

桩锚支护结构设计及支护结构变形监测分析

李芳, 李强, 于元峰, 宗士昌

(首钢地质勘查院北京爱地地质勘察基础工程公司, 北京 100144)

摘要:结合北京一个基坑支护工程,从设计角度就桩锚支护结构在基坑支护中的应用及变形控制进行了阐述。根据受力情况,护坡桩主筋配筋采用不均匀布置方式,结合工程、支护结构特点分段配筋;为了满足基坑安全及现场施工用地,砖墙设计时,在砖墙中部增设混凝土腰梁;护坡桩施工中,运用不同的施工工艺,保证了护坡范围内古树的生命安全。从基坑开挖监测角度,对支护结构顶部水平位移进行了监测,对周边建(构)筑物进行了沉降监测,同时对锚杆进行了检测与监测。结果分析表明,基坑水平及垂直变形量均在设计控制范围内,基坑整体稳定,桩锚支护结构对变形起到了有效的控制作用。

关键词:深基坑;基坑支护;桩锚支护;锚杆;变形;监测

中图分类号:TU473 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2015)04-0053-05

Design of Pile-anchor Retaining Structure and the Analysis on Its Deformation Monitoring/LI Fang, LI Qiang, YU Yuan-feng, ZONG Shi-chang (Shougang Geological Prospecting Institute, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on an excavation retaining project in Beijing, the paper describes the application of pile-anchor retaining structure in excavation retaining and the deformation control from the design point of view. According to the stress features and structure characteristics, main reinforcement of slope protection pile is unevenly arranged and segment reinforcement is adopted. Concrete middle beam was added in the middle of brick wall to ensure the excavation safety. In the slope protection pile construction, different construction technologies were used to protect the old trees in the slope protection range. From the excavation point view, horizontal displacement on top of retaining structure and subsidence of surrounding building structures were monitored, and the anchor was tested and monitored. The analysis shows that the horizontal and vertical deformation of excavation are in the scope of designed control range, the foundation pit is of overall stability, the pile-anchor retaining structure has played an effective control effect on the deformation.

Key words: deep foundation pit; excavation retaining; pile-anchor retaining; anchor; deformation; monitoring

0 引言

基坑工程是一个综合性和实践性很强的岩土工程。所谓基坑,指为进行建(构)筑物地下部分的施工由地面向下开挖出的空间^[1]。随着城市建设、工业化不断发展,建筑高度的增加,根据构造及使用要求,基础埋深也随之不断增加,使深基坑工程向大深度和大规模方向发展^[2]。目前,深基坑的支护技术虽已取得了长足的发展,但由于基坑开挖面积和深度加大,加上深基坑支护受建筑物的基础特点、场地水文地质条件、场地周边环境等诸多因素影响,使得基坑支护结构的设计不仅要考虑自身强度控制方面问题,更要从基坑变形控制方面加深设计。桩锚支护就是基坑工程中被大量采用的支护形式,它具有效果好、适应性强和施工简便等特点^[3],桩锚支护体系主要由护坡

桩、锚杆、腰梁及锁口梁等几部分组成^[4],通过桩与锚杆、梁的共同作用,达到护坡及控制变形目的。基于以上,本文以北京某一基坑护坡工程为例,从场地工程地质条件、周边环境、设计方案优化、支护结构检测等几个方面,对深基坑桩锚支护结构设计及结构变形进行分析研究,总结经验,以便对今后类似的深基坑支护工程起到指导作用。

