

奈伦国贸大厦深基坑支护工程实例与分析

郭永成¹, 吴刚², 周玉明², 秦红江¹

(1. 天津电力设计院, 天津 300400; 2. 天津市勘察院, 天津 300191)

摘要: 首先介绍了奈伦国贸大厦工程概况和场地周围的环境条件以及工程地质条件, 然后论述了该深基坑的支护结构设计及计算, 最后阐明了此项基坑支护设计实施的效果。实践证明该基坑支护设计取得了良好的社会效益和经济效益, 可为其它类似工程提供应用参考。

关键词: 深基坑; 支护; 设计; 效果

中图分类号: TU463 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0721-07

作者简介: 郭永成(1974-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 主要从事岩土工程勘察、基坑支护及其他地基处理设计工作。E-mail: wugangnannan@gmail.com。

Case studies of bracings for deep excavation of Nailun International Trade Building

GUO Yong-cheng¹, WU Gang², ZHOU Yu-ming², QIN Hong-jiang¹

(1. Tianjin Electric Power Design Institute, Tianjin 300400, China; 2. Tianjin Institute Geotechnical Investigation & Surveying, Tianjin 300191, China)

Abstract: The general situations, ambient environmental conditions of planning site as well as engineering geological conditions of Nailun International Trade Building are introduced. The structural design of bracings and calculation of deep excavation are expounded. The practical effect of the bracing design for the deep excavation is explained. The engineering practices show that this bracing design result in favorable social and economic benefits and can offer reference for other similar projects.

Key words: deep excavation; bracing; design; effect

0 引言

近年来, 随着中国经济的快速发展、城市建设规模的不断扩大, 高层建筑和地下交通工程建设面临的深基坑开挖问题越来越向着更大、更深、更复杂的方向发展。目前, 由于勘察、设计或施工不当而引起的基坑支护失效造成毗邻的既有建筑、交通要道、市政设施的破坏现象已屡见不鲜。因此, 在基坑支护设计方面, 应根据现场实际情况, 综合考虑各种影响因素, 在确保安全的前提下, 尽可能地做到节约投资和方便主体施工。本文以奈伦国贸大厦基坑支护工程为例, 介绍了该工程的支护设计方法, 并对其支护效果进行了分析。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

奈伦国贸大厦位于天津市响螺湾商务区中部偏南37号地块。该工程总建筑面积15万m², 其中地上部

分约11万m², 地下部分约4万m², 主要包括商务办公、酒店、公寓、商业及配套设施等。大厦由两栋塔楼构成, A座塔楼22层, 高度为83.2m, B座塔楼38层, 高度158.0m, 整个地下均为4层地下室。两座塔楼位于基坑中间部位, 塔楼周边为纯地下车库。本工程建筑±0.000相当于大沽标高3.900m, 现地表大沽标高为1.700m, 相当于建筑标高-2.200。B座塔楼坑底标高为-22.300, 基坑深度为20.1m, 电梯井深度为23.1m; A座塔楼及其纯地下车库部分坑底标高为-21.600, 基坑深度为19.4m, 电梯井深度为21.0m; 电梯井均位于塔楼中部。整个基坑面积约9600m², 基坑周边长度约400.0m。本工程场地四周为已建道路, 其中北侧为横福路, 南侧为万顺道, 西侧为滨河西路, 东侧为众安路, 周边条件较为紧张, 地下车库外墙皮距离建筑红线最近距离仅为1.5m。场地周边条件见图1。

