

复杂边界条件下组合支护形式在旧基坑加深 情况下的设计与优化

刘志方, 彭卫平, 刘伟, 张在喜

(广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060)

摘要: 以广州某复杂边界条件深大基坑工程为背景, 基于该基坑属于旧基坑加深的工程特点, 通过选择复合土钉墙与桩锚(预应力)支护相结合的组合支护结构方案, 以及合理的桩间距及桩间止水帷幕等措施, 既保证了基坑及周边环境的安全和基坑工程的顺利实施, 也保证了工程的经济合理性, 分析基坑实施期间的各项监测数据和受力变形特点表明该组合支护形式取得了良好的实施效果。

关键词: 复杂边界; 旧基坑加深; 复合土钉墙; 桩锚支护

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0495-05

作者简介: 刘志方(1981-), 男, 高级工程师, 注册土木工程(岩土)师, 从事地下工程、深基坑支护工程的设计与研究。E-mail: 974572610@qq.com。

Design and optimization of old excavation deepening under complex boundary conditions

LIU Zhi-fang, PENG Wei-ping, LIU Wei, ZHANG Zai-xi

(Guangzhou Urban Planning & Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Based on an old excavation deepening project with complex boundary conditions in Guangzhou, a combined scheme of composite soil-nailing wall and pile-anchor retaining structure scheme is selected. The reasonable pile spacing and pile waterproof curtain and other measures are adopted to ensure the safety of excavation and the surrounding environment as well as its smooth construction. The monitoring data and the deformation characteristics of the retaining structure show that the combined support achieves satisfactory effectiveness.

Key words: complex boundary; old excavation deepening; composite soil-nailing wall; pile-anchor retaining structure

0 引言

随着城市建设的扩张及地下空间利用的迅猛发展, 深基坑工程面临诸多的复杂边界条件, 如周边紧邻敏感的建(构)筑物、地铁隧道及车站、地下市政管线等。在这些复杂且敏感环境和边界条件下, 深基坑支护和开挖的设计与施工受到更严格的条件制约, 基坑开挖引起的周边建筑物或市政管线的附加变形必须控制在一定的允许范围内, 在这种情况下, 综合考虑安全及经济的组合支护形式得到越来越多的应用和发展。

土钉墙是用于基坑开挖和边坡稳定的一种挡土结构, 该支护形式工程造价低, 在各种浅基坑中应用广泛。桩锚支护体系是国内深基坑工程中常用的支护形式, 抗侧刚度好, 施工工艺成熟, 质量易于控制, 对基坑变形控制较好^[1]。采用两种形式进行组合支护, 既可有效控制基坑变形, 又可大大降低基坑的工程造

价。

本文通过广州某超大深基坑工程实践, 着重介绍复杂边界条件下, 复合式土钉墙与桩锚组合支护形式在旧基坑加深深情况下的设计方法和采取的针对性技术措施, 并结合监测数据进行分析总结。

1 工程概况

该项目位于广州番禺区, 上部结构为5层商业建筑(框剪结构), 采用浅基础, 建筑基底面积约35000m²。原设计为两层地下室, 基坑设计深度10 m, 采用土钉墙喷锚支护, 且东、南、西三侧已施工了止水搅拌桩及部分土钉喷锚结构, 并垂直开挖约5.0 m。后因规划调整, 地下室改为三层, 基坑开挖深度加深至15 m, 基坑总周长约750 m, 属超大旧基坑加深的特

殊情况，重新设计的难度较大。

1.1 环境条件

基坑北侧临近市政主干道市莲路，基坑坡顶距路边缘线约23.4~26.6 m；基坑东侧为东环路，基坑坡顶线紧邻道路边缘，东环路路宽约12.0 m，路的另一侧多为3~6层的楼房；基坑南侧临近清河大道，基坑坡顶距路边线约5.4 m，清河大道下有地铁三号线经过，基坑坡顶线距地铁隧道左线中心线约35.9~36.3 m，地铁隧道结构顶面埋深约19.7~20.4 m；基坑西侧为一片空地及市政绿化带，绿化带西侧为市政主干道及高架桥。根据相关资料，基坑周边市政道路及绿化带下埋设有排污管、给水管、电缆沟及煤气管道等。