1 工程概况

1.1 工程简介

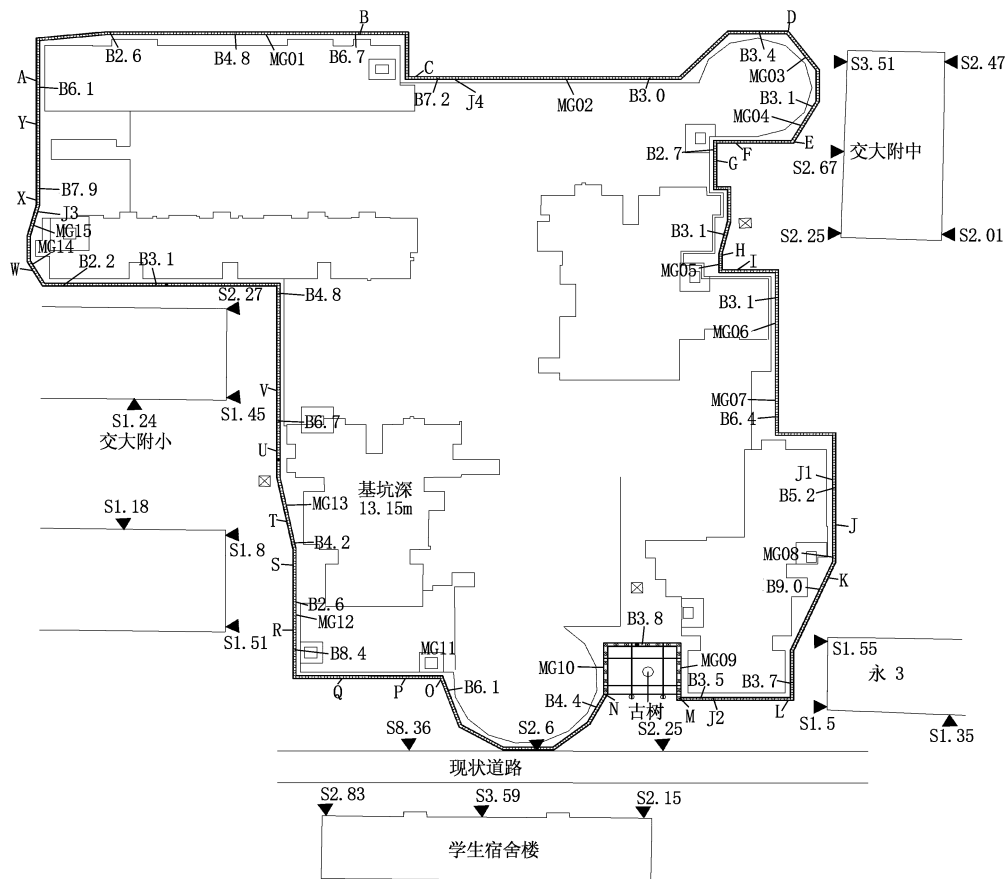
拟建工程场地西侧为交大附属小学,建筑物最高为3层,距离本场地约15 m。南侧紧邻现有校园道路,约12 m外为学生宿舍楼。东侧为交大二附中,建筑物最高为4层,距离本场地约10 m。北侧为规划道

收稿日期:2014-09-09;修回日期:2015-01-09

作者简介:李芳,女,汉族,1978年生,主任工程师,工程师,国家注册岩土工程师,从事岩土工程勘察、设计工作,北京市石景山区晋元庄路23号,114993@163.com。

路、已有道路、临建及铁研专用线。基坑周边场地有限,施工料场、生活区等均距基坑上口线较近,对变形

控制要求高。基坑深 12.35 ~ 14.85 m。基坑长约 142 m,宽约 132 m。基坑平面及周边环境如图 1 所示。



B—支护结构顶部位移监测点,其上的数字表示该点位移/mm;S—沉降观测点;MG—锚杆检测点;J—锚杆监测点

图1 基坑平面及周边环境示意图

1.2 场地工程地质条件

1.2.1 地层岩性

本工程覆盖地区 50.0 m 深度范围内的地层主要为人工填土层 (Q_4^{ml}) 及一般第四系冲、洪积层 (Q_4^{al+pl})。根据场地的工程地质情况,将现场地层划分为 8 个大层,各土层主要物理力学参数见表 1。

1.2.2 地下水

地下水共 2 层,第一层为上层滞水,主要受大气降水及地下管道渗漏补给,地下水水位埋深 9.5 ~ 9.8 m;第二层为层间潜水,主要受大气降水及地面径流补给,地下水水位埋深 15.6 ~ 17.5 m。

2 基坑支护设计方案

2.1 方案选取

基坑开挖是卸荷的过程,将引起基坑周边土体

表 1 土层物理力学参数

层号	地层名称	厚度/ m	c / kPa	ϕ / ($^{\circ}$)	γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	锚杆极限 粘结强度 标准值/kPa
①	杂填土	2.5	10	15	20	30
②	粘质粉土—砂质粉土	5.9	15	25	20	50~60
③	粉细砂		0	30	20	70
③ ₁	粘质粉土—砂质粉土	6.7	16	25	20	70~80
④	圆砾	4.0	0	38	22	120
⑤	粉质粘土—重粉质粘土	6.0	15	26	20	60
⑥	卵石	6.0	0	40	22	
⑦	粉质粘土—重粉质粘土	2.5	45	5	20	
⑧	卵石		0	40	22	