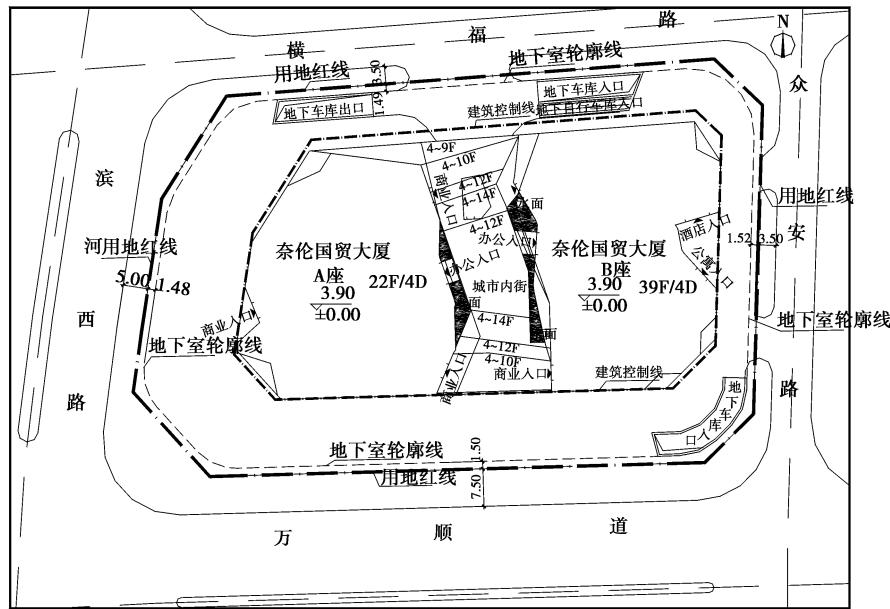


图 1 总平面图

Fig. 1 General plan

表 1 场地浅层土物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of shallow foundation soils

力学层号	岩土名称	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	$\phi/(^{\circ})$	c/kPa	渗透性
①	人工填土	3.0	18.8	8.2	18.5	不透水
② ₁	粉质黏土	4.3	19.0	9.2	11.8	不透水
② ₂	粉土	2.0	19.8	28.3	14.9	弱透水
② ₃	淤泥质黏土	7.5	17.9	4.6	9.5	不透水
② ₄	粉质黏土	1.6	19.6	9.3	15.0	不透水
③	粉质黏土	3.7	20.1	10.7	20.2	不透水
④ ₁	粉质黏土	4.4	20.1	11.5	21.5	不透水
④ ₂	粉土	2.7	20.4	28.2	16.0	弱透水
④ ₃	粉砂	4.3	20.5	29.9	13.6	弱透水
⑤ ₁	粉砂	14.9	20.3	30.2	14.9	弱透水
⑤ ₂	粉质黏土	3.6	19.7			

注: c, ϕ 为直剪快剪强度指标标准值。

1.2 工程地质条件

该场地地势平坦, 场地浅层土的主要物理力学性质指标见表 1。

1.3 水文地质条件

本工程场地地下水分为潜水(埋深 19.0 m 以上)和微承压水(埋深 25.0~45.0 m)两个含水组。潜水静止水位埋深为 1.3~1.5 m; 微承压水含水组顶板埋深在 25.0 m 左右, 主要含水层由④₂ 粉土层、④₃ 粉砂层及⑤₁ 粉砂层组成。场地土层渗透性见表 1。

根据抽水试验结果, 场地微承压水含水层水头埋深约为 8.0 m, 相当于大沽标高-6.500 左右。

2 基坑支护设计

2.1 支护方案选择

综合考虑基坑深度、形状、工程地质及水文地质

条件、周边环境要求以及工程造价等因素, 经过多种方案的分析对比、综合论证后, 本基坑采用带四道支撑的钻孔灌注排桩方案进行支护。

根据基坑的深度和形状, 4 层水平支撑系统均由“眼镜式”支撑、辐射撑和角撑组成, 均采用钢筋混凝土结构。为使每根支承柱同时贯穿 4 层支撑, 4 层支撑系统在水平面上的投影重合, 而且各层支撑体系中同名杆件的截面宽度一致, 根据各层支撑体系受力不同选取不同的高度。这样的支撑系统可以为土方开挖和主体结构的施工提供尽可能开阔的工作面, 减少支承柱的布设, 并能够充分发挥混凝土结构环梁抗压性能优异的材料特性, 从而使支撑系统经济、合理、简洁。基坑支护平面布置图见图 2。

