating and supporting structure of deep foundation pit in subway station[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [33] 陈彪, 吕小军, 钱德玲. 数值分析在深大基坑开挖过程中的应用[J]. 工业建筑, 2011, 41(增刊): 465 - 469. (CHEN Biao, LÜ Xiao-jun, QIAN De-ling. The applications of numerical analysis of oversize & deep excavation[J]. Industrial Construction, 2011, 41(S0): 465 - 469. (in Chinese))
- [34] 穆永江. 苏州地铁某车站深基坑围护结构监测分析[J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2009, 22(3): 38 - 43. (MU Yong-jiang. Monitoring analysis on exterior-protected construction of foundation-pit of subway in Suzhou[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science), 2009, 22(3): 38 - 43. (in Chinese))
- [35] 陈树杰, 廖振宇. 苏州乐园站深基坑监测分析实例[J]. 铁道勘察, 2010(3): 27 - 30. (CHEN Shu-jie, LIAO Zhen-yu. A practical example for monitoring and analysis on deep foundation pits at Leyuan station in Suzhou[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010(3): 27 - 30. (in Chinese))
- [36] 李雁艳. 地铁深基坑围护结构设计与施工监测对比分析[J]. 铁道勘测与设计, 2011(5): 82 - 85. (LI Yan-yan. Design and construction of retaining structures and analysis of field measurements for a deep metro excavation[J]. Railway Survey and Design, 2011(5): 82 - 85. (in Chinese))
- [37] 陈丽萍. 地铁深基坑围护结构设计与监测数据分析[J]. 铁道勘测与设计, 2010(2): 24 - 27. (CHEN Li-ping. Design of retaining structures and analysis of field measurements for a deep metro excavation[J]. Railway Survey and Design, 2010(2): 24 - 27. (in Chinese))
- [38] 李昂. 软土地区半盖挖地铁车站立柱参数研究[D]. 长春: 吉林建筑工程学院, 2012. (LI Ang. Parameters research of column in subway station excavated by semi-top-down

- method with soft soil area[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2012. (in Chinese))
- [39] 娄承滨, 施毅, 童立元. 苏州地铁某车站深基坑变形及支撑轴力规律研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2009, 24(增刊): 107 - 109, 115. (LOU Cheng-bin, SHI Yi, TONG Li-yuan. Study on the deformations and the law of the axial strut forces of a metro station excavation in Suzhou[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science), 2009, 24(S0): 107 - 109. (in Chinese))
- [40] 燕喜军, 朱炎兵. 考虑时空效应的软土地区基坑变形分析[J]. 铁道勘测与设计, 2012(1): 54 - 58. (YAN Xi-jun, ZHU Yan-bing. Deformation behaviors of an excavation in soft clays considering the time-space-effect[J]. Railway Survey and Design, 2012(1): 54 - 58. (in Chinese))
- [41] 王强, 刘松玉, 童立元, 等. 多支撑地下连续墙动态开挖过程中 m 值反分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 352 - 358. (WANG Qiang, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Back-analysis of m value of multi-braced slurry wall in staged excavation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2011, 41(2): 352 - 358. (in Chinese))
- [42] 徐修发. 苏州地铁车站深基坑工程的监测与分析[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(12): 206 - 208. (XU Xiu-fa. The monitoring of and analysis on the deep excavation of Suzhou tube station[J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2009, 19(12): 206 - 208. (in Chinese))
- [43] 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.
- [44] 周小华. 苏州轨道交通 1 号线深基坑围护结构设计的思考[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4): 166 - 168, 208. (ZHOU Xiao-hua. Design idea for deep excavation bracing structure in No.1 line of Suzhou Trace transport[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(4): 166 - 168, 208. (in Chinese))
- [45] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavation in soft soils based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 87 - 98.
- [46] CLOUGH G W, SMITH E M, SWEENEY B P. Movement control of excavation support system by iterative design[C]// Proc Foundation Engineering: Current Principles and Practices, ASCE. New York, 1989: 869 - 884.
- [47] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[M]. Reston: Geotechnical Special Publication, Design and Performance of Earth Retaining Structures (GSP 25), ASCE, 1990: 439 - 470.
- [48] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 203 - 224.
- [49] PECK R B. Deep excavations & tunneling in soft ground. State-of-the-art-report[C]// Proc 7th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, International Society for Soil mechanics and Geotechnical Engineering. Mexico, 1969: 225 - 290.
- [50] HASHASH Y M A, OSOULI A, MARULANDA C. Central artery/tunnel project excavation induced ground deformations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(9): 1399 - 1406.
- [51] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004 - 1017.
- [52] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1967.