应力场变化及地面沉降,支护结构在两侧压力差的作用下产生水平向位移因而导致支护结构后面的土体产生位移,卸荷引起的坑底土体产生向上的位移也会导致支护结构后面的土体产生位移^[5]。本基坑周边环境复杂,基坑工程在保证安全的同时主要控制条件为变形控制。

目前规范提供的支护结构有支挡式结构、土钉墙、重力式水泥土墙、放坡或采用上述型式的组合^[1]。针对本深基坑周边情况及场地地质条件等多因素,选取护坡桩与预应力锚杆相结合的支护结构方案。

2.2 设计方案简介

地面超载按 $q = 15 \sim 30 \text{ kPa}$ 考虑。

基坑护坡均采用护坡桩 + 预应力锚杆支护方式,除 DE、KL、MN、NO 段护坡桩位于地表外,其他处护坡桩桩顶标高位于地表下 -3.0 m ,桩顶以上 3 m 砌筑挡墙为 370 mm 砖墙。

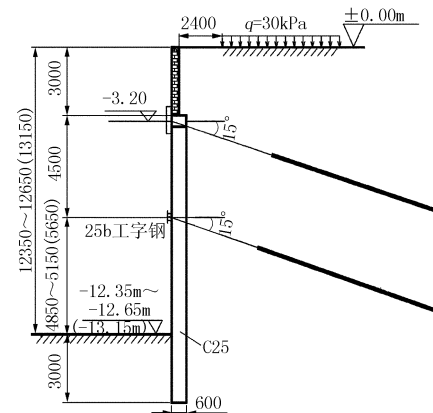
在基坑 MN 段有一棵古树需要保护,在此处加大桩间距至 2.0 m ,锚杆间距为两桩一锚;在顶部 -0.3 m 处做拉锚,水平间距 $4.0 \sim 6.0 \text{ m}$;通过减少古树范围内水泥注浆量,从而减少对古树根茎的影响。为避免机械施工破坏古树根茎,桩顶以下 3 m 采用人工挖孔, -3 m 至桩底采用机械成孔。桩长 15.35 m ,其中嵌固段 3 m ,桩径 800 mm ,桩顶之上做连梁,尺寸 $800 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,强度 C25,两侧各配 $4\text{Ø}20\text{HRB}335$ 级热轧螺纹钢筋,中间上下各加配 $2\text{Ø}16\text{HRB}335$ 级热轧螺纹钢筋,箍筋 $\text{Ø}8@200$ 。锚杆配 $d15 (7\text{Ø}5)$ 低松弛型钢绞线,强度 1860 MPa 。锚杆位置及设计参数见表 2。

表 2 锚杆位置及设计参数

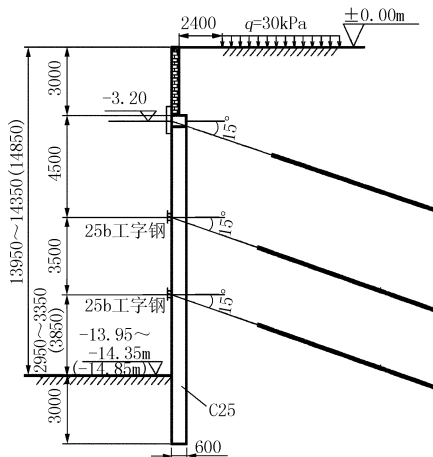
侧壁	锚杆位置/ m	锚杆水 平间距/ m	自由段 长度/ m	锚固段 长度/ m	钢筋 线/ 束	设计 拉力/ kN	设计锁 定值/ kN
AB、CD、EF、 GH、IJ、LM、 VW、XY	-3.2	2.4	6	13	2	225	135 ~ 180
	-7.5	1.8	5	18	3	445	267 ~ 356
PQ、RS、TV	-3.2	2.4	6	13	2	225	135 ~ 180
	-7.5	1.8	5	19	3	480	288 ~ 384
DE、KL、NO	-3.0	2.4	5	13	2	225	180
	-7.5	1.8	5	17	3	425	340
MN	-0.3	4.0		15	1	145	116
	-4.0	2.0		15	2	265	212
	-8.0	2.0		15	3	395	316
	-0.3	6.0		12	2	275	165
	-4.5	2.0	5	18	2	315	189
	-8.0	2.0	5	16	3	400	240
其他段	-3.2	2.4	6 ~ 7	13	2	225	135 ~ 180
	-7.5	1.8	5	15	2	370	222 ~ 296
	-11.0	1.8	5	16	3	390	234 ~ 312
			(18)		(440)	(264 ~ 352)	