总体来说基坑周边环境复杂，对环境保护要求较高，具体平面环境关系如图1所示。

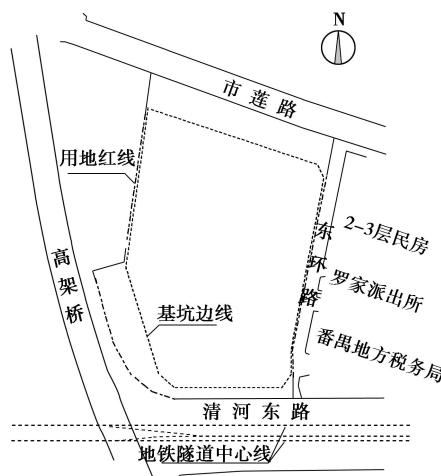


图1 周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surrounding environment

1.2 工程地质条件

根据勘察资料^[2]显示，本场地属珠江三角洲冲积平原地貌单元，土层分布稳定，主要由填土层(Q^{ml})、第四系海陆交互相沉积层(Q^{al})、风化残积土层(Q^{el})组成，下伏基岩为花岗岩(γ_5^3)。根据土的成因、结

表1 基坑侧壁揭露地层特性表^[2]

Table 1 Characteristics of soil layers

岩性及层序号	状态	层厚 /m	摩阻力特征值 q_s/kPa	湿密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	含水率 w/%	孔隙率 e	液性指数 I_L	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_{s1-2}/MPa	c/kPa	$\phi/^\circ$
①素填土	松散	2.15	10	1.75							
②耕植土	松软	0.55	12	1.75							
③ ₁ 淤泥	流塑	1.79	6	1.58	65.3	1.758	1.93	1.341	2.17	6.6	3.8
③ ₂ 中砂	松散	1.40									25.0
④ ₁ 砂质黏性土	可塑	6.65	15	1.87	28.5	0.850	0.15	0.431	4.41	26.8	17.9
④ ₂ 砂质黏性土	硬塑	4.57	20	1.88	28.0	0.837	0.09	0.400	4.80	24.6	19.7
⑤ ₁ 花岗岩	全风化	3.94		1.95	21.4	0.670	0	0.314	5.87	36.4	22.5
⑤ ₂ 花岗岩	强风化	3.95		2.05	17.1	0.525	0	0.226	6.75	51.5	34.2

构及物理力学性质差异可划分为5个主要层次，基坑开挖深度范围内主要包括：第①层素填土，厚度1.60~3.40 m；第②层耕植土，厚度0.40~0.70 m；第③₁层淤泥，厚度1.00~2.70 m；第③₂层中砂，为本场地主要含水层，层面埋深0.36~2.26 m，厚度1.00~2.00 m，呈透镜体状分布；第④层砂质黏性土，为原岩风化残积土，其中第④₁可塑层，厚度4.40~15.50 m；第④₂硬塑层，厚度1.50~9.00 m，含少量砂砾，渗透性较弱，为弱透水—隔水层；第⑤层为基岩，岩性为花岗岩，其中第⑤₁层全风化，厚度0.90~13.80 m，层面埋深约8.98~21.78 m；第⑤₂层强风化花岗岩，厚度0.60~15.00 m，层面埋深约12.41~26.87 m。

本基坑底主要位于第④层可塑—硬塑的砂质黏性土中，局部位于第⑤₁和⑤₂层全强风化岩中。基坑土层特性见表1。

1.3 水文地质条件

钻探表明，场区地下水主要赋存于填土、中砂及风化壳中，填土中为上层滞水，淤泥层局部混杂较多粉细砂，呈淤泥质砂土状，有一定的含水率，②₄层中砂为场地内主要含水层，但呈透镜体存在，水量不大。强、中风化岩中赋存一定的基岩裂隙水。第④层砂质黏性土含砂量较低，渗透性较弱，为弱透水~隔水层。总体来看本场地富水量较弱，勘察期间水位埋深在0.50~1.70 m之间。

2 基坑支护设计

2.1 基坑工程特点

本项目基坑属于超大规模深基坑，深度15 m，为一级基坑^[3]，周边环境复杂，北侧为市政主干道，东侧为市政路及大量低矮民房，西侧为高架桥，南侧为市政主动脉且有正在运营的地铁三号线穿过，变形控制要求严格。

基坑已施工完成了单排 $\Phi 500 @ 350 \text{ mm}$ 止水搅拌桩, 坚向 2 排注浆土钉和 1 排 $L=25 \text{ m} @ 2.0 \text{ m}$ 的预应力锚索等喷锚支护结构, 并垂直开挖至相对标高 -6.0 m, 开挖深度约 5.0 m。由于后期规划调整, 基坑加深至 15 m 需重新设计, 属已开挖施工的旧基坑加深改造利用。

