

复杂地层中地铁换乘站双层承压水处理技术研究

邢皓枫^{1,2}, 张 振^{1,2}, 吴洁妹³, 徐 超^{1,2}, 叶观宝^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海市基础工程有限公司, 上海 200002)

摘 要: 上海轨道交通十号线溧阳路地铁站与运营的四号线海伦路地铁站斜交, 该场地多为饱和砂质粉土地层, 下伏双层承压水, 且承压水在换乘站南侧交汇, 这对基坑开挖与复杂的周边环境、尤其运营四号线的保护提出诸多技术难题。针对该工程的特点, 对比分析了基坑中地下水处理措施的优缺点, 提出了水平封堵的地下水处理技术, 并采用理论分析和三维有限元模拟研究了水平封堵位置以及封堵厚度等参数变化对基坑变形和周边环境的影响, 然后针对可行的水平封堵方案进行了优化处理。基坑施工中的现场监测结果证明了其可行性, 该成果对类似工程具有参考意义。

关键词: 基坑; 承压水; 水平封堵; 位移

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)10-1609-06

作者简介: 邢皓枫(1969-), 男, 博士, 副教授, 从事地基加固与检测技术的教学与研究。E-mail: hfxing@tongji.edu.cn。

Technology of double-confined water treatment of metro interchange station under complex soil layers

XING Hao-feng^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, WU Jie-mei³, XU Chao^{1,2}, YE Guan-bao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Foundation Engineering Co., Ltd.,

Shanghai 200002, China)

Abstract: The subway of Line 10 at Liyang Road has an interchange station with the opening subway of Line 4 at Hailun Road. The site is underlain by several different sandy-silt layers and double-confined water layers, and the double-confined water gets together at the south side of the interchange station, which causes a lot of technical problems, such as pit excavation, environmental impact and protection of the safe operation of Line 4. For this project, the characteristics of different ground-water treatment methods are analyzed, and the horizontal sealing technology is proposed. The location and thickness of the horizontal sealing layer are analyzed and their effects on pit deformation and its surroundings are studied through theoretical analysis and three-dimensional finite element simulation, and the optimization of the horizontal sealing measure is carried out. The feasibility is proved by means of the monitoring results during excavation, and the results are useful to similar projects.

Key words: foundation pit; confined water; horizontal sealing; displacement

0 引 言

城市地铁的建设要穿越不同地质、水文条件和工程状况, 给工程技术人员提出了诸多技术难题, 比如维护结构的变形、承压水的处理、周边建构筑物的保护等等。随着理论研究的发展, 工程界和学术界对于这些技术难题的认识得到了进一步的完善: 俞建霖、龚晓南^[1]用三维空间有限元研究了基坑开挖过程中围护结构变形、土压力的空间分布及基坑的几何尺寸效应; 陈郁、李永盛^[2]利用 Mindlin 弹性半空间应力解, 以上海东方路下立交工程为背景, 推导了基坑开挖引起隧道结构的附加应力情况, 进而通过弹性地基梁理

论得到求算隧道隆起的定量计算方法; Wang^[3]通过 300 个工程实例, 分析总结了上海不同围护形式下基坑沉降变形特点, 该成果对工程实践具有很好的理论指导作用, 等等。

而在诸如上海等承压含水层较浅的地区进行地铁站施工时, 由于承压水的承压性, 易产生管涌、流砂或流土现象, 或造成基坑底隆起变形和围护结构的变形增大, 影响基坑稳定^[4-6], 与此同时, 丁瑞春通过离

基金项目: 上海市重点学科建设项目 (B308)

收稿日期: 2010-08-12

心模型试验进行承压水影响及其处理措施的研究,戴斌也从实际工程角度进行基坑承压水处理措施的分析与实施,并为类似工程提供借鉴和参考作用,但是上海十号线溧阳路地铁站存在多层砂质粉土和粉细砂以及双层承压水影响,且车站基坑施工过程中还存在运营四号线保护技术问题^[7-8]。

本文首先分析了复杂地质条件下双层承压水对地铁站基坑施工的影响,并针对地铁站基坑狭长形的特点,提出了施打高压旋喷桩的水平封堵技术处理方案,并从理论和有限元的角度进行加固厚度分析,然后对加固方案进行优化处理与分析,该水平封堵技术对类似工程具有指导作用。

1 工程概况及场地条件

上海轨道交通 10 号线溧阳路车站为南北向,并与其上方已运营的 4 号线海伦路站斜向交叉(图 1)。车站主体为地下二层狭长矩形框架结构,全长 192 m,其中与四号线海伦路换乘段相交长度 27 m,车站标准段净宽 20.78 m,端头井净宽 25.18 m。