基坑其他段护坡桩桩长 $12.35 \sim 15.35 \text{ m}$,其中嵌固段 3 m ,桩间距 1.2 m ,桩径 600 mm ,桩身强度 C25。锚杆孔径 150 mm ,下倾角 15° 。锚杆成孔后下入 $d15$

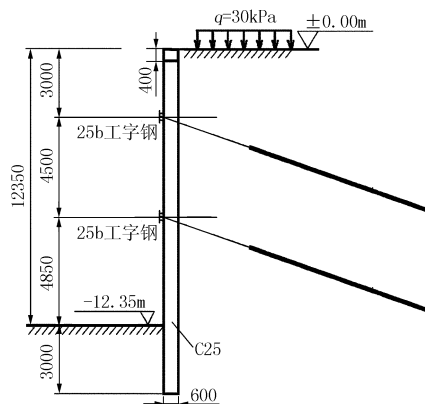
($7\text{Ø}5$)低松弛型钢绞线,强度 1860 MPa ,锚杆位置及设计参数见表 2。桩间采用挂网喷射细石混凝土保护。桩顶设钢筋混凝土冠梁,尺寸 $700 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ (DE、KL、NO 段 $600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$),锚杆锁在冠梁或 2 根 25b 工字钢腰梁上,桩锚支护结构剖面见图 2;桩身及冠梁配筋见图 3;桩身临坑侧配筋见表 3。



(a) AB、CD、EF、GH、IJ、LM、PQ、RS、TV、VW、XY段



(b) BC、FG、HI、JK、OP、QR、ST、UV、WX、YA段



(c) DE、KL、NO段

图 2 桩锚支护结构剖面

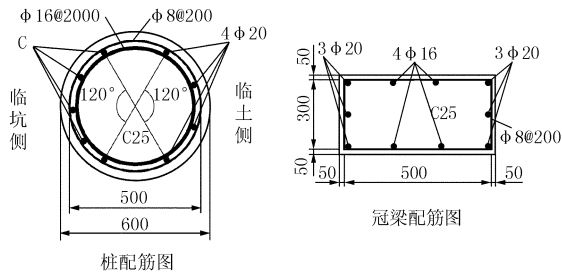


图3 桩身及冠梁配筋

表3 桩身临坑侧配筋参数

侧壁	桩长/m	临坑侧配筋 C	
		配筋长度	配筋量
AB、CD、EF、GH、IJ、LM、VW、XY	12.35 ~ 12.65	桩顶 ~ -4.5 m	4φ22
		-4.5 ~ -9.35(9.65) m	6φ22
		-9.35(9.65) m ~ 桩底	4φ22
PQ、RS、TV	13.15	桩顶 ~ -4.5 m	4φ22
		-4.5 ~ -10.15 m	6φ22
DE、KL、MN、NO	15.35	通长配置	4φ22
	13.95 ~ 14.35	通长配置	4φ22
其他段	14.85	桩顶 ~ -8.0 m	4φ22
		-8.0 ~ -11.85 m	5φ22
		-11.85 m ~ 桩底	4φ22

桩顶挡墙为 370 mm 砖墙,采用 MU 7.5 机制砖, M5.0 水泥砂浆砌筑,挡墙顶设置 370 mm × 200 mm 混凝土压顶梁,挡墙中设置 370 mm × 370 mm 混凝土立柱,立柱间距 3600 mm,挡墙中部设置 370 mm × 200 mm 混凝土腰梁。

3 基坑开挖监测

根据深基坑支护有关规范要求以及本工程项目特殊的位置影响,结构主体地下部分施工阶段必须对基坑支护系统和周边环境进行监测。

3.1 顶部水平位移以及建筑物沉降监测

本基坑按 I 级基坑控制变形,基坑监测预警值、报警值根据有关规范^[6]确定,水平变形安全预警值为 19 ~ 22 mm,安全报警值为 25 ~ 29 mm,垂直变形预警值 13 ~ 15 mm,安全报警值 18 ~ 20 mm。自 2013 年 8 月 12 日开始,按规定的监测要求,对布置在支护结构冠梁顶部的 27 个水平变形监测点进行了变形监测。监测点位置和整个基坑的顶部水平总变形量见图 1,基坑各侧壁实测水平变形最大的监测点变形时程曲线见图 4。沉降观测表明,建筑物沉降量都不大,相对沉降量较大的学生宿舍楼、南侧现状道路、交大附中的沉降-时间曲线见图 5。