2.2 支护设计方案选型

通过现场查勘, 对已施工完成的土钉和锚索进行了抗拔试验抽检, 抽检结果表明喷锚支护结构受力良好, 经复核计算判断处于稳定状态, 可充分利用。

本基坑属于一级基坑, 且周边环境严峻, 方案选型时考虑在利用上部土钉墙喷锚结构的基础上, 下部采用桩(墙)锚或桩(墙)撑等控制变形能力较强的支护型式, 形成上弱下强的组合支护形式, 在有效控制基坑支护结构变形的前提下, 大大降低基坑造价和施工难度。

在支挡结构的选择上, 采用地下连续墙工程造价将较高, 考虑到基坑侧壁中下部土层以可塑—硬塑的黏性土层为主, 土质条件较好, 选择以排桩做支挡结构经济可行。另一方面, 本基坑东西跨度约 150 m, 南北跨度约 230 m, 属于大跨度基坑, 如采用内支撑支护型式, 支撑的长度超长, 施工难度大, 受温度效应、砼压缩蠕变变形、长细比及立柱间差异沉降等因素影响较大, 且需在基坑内施工较多的立柱桩, 对主体结构施工造成较大的影响, 经反复论证, 最终确定基坑中下部采用桩锚支护, 结合上部已施工的喷锚结构形成组合支护体系。

2.3 支护桩设计

本基坑现状已开挖施工了 5.0 m 深, 新设计支护桩桩边如要求紧贴喷锚面, 则需回填基坑至现地面再施工支护桩, 土方回填量较大, 支护桩空桩量大, 且施工时对现状喷锚结构有一定的影响。如在已开挖的基坑底面施工支护桩, 既节省空桩费用, 又可减少土方回填量, 大大缩短施工工期。

通过现场踏勘比较, 确定支护桩采用冲孔灌注桩在已开挖的基坑底面施工, 利用冲孔桩施工工作面小的优点, 保证支护桩施工完后桩边尽量贴近已施工完成的直立土钉墙的喷锚面(距离约 50 cm), 冠梁在现状基坑开挖面上支模施工, 与直立土钉墙喷锚面之间的空隙采用 C20 素砼浇灌形成传力带, 节点详图见图 2。

支护桩桩身范围内主要为可塑—硬塑的砂质黏性土, 土质条件较好, 没有淤泥及松散砂层, 可以适当将桩间距拉大, 经过反复计算对比, 支护桩采用 1.0 m 的直径, 桩间距 1.60 m, 桩缝净距 60 cm, 形成疏排桩结构, 在支护桩内边两侧分别设置 $\Phi 10$ 膨胀螺栓

(竖向间距 300 mm), 通过膨胀螺栓挂 $\Phi 6.5 @ 200 \times 200 \text{ mm}$ 钢筋网并喷 100 mm 厚素砼护面, 防止桩间土崩析垮塌, 节点详图见图 3。

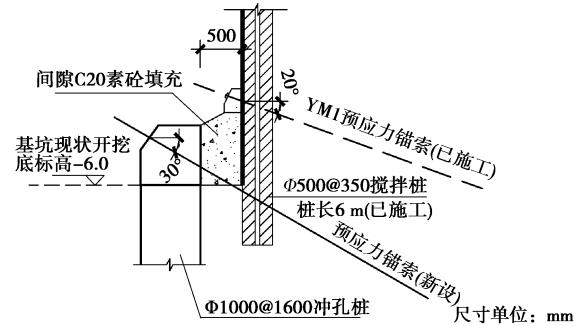


图 2 上部喷锚与下部桩锚支护结构连接详图

Fig. 2 Typical section of retaining structures

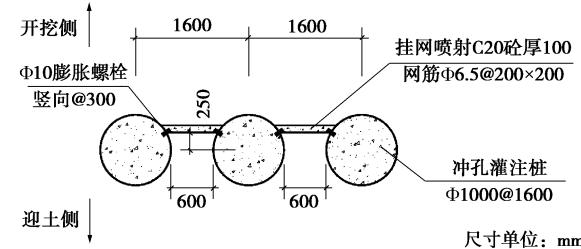


图 3 支护桩桩间护面结构详图

Fig. 3 Typical section of retaining structures

2.4 排桩锚索支挡结构设计计算

支护桩在已开挖基坑底施工, 桩长约 14~16 m, 嵌固深度约 4~6 m。沿基坑侧壁自上而下设置 3~4 道预应力锚索, 锚索水平间距为 1.6 m, 采用 $\Phi 15.2$ 钢绞线, 钻孔直径 150 mm, 水平向夹角均为 30°, 其中南侧因毗邻地铁三号线隧道, 锚索采用大角度 35°, 以避开地铁隧道特别保护范围。