2.2 计算方法及参数

本工程带支撑排桩支护桩体内力及位移的计算采

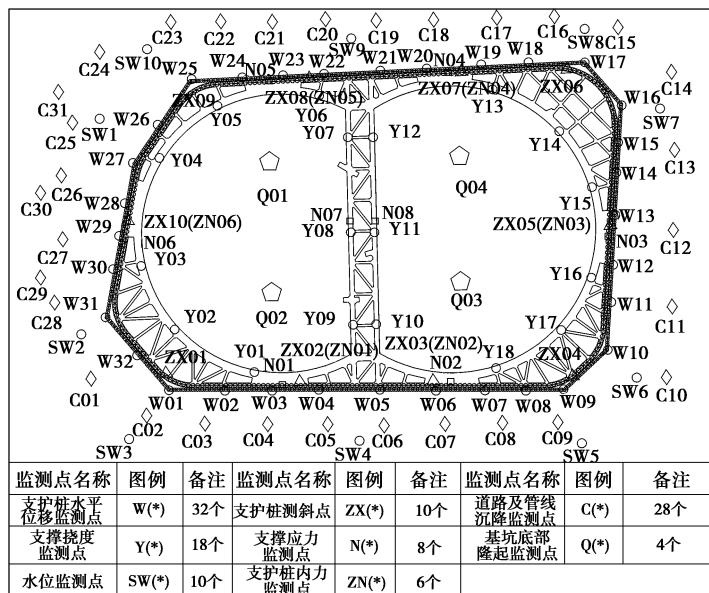
用朗肯土压力理论, 土压力按矩形分布, 采用直剪快剪试验强度指标, 按照水土合算的方法, 根据弹性抗力法^[1]求得计算结果。对于支护桩嵌固深度的确定, 本工程主要通过基坑的抗倾覆安全性来确定, 使其抗倾覆安全系数大于 1.2。基坑的整体稳定计算方法采用瑞典条分法。

基坑南、西、北三侧 A 座塔楼及其纯地下车库部分基坑深度为 19.4 m, 采用 $\Phi 1000 @ 1200$ 钻孔灌注桩支护结构, 桩长为 30.0 m, 桩顶设置冠梁, 桩侧设置

三道腰梁, 4 层支撑体系分别作用在桩顶冠梁和桩侧腰梁上。其剖面图见图 3 (a)。

B 座塔楼基坑深度为 20.1 m, 其距基坑东侧坑边最近距离仅为 4.3 m, 故基坑东侧按坑深 20.1 m 考虑。该侧采用 $\Phi 1200 @ 1400$ 钻孔灌注桩支护结构, 桩长为 31.5 m, 桩顶设置冠梁, 桩侧设置 3 道腰梁, 4 层支撑体系分别作用在桩顶冠梁和桩侧腰梁上。其剖面图见图 3 (b)。