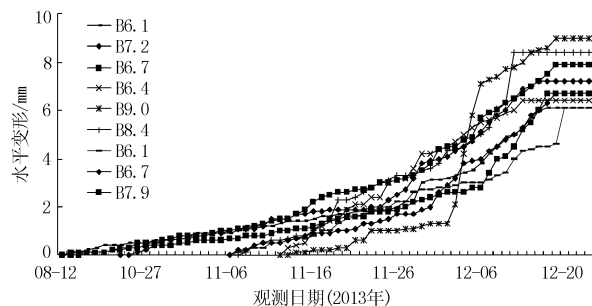


图4 实测水平变形时程曲线

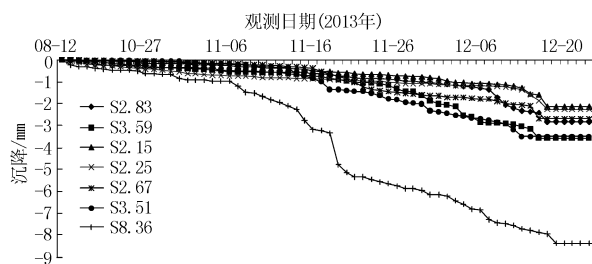


图5 学生宿舍楼、现状道路、交大附中沉降-时间曲线

3.2 预应力锚杆测试

3.2.1 锚杆检测

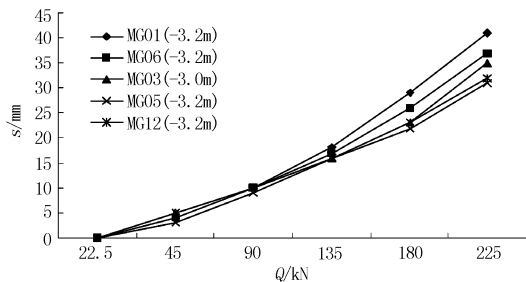
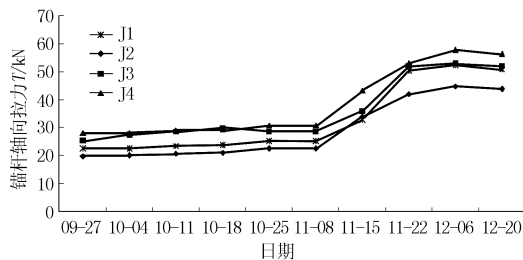
对本工程施工的 15 根锚杆进行验收试验。最大张拉荷载拉至 1.0 倍轴向设计荷载。检测锚杆各级荷载下锚头累计变形结果见表 4,荷载与锚头累计位移(Q-s)曲线见图 6。

3.2.2 锚杆监测

采用经率定的安装在锚头的负荷传感器以及应变仪进行了锚杆轴力监测,基坑各边第一排锚杆监测锚杆的轴力 T 随时间 t 的变化曲线见图 7。

表4 分级荷载下各锚杆锚头累计位移 mm

锚杆编号	最大张拉荷载 N_u /kN	锚杆位置/m	分级荷载/kN					
			0.1 N_u	0.2 N_u	0.4 N_u	0.6 N_u	0.8 N_u	1.0 N_u
MG01		-3.2	0	4	10	18	29	41
MG03		-3.0	0	5	10	16	23	35
MG05	225	-3.2	0	3	9	16	22	31
MG06		-3.2	0	4	10	17	26	37
MG12		-3.2	0	5	18	16	23	32
MG02	445	-7.5	0	5	11	20	31	43
MG07		-7.5	0	5	14	26	39	50
MG04	425	-7.5	0	6	13	27	39	54
MG08		-7.5	0	4	11	20	29	38
MG14		-7.5	0	5	13	24	37	49
MG09	265	-4.0	0	6	13	22	32	44
MG10	395	-8.0	0	5	12	21	34	50
MG11	390	-11.0	0	5	12	20	30	41
MG13	480	-7.5	0	8	19	33	48	65
MG15	440	-11.0	0	6	16	29	42	55