典型支护剖面如图 4 所示。

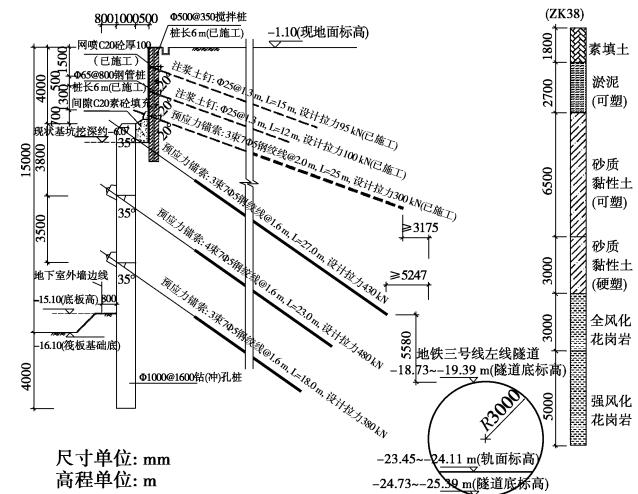


图 4 喷锚结合桩锚组合支护剖面图

Fig. 4 Typical section of retaining structures

根据表 1 设计参数, 砂层水土分算, 其他土层均水土合算, 计算所得支护体系内力包络图(如图 5 所示), 桩顶最大变形约 28 mm, 在规范允许范围内。

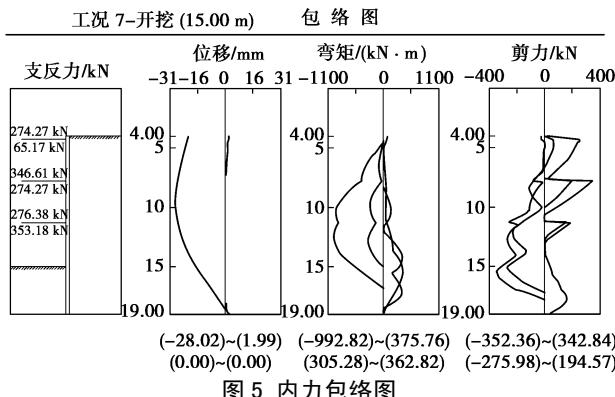


图 5 内力包络图

Fig. 5 Internal force envelope

支护桩桩身最大弯矩设计值为 $992.82 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 按《混凝土结构设计规范》^[4]规定计算配筋, 主筋采用三级钢为 23E22 钢筋, 箍筋为 $\Phi 10@100$, 加强筋为 $D14@2000$, 桩身配筋图如图 6 所示。

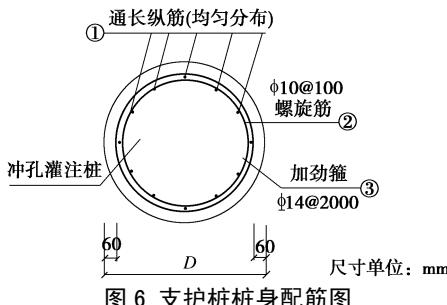


Fig. 6 Typical section of retaining structures

2.5 止水帷幕优化设计

如图 4 所示, 基坑原已施工单排 $\Phi 500@350$ 搅拌桩 (桩长 6 m) 止水帷幕, 并已垂直开挖到相对标高 -6.0 m, 采用新的方案后, 支护桩与喷锚面净距仅约 50 cm, 如重新增设搅拌桩等止水桩, 需将基坑回填或在基坑底搭架至基坑顶方可施工, 施工难度大, 止水桩施工质量较难控制, 空桩量大。同时基坑中下部多为硬塑土, 普通搅拌桩搅进困难, 止水帷幕无法落底。