2.3 计算结果



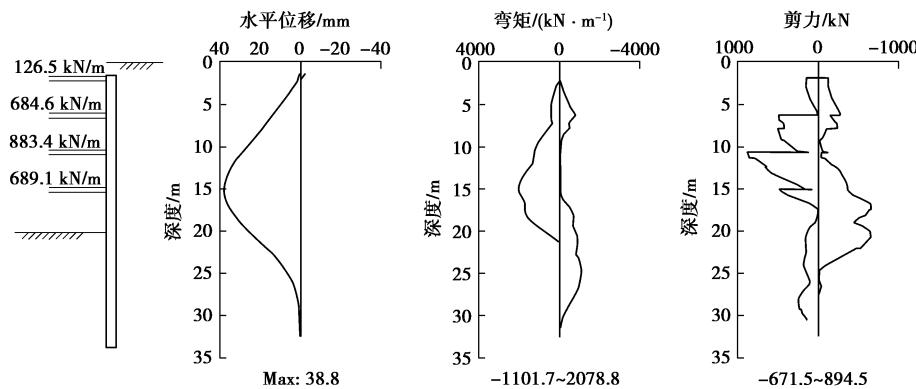


图 4 基坑南、西、北三侧计算结果

Fig. 4 Calculated results of south, west and north sides of excavation

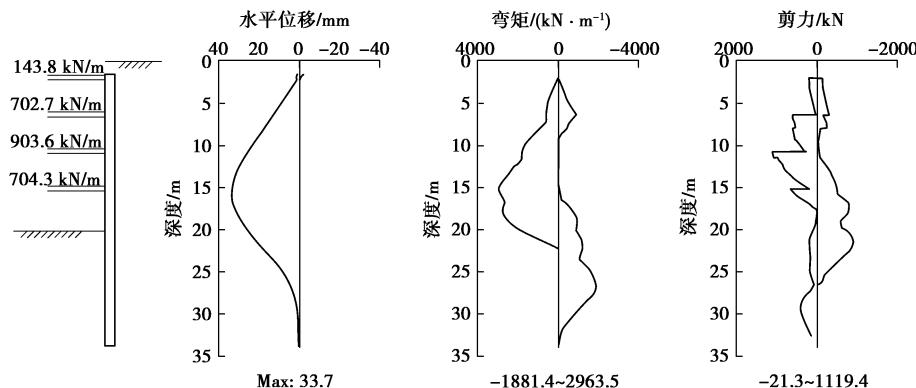


图 5 基坑东侧计算结果

Fig. 5 Calculated results of east side of the excavation

表 2 支撑体系内力计算结果

Table 2 Calculated results of internal force of bracing system

支撑体系层号	类型	截面尺寸/(mm×mm)	最大弯矩/(kN·m)	最大轴力/kN	最大剪力/kN
第 1 层支撑体系	冠梁	1200×800	1140	—	659
	环梁	2000×800	1516	5704	—
	对撑	1200×800	259	3084	—
	辐射撑、角撑	600×800	344	1321	—
第 2、4 层支撑体系	腰梁	1400×1200	3523	—	2638
	环梁	2000×1200	5327	26250	—
	对撑	1200×1200	1322	14626	—
	辐射撑、角撑	800×1200	1105	6150	—
第 3 层支撑体系	腰梁	1400×1500	4004	—	3066
	环梁	2000×1500	6139	30816	—
	对撑	1200×1500	1532	16970	—
	辐射撑、角撑	800×1500	1629	7065	—

本工程根据基坑深度的不同情况分别进行了计算。支护结构计算结果见图 4、5。

基坑支撑体系内力的计算采用考虑支护桩、支撑结构及土体空间整体协同作用的有限单元法。支撑体系内力的计算结果见表 2。

2.4 立柱和立柱桩

土方开挖期间需要设置竖向构件来承担水平支撑体系的竖向力, 本工程采用临时钢立柱及其柱下钻孔灌注桩作为水平支撑系统的竖向支承构件。临时钢立柱由等边角钢和缀板焊接而成, 其在穿越底板的范围内需设置止水片。立柱桩除利用主体结构工程桩外, 其余均为另外加打。

2.5 基坑防水帷幕

为了有效防止潜水疏干对基坑周边环境造成影响, 本工程防水帷幕采用单排三轴水泥搅拌桩。搅拌桩桩顶位于现地表下 1.5 m, 有效桩长 30.5 m, 单径 850 mm, 搅拌桩固化剂采用 42.5 普硅水泥, 水泥掺入比不小于 20%, 水灰比 1.5, 要求全程复搅复喷。

2.6 基坑降水

本工程采用多滤头深井^[2]进行基底以上潜水的疏干。多滤头深井即在深井中集水、水泵抽水, 以达到基坑疏干和土体排水固结, 便于土方开挖的目的。土体由于自由水的排出, 在重力作用下, 土体孔隙比减小, 提高了土体强度, 对工程施工安全和环境保护均十分有利。疏干井井深 24.0 m, 单井的辐射面积约为 200~300 m², 平面基本呈正方形形状布置。