图 6 荷载与锚头累计位移 ($Q-s$) 曲线图 7 锚杆轴力 $T-t$ 曲线

4 基坑监测结果分析

桩顶水平位移在监测点水平变形时程曲线表现为从开始到开挖结束,桩顶整体趋势是一直向基坑内倾斜的。开挖引起的各侧壁顶部水平变形的增加量均在 10 mm 内。图中看出,曲线有明显波动,说明随着基坑开挖深度加大,支护结构受到桩后土体的压力作用变化比较明显,表现在桩土锚杆之间发生相互作用,慢慢达到平衡的过程,后曲线比较平稳,是锚杆施工后对支护结构的整体拉拽作用,使得支护结构变形变小并趋于稳定。水平变形最大位置处变形量为 9 mm(设计水平变形安全预警值为 19 mm),经分析,此部位因冬季暖气管道渗漏加上此处上层滞水较大导致局部地方桩间土流失,出现流砂空鼓现象,通过采取自渗井加注浆加固措施,很好的解决了变形问题,确保了基坑稳定。

经观察,与基坑紧临近的现状道路未出现开裂等异常情况,周边建筑物相对沉降大的学生宿舍楼、交大附中,均未出现墙体开裂等异常情况。沉降变形除现状道路西侧沉降量为 8.36 mm(设计垂直变形安全预警值为 13 mm)外,其他建筑物沉降量均小于 5 mm。经分析,现状道路沉降量大的原因,是因为此处回填土较厚,密实度较差,在行驶重车后,造成此处局部下陷,经处理后,道路恢复稳定状态,沉降变形趋于稳定。

从锚杆检测情况看,锚杆受拔时,锚杆锚头累计变形最小为 31 mm,最大为 65 mm,平均值为 44.33 mm。在图 6($Q-s$ 曲线)中,5 根锚杆锚固段基本相同,穿过的地层为粘质粉土-砂质粉土、施工与注浆工艺也基本相同,从曲线可看出,锚杆锚头变形相差不大。由于锚杆的抗拔承载力不但与土层和锚固体之间的界面摩阻力有直接的关系,同时与锚杆的施工质量密切相关^[7],因此,说明本工程施工质量比较稳定。

锚杆轴力变化与作用在支护结构上的土压力以及支护结构的变形有关。从图 7 中可看出,所监测的锚杆轴力未达到设计锁定值的 50%(J1~J4 设计锁定值分别为 180、180、135、135 kN),说明支护结构的土压力小于计算值;曲线有较为明显的波动,说明支护结构在此时间段变形稍有发展;后曲线趋于平稳,说明基坑整体基本稳定。

5 结论

(1) 针对桩锚支护结构特点,本设计对护坡桩配筋进行了优化,即护坡桩主筋采用不均匀布置方式,在受力大的临坑侧按受力配筋计算布设,在临土侧按结构配筋布设,在满足支护结构强度要求下,减少配筋量;同时经理论计算、验算,桩身弯矩在不同深度大小分布不同,结合以往类似工程经验,桩身配筋按弯矩大小采取分段配筋方式。基坑监测结果表明,本桩锚支护设计方案满足工程需求。通过对设计方案优化,大大减少了护坡桩配筋量,收到了很好的经济效益。

(2) 由于本工程场地狭小,为了更大限度利用有限空间,桩顶砖墙设计时,在砖墙中部增设了 370 mm×200 mm 混凝土腰梁,提高了砖墙的整体稳定性,实践证明,在坡顶 2 m 外范围堆放钢筋等杂物时,基坑稳定且能满足变形要求。

(3) 基坑护坡范围内,有古树需要保护,为了确保古树生命安全的同时工程顺利进行,对古树实行了躲避措施和保护方案,在设计时,为了避免机械施工对古树根茎破坏,特明确在地面以下 3 m 范围内采用人工挖孔成孔工艺,在躲过古树根茎后采用机械成孔。此方法在保证古树生命安全的同时保证了施工质量,可在基坑开挖范围内有树木保护的地方推广应用。

(下转第 62 页)