经综合分析工程地质和水文地质资料, 本场地以浅层中砂为主要含水层, 呈透镜体状存在, 下部砂质黏性土渗透性较弱, 为弱透水一隔水层, 考虑到已施工的搅拌桩桩底进入砂层下可塑土 2 m 以上, 已止住了浅层淤泥和砂层中的孔隙潜水, 基坑中下部主要为可塑—硬塑的砂质黏性土, 无松散砂层等含水层, 黏土层渗透性小, 水量不大, 故采用在桩内侧设置 $\Phi 10$ 膨胀螺栓挂网喷砼厚 100 mm, 在桩内侧形成薄层砼板止水帷幕 (如图 3), 可起到挡土止水的效果。基坑顶全掌硬化, 在坑顶及坑底分别设置 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (宽×深) 的排水沟, 每 50 m 设 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ (长×宽×深) 集水井等排水措施, 防止雨水从坑顶往下渗流, 软化基坑侧壁土体。

实施效果表明, 基坑开挖过程中基坑侧壁较干爽,

仅局部有少量渗水, 未出现涌水涌砂的不良情况, 基坑开挖过程中周边建筑物沉降较小, 效果良好。

3 工程的实施与监测数据分析

本项目基坑自 2009 年 8 月重新开始施工, 至 2010 年 5 月地下室底板浇筑完成, 共历时 9 个月。工程实施过程中, 信息化监测结果全面反映了基坑工程的各项变形和结构受力指标, 以下对几项主要监测数据进行总结分析。

3.1 支护桩桩身水平位移

本基坑支护设计采用 $\Phi 1000@1600 \text{m}$ 的疏排桩支护结构, 设置 3~4 道预应力锚索, 理正计算结果表明, 桩身弯矩及位移最大处均位于桩身中部 (如图 5)。经分析各测点的测斜实测曲线图 (图 7), 桩身变形最大处基本发生在 8~10 m 深度处 (位于第二道与第三道锚索之间), 与计算结果较为一致。

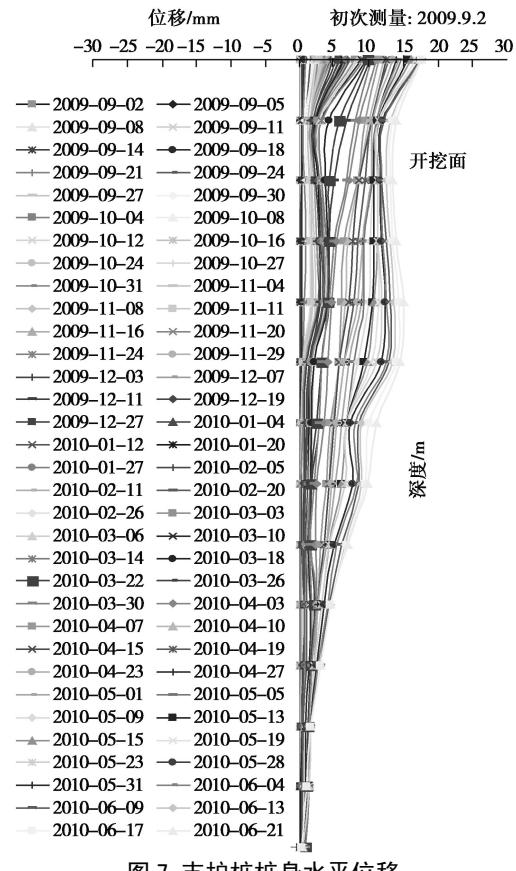


图 7 支护桩桩身水平位移

Fig. 7 Lateral displacements of retaining structures

3.2 喷锚支护结构坑顶水平位移

基坑上部约 5 m 为原施工完成的喷锚支护结构, 基坑开挖后搁置了一段时间未及时监测, 新的支护结构施工之后才开始观测, 开挖期间坑顶各观测点最大水平位移在 10~16 mm 之间, 底板浇筑后趋于稳定 (图 8 为坑顶水平位移观测点 #16 变化曲线图)。