根据本工程水文地质资料, 经计算, 当基坑开挖深度达到 14.3 m 时, 其上覆土重不足以抵抗微承压水的浮托力, 需采取针对承压水的处理措施确保基坑工程的安全。基坑开挖深度与安全承压水位关系见表 3。

表 3 基坑开挖深度与安全承压水位关系

Table 3 Relationship between excavation depth and safe confined water level

序号	开挖深度(标高) h/m	安全承压水头 埋深 D/m	安全承压水 降深量 s/m
01	15.8(-18.000)	10.5	2.5
02	19.4(-21.600)	16.2	8.2
03	20.1(-22.300)	17.3	9.3
04	21.0(-23.200)	18.7	10.7
05	23.1(-25.300)	22.0	14.0

对影响基坑工程安全的承压水问题处理通常有“隔水”、“降压”两种技术手段。“隔水”即采用基坑围护体或者其它隔水帷幕穿透承压含水层, 进入相对隔水底板层, 以切断坑内外承压水的水力联系, 坑内只要对承压水进行疏干即可。“降压”即基坑防水帷幕不隔断承压含水层, 基坑开挖阶段必要时通过持续地启动降压井, 根据承压水稳定性进行按需降压, 控制承压水的水头在安全范围之内。

考虑到本工程场地微承压含水组厚度较大, 如果采取“隔水”的处理方法, 不仅过于保守, 而且现有的机械设备施工存在较大的难度, 因此经过认真分析计算, 最终决定采用坑内外同时降压的方法处理微承压水问题, 止水帷幕不隔断承压水层。坑内每个塔楼电梯坑附件布置两口降压井, 坑外沿坑边布置一排降压井, 井深均为 38.0 m, 同时在基坑内外布置观测井。开挖过程中, 必须确保降压井的不间断工作。根据降压井抽水量及观测井内的承压水头监测值, 确定开启的降压井数量、抽水速率, 合理控制承压水水头, 将减压降水对周边环境的影响控制到最低程度。

3 基坑开挖及施工顺序

基坑开挖及施工顺序为: ①进行场区障碍物的清除和平整; ②施工支护钻孔灌注桩、三轴水泥土搅拌桩、疏干井、降压井、立柱和立柱桩; ③待钻孔灌注桩、三轴水泥土搅拌桩强度达到设计要求, 并且疏干潜水 10 d 后, 坑内全面开挖至设计标高-4.600, 施工第 1 层水平支撑系统; ④待第 1 层水平支撑系统强度达到设计要求后, 开挖至设计标高-9.200, 施工第 2 层水平支撑系统; ⑤待第 2 层水平支撑系统强度达到设计要求后, 开挖至设计标高-13.750, 施工第 3 层水平支撑系统; ⑥开启降压井, 待微承压水含水层水头降幅和第 3 层水平支撑系统强度达到设计要求后, 开挖至设计标高-18.000, 施工第 4 层水平支撑系统; ⑦待第 4 层水平支撑系统强度达到设计要求后, 开挖至坑底设计标高, 并立即施工基础底板; ⑧待基础底板强度达到设计要求后, 拆除第 4 层水平支撑系统; ⑨继续施工至地下四层顶板, 待地下四层结构强度达到设计要求后, 拆除第 3 层水平支撑系统; ⑩继续施工至地下三层顶板, 待地下三层结构强度达到设计要求后, 拆除第 2 层水平支撑系统; ⑪继续施工至地下二层顶板, 待地下二层结构强度达到设计要求后, 拆除第 1 层水平支撑系统; ⑫继续施工主体结构。

基坑开挖及主体结构施工应严格按照以上顺序进行, 在每一层水平支撑系统未达到设计要求之前, 严禁进行下一步的土体开挖; 每一步主体结构强度未达到设计要求前, 严禁下一步水平支撑系统的拆除。