度为7.8 m,局部开挖深度为9.0 m。基坑四周均临道路,其东侧邻天津地铁一号线区间隧道,隧道侧墙距拟建地下室外墙24.0 m左右。工程实践表明,在天津地区采用单排桩悬臂式支护的开挖深度一般不超过6.0 m,但支护桩桩顶水平位移可达10 cm以上。对于本工程来说,大面积开挖深度达7.8 m,基坑平面尺寸又很大,采用内支撑方案造价将会非常高,同时架设水平支撑又因工期限制而不允许。采用外围设止水帷幕、帷幕内放坡开挖的方案周边条件不允许。综合考虑各种因素,为了解决悬臂支护基坑变形过大的问题,对开挖深度为7.8 m的部位,采用 $\varnothing 600$ mm单排灌注桩加预留反压土的支护方案,排桩外设水泥搅拌桩止水帷幕。排桩支护的悬臂高度为3.2 m,反压土顶宽为1.0 m,高度为4.6 m,底宽为5.0 m。对开挖深度9.0 m处,采用双排桩悬臂式支护加止水帷幕的设计方案。

基坑开挖后经实测,预留反压土部位悬臂式支护结构的最大水平位移为6.1 cm,在规范允许的范围之内。周围环境的监测结果表明均处于安全状态。由此可见,悬臂支护结构的基坑中在条件允许的情况下,预留反压土的做法可以有效减小基坑的变形,控制支护结构的位移,降低支护工程的造价。

3 结语

控制悬臂式支护结构局部变形的常用措施有双

排桩外拉、锚杆(索)加固、基坑内斜撑、坑内土加固、预留反压土等多种方法。在悬臂式支护结构设计时,可根据工程地质条件、周边环境、基坑的形状与尺寸、施工作业空间的大小、主体施工方案、施工季节变化等各项因素,选择前述的一种或几种方法来满足基坑局部对变形的要求,从而发挥悬臂式支护结构的优势,保证周围环境的安全,使基坑工程既安全可靠,又经济合理、方便施工。

参考文献:

- [1] 陈福全,吴国荣,刘毓胤,等. 基坑内预留土堤对基坑性状的影响分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1470-1474.
- [2] 李顺群,郑刚,王英红,等. 反压土对悬臂式支护结构嵌固深度的影响研究[J]. 岩土力学,2011,32(11):3427-3431.
- [3] 罗战友,夏建中,刘筱. 基坑内土体加固对悬臂式支护结构的影响分析[J]. 岩土力学,2006,27(10):931-934.
- [4] 苏德利. 悬臂式基坑支护结构选型与整体稳定性分析[J]. 河南城建学院学报,2010,19(5):20-23,52.
- [5] 张明中,李江. 不同支护形式在北京西环广场基坑工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2003,(S1):61-63.
- [6] 付涛,艾晓辅,池秀文,等. 悬臂式排桩支护结构位移和弯矩的分析研究[J]. 建筑科学,2013,29(3):11-16.
- [7] 杜甫志,王宪章,吴旭君,等. 饱水砂层深基坑中悬臂式双排桩支护及地下水处理方法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):55-59.
- [8] 刘利平,刘晶晶,张鹏,等. 土钉和桩锚组合式支护体系受力和变形的数值模拟[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(8):53-57.

(上接第57页)

(4) 锚杆轴力与作用在支护结构上的土压力以及支护结构变形有关,同时也能间接的反映基坑的整体稳定性。

(5) 通过基坑开挖监测及分析,证明本桩锚支护设计是安全可靠的,并具有一定的安全储备。

(6) 桩锚支护结构能很好有效的控制基坑水平变形,当深基坑周边环境需要对变形进行严格控制时,可选用桩锚支护方案进行处理。

参考文献:

- [1] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 桂国庆,涂铿. 深基坑工程的研究现状与发展趋势[J]. 工程力

学,2000,(S1).

- [3] 吴恒,周东,李陶深,等. 深基坑桩锚支护协同演化优化设计[J]. 岩土工程学报,2002,24(4).
- [4] 姜晨光,林新贤,黄家兴,等. 深基坑桩锚支护结构变形监测与初步分析[J]. 矿产勘查,2002,(8).
- [5] 王曙光. 复杂周边环境基坑工程变形控制技术[J]. 岩土工程学报,2013,35(7).
- [6] GB 50497—2009,建筑基坑工程监测技术规范[S].
- [7] ASCE/SEI 7—05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S]. American Society of Civil Engineers,2006.
- [8] 许录明,楚丽爽,戴建阳,等. 桩锚结构在深基坑支护中的应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):57-60.
- [9] 刘利平,刘晶晶,张鹏,等. 土钉和桩锚组合式支护体系受力和变形的数值模拟[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(8):53-57.