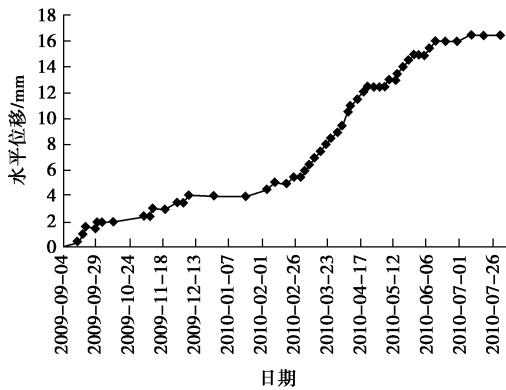


图 8 #16 测点坑顶水平位移变化曲线图

Fig. 8 Lateral displacements of retaining structures at point No. 16

从变化曲线图来看, 上部喷锚结构通过桩顶索砼传力带与桩锚结构连接, 变形控制良好, 最大累计位移量约 16.0 mm。

3.3 周边建筑物沉降观测

周边建筑物沉降与基坑距离远近、开挖施工工况及地下水位变化有密切的关系。开挖期间, 各观测点累计沉降量均不大, 约 0.19~0.82 mm, 建筑物差异沉降较小, 在规范允许变形范围内。最大沉降量位于 S8 号点(图 9), 沉降到后期趋于稳定。

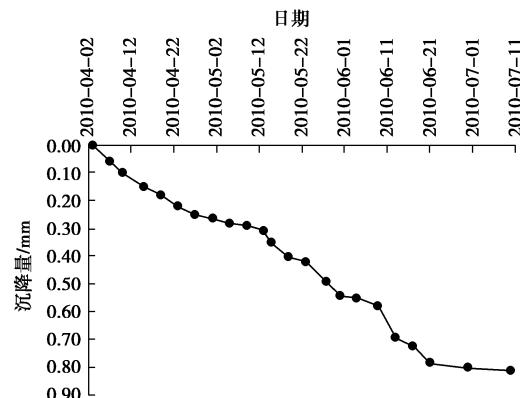


图 9 S8 测点沉降变化曲线图

Fig. 9 Curve of ground settlement at point S8

3.4 地下水位

本基坑采用上部搅拌桩结合下部支护桩桩间挂网喷砼护面止水, 图 10 为#4 观测点的水位变化曲线, 基坑初次开挖期间, 水位明显下降, 到 2009 年 11 月之后施工第 2 层和第 3 层锚索期间, 由于锚索施工和养护时间较长, 基坑未大面积开挖, 水位变化较为平缓, 到 2010 年 3 月份, 地下水位随基坑开挖再次下降, 下降量约 0.6 m, 基坑到底后趋于稳定。

综合分析监测结果表明, 坑顶水平位移、沉降及地下水位等各项监测指标变化与基坑开挖施工过程密切相关。2009 年 11 月到 2010 年 2 月施工锚索, 未大面积开挖, 坑顶水平位移变化较平缓, 地下水位也变

化不大; 到 2010 年 3 月大面积开挖后, 坑顶水平位移增大, 地下水位明显下降, 周边建筑物沉降也相应加大; 基坑到底后, 各项指标趋于稳定。监测数据合理的反应了基坑在不同施工工况条件下的变形情况。

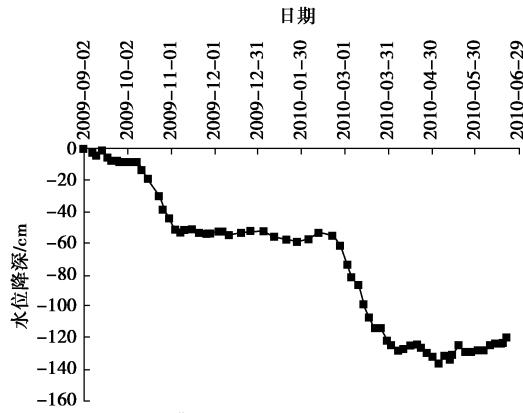


图 10 #4 点地下水位变化情况

Fig. 10 Change of underground water level at point No. 4

4 结语

监测结果和工程实施证明, 本基坑支护工程利用已施工完成的喷锚支护结构, 形成上部喷锚下部桩锚的组合支护体系实施效果良好, 支护结构变形、沉降、地下水位变化及周边建筑物沉降等均在容许范围内。基坑大面积开挖和施工未对周边环境包括南侧的地铁隧道造成不良影响, 设计方案安全、经济且合理有效, 为类似旧基坑加深的工程设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 广州市番禺市桥建筑设计院有限公司. 番禺罗家商业广场岩土工程勘察报告[R]. 广州: 广州市番禺市桥建筑设计院有限公司, 2008. (Geotechnical Engineering Investigation Report of Panyu commercial plaza[R]. Guangzhou: Guangzhou City Panyu Bridge Building and Design Institute Limited, 2008. (in Chinese))
- [3] JGJ 120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ 120—99 Technical Specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [4] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 2010. (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. 2010. (in Chinese))