4 支护效果及分析

本工程基坑从 2008 年年底开始施工, 2009 年 7 月开始开挖, 2010 年 6 月开挖到坑底, 支护效果良好, 满足工程需要。

4.1 监测方案

本工程基坑深度大, 周边道路及管线均已施工完成, 监测单位制定了详尽的监测方案, 包括支护桩的位移监测、桩体测斜(预埋测斜管)、周边道路及管线的沉降监测、坑外地下水水位监测、坑底隆起量监测、支撑体系的应力位移及挠度监测等等。监测点位布置图详见图 2。

4.2 监测结果及分析

根据本工程周边环境情况, 本文选取支护桩深层水平位移监测、基坑周边道路沉降监测、支撑体系内力监测及其坑底隆起量监测结果进行分析。

(1) 支护桩深层水平位移监测

根据桩体测斜监测结果可知, 支护桩深层水平位

移随基坑开挖深度和时间的增加而逐步增大。支护桩最大水平位移均未超过 25 mm, 其发生位置随开挖深度的增加而逐渐向下移动。支护桩水平位移在基坑开挖到第四道支撑底部以前均较小, 至开挖第四道支撑以下土体时水平位移才逐渐增大, 这可能是第②₃ 淤泥质黏土层蠕变性的滞后效应, 且该层深度范围内支护桩水平位移均较大。图 6 为 ZX07 号支护桩的深层水平位移实测曲线图。

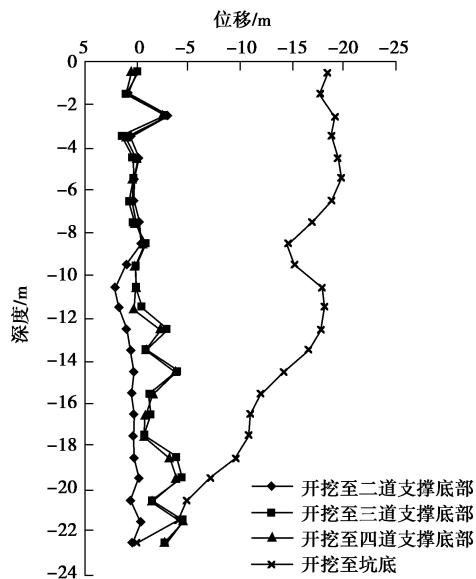


图 6 ZX07 支护桩深层水平位移曲线图

Fig. 6 Horizontal displacement curves of ZX07 bracing pile

(2) 基坑周边道路沉降监测

从图 7 可以看出, 基坑周边道路的沉降随开挖深度的变化曲线呈多级抛物线形, 每一级抛物线基本都对应一个施工工况, 且沉降值随土体开挖深度的增加而不断增大。当基坑开挖到基底时最大沉降为 32.6 mm, 在基础垫层浇筑完成后周边道路的沉降逐渐趋于稳定, 甚至还有所减小。由沉降数据可知, 基坑开挖对周边环境影响较小, 未对周边设施造成不利影响。

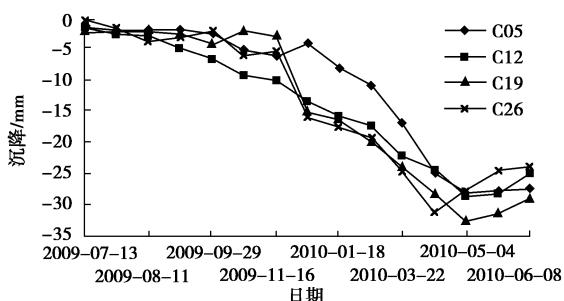


图 7 基坑周边道路沉降曲线图

Fig. 7 Settlement curves of roads around excavation

(3) 支撑体系内力监测

对撑、环梁支撑系统轴力随开挖时间的变化详见图 8, 9。从轴力的变化趋势可以看出, 支撑轴力随着基坑开挖深度的加大而逐渐增大, 且下一道支撑开始工作会影响上一道支撑的受力, 一般会有所减小, 对应位置的土体会有向坑内的位移, 但是由于土体的非弹性滞后效应, 可能与轴力的变化不同步。随着基坑开挖到坑底, 各道支撑经过一段时间的调整, 支撑与土体的耦合状态逐步显示一致性, 各道支撑的轴力值变化也趋于一致, 基坑土体的变形也趋于稳定。待基础素混凝土垫层施工完成后, 各道支撑的轴力值基本趋于稳定, 甚至还有所减小。根据支撑轴力监测结果可知, 每道支撑系统的桁架对撑轴力实测值均接近甚至超过计算值, 这说明“眼镜式”支撑的对撑桁架在整个支撑体系中作用极为重要, 设计时应适当加强其截面。另外, 第一道支撑系统的桁架对撑、环梁支撑轴力实测值均超过计算值, 这主要是因为第一道支撑系统最早施工、最晚拆除, 保留时间最长, 受外界环境影响(如车辆动载等)较大, 因此第一道支撑系统的截面不宜过小。

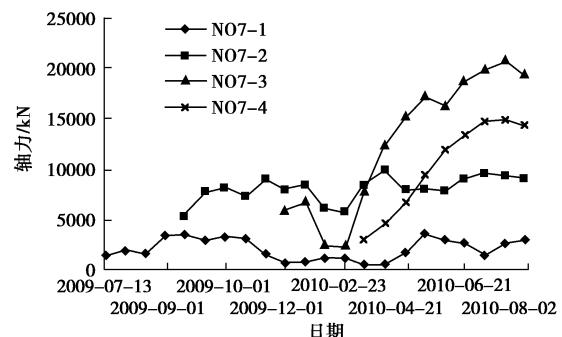


图 8 对撑轴力变化曲线图

Fig. 8 Curves of axial force of facing bracings

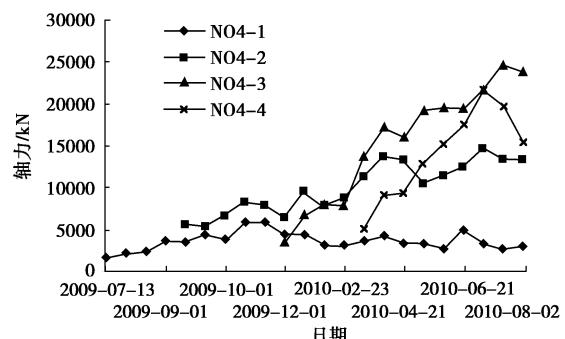


图 9 环梁轴力变化曲线图

Fig. 9 Curves of axial force of middle beam

(4) 坑底隆起量监测

本工程基坑开挖到坑底后, 监测单位对坑底隆起量进行了监测, 隆起量为 26~31 mm, 说明本工程基坑支护是安全的、合理的。

5 结 论

(1) 本工程基坑开挖深度较大, 支护设计突破了常规的地下连续墙支护方案的思维和经验约束, 采用了带支撑的钻孔灌注排桩进行支护, 水平支撑系统由“眼镜式”支撑、辐射撑和角撑组成, 经济合理, 安全可靠, 取得了良好的支护效果。

(2) 本工程采用了弹性抗力有限元法计算带支撑排桩的内力与位移, 计算结果较好地反映了工程实际, 可为其它类似工程提供应用参考。

(3) 在分布有巨厚微承压含水层的地区, 采用悬挂式止水帷幕结合基坑内外同时抽水降压的降水设计方案, 在天津地区是一个突破。

(4) “眼镜式”支撑的对撑桁架在整个支撑体系中作用极为重要, 设计时应适当加强其截面。由于第一道支撑系统最早施工、最晚拆除, 保留时间最长, 受外界环境影响较大, 因此第一道支撑系统的截面不

宜过小。

(5) 基坑开挖过程中, 对基坑支护体系的变形与内力以及基坑周边环境进行了全过程的监测。监测结果表明, 基坑支护体系的变形与内力在安全可控的范围之内, 同时有效地保护了周边环境, 基坑工程的施工没有对周边环境的正常使用造成不良影响, 取得了良好的经济效益和工程效益。

参考文献:

- [1] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国工业出版社, 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)