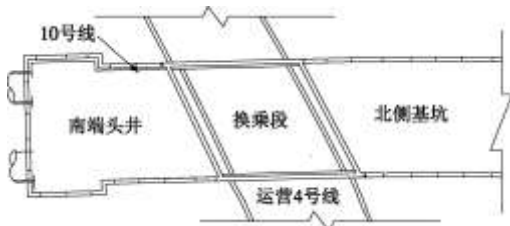


图 1 换乘站示意图

Fig. 1 Layout of interchange station

溧阳路车站主体围护为 800 mm 厚的地下连续墙,其标准段和端头井的成槽深度分别为 30.5 m 和 33.5 m;标准段和端头井的基坑开挖深度分别为 16.3 m 和 18.3 m。

如图 2 所示,该场地地质条件除部分为淤泥质黏性土外多为砂质粉土和粉细砂,且⑤₂、⑤₃、⑤₄、⑥和⑦₁层在场地内部分缺失外,地层波动较大,呈现为

复杂状的地层分布,各土层分布及其主要物理力学指标见表 1。

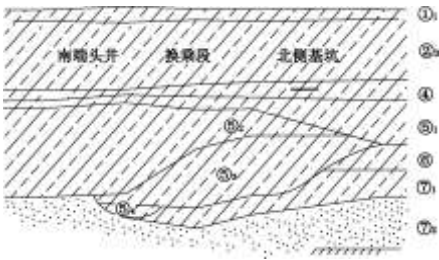


图 2 场地地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of site

该场地地下水水位较高,潜水位埋深为 0.3~1.5 m,常年平均地下水位埋深为 0.5~0.7 m;潜水位下部埋藏两种承压水,一种为分布于⑤₂砂质粉土层中的微承压水,其埋深为地表下 18.0~19.5 m,另一种为分布于⑦₁砂质粉土层和⑦₂粉细砂层中的承压水,其埋深为地表下 28.3~37.2 m,该承压水水头埋深为地表下 3.0~10.0 m,并呈幅度不等的周期性变化。尤其在拟建溧阳路地铁站南端头井处,由于第⑥层土缺失,该两种承压水贯通在一起,其对基坑施工中地下水防治造成不利影响。

2 承压水处理措施分析

整个车站主体地下二层结构基坑开挖时需要降⑤₂层微承压水和⑦层承压水,尤其在车站南段,由于⑥层土缺失,地质条件复杂且双层承压水贯通,因此是否能够有效地控制承压水成为基坑开挖亟待解决的技术难题。

(1) 降水控制技术

若采用坑外降水方案,不可避免将造成周边环境沉降变形,甚至关系到已运营的地铁四号线的安危,故该方案只能作为基坑施工过程中的备用应急处理方案。

表 1 地基土主要物理力学指标表

Table 1 Main physical and mechanical indexes of soils

地层 编号	土性名称	土层厚度 /m	含水 率/%	孔隙 比	塑限 指数	液限 指数	压缩 模量 /MPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	静止侧压 力系数	渗透系数 /(10 ⁻⁵ cm s ⁻¹)
① ₁	人工填土	1.60~3.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
② ₃	砂质粉土	9.60~13.70	32.2	0.90	—	—	9.85	6.0	28.5	—	21.700
④	泥质粉土	1.00~4.90	48.3	1.36	21.3	1.17	2.17	14.0	11.0	0.42	0.078
⑤ ₁	黏土	0.70~13.80	36.7	1.07	17.2	0.90	3.96	17.0	16.0	0.56	0.036
⑤ ₂	砂质粉土	0.00~21.50	34.5	1.00	—	—	8.27	5.0	27.0	0.47	29.000
⑤ ₃	粉质黏土	0.00~11.20	34.1	0.98	15.7	0.84	3.56	17.0	16.5	0.38	0.702
⑤ ₄	粉质黏土	0.00~2.50	24.7	0.77	15.6	0.40	5.49	17.0	20.5	0.45	—
⑥	黏土	0.00~4.80	23.6	0.70	17.6	0.33	6.28	36.0	16.0	—	—
⑦ ₁	砂质粉土	0.00~8.70	28.5	0.80	—	—	11.90	4.0	32.0	—	45.700
⑦ ₂	粉细砂	6.80~11.70	27.6	0.82	—	—	12.75	3.0	33.0	—	47.600

⑧ ₁	黏土	未揭穿	36.9	1.07	18.7	0.82	4.77	—	—	—	—
----------------	----	-----	------	------	------	------	------	---	---	---	---

（2）隔水控制技术

若采用隔水帷幕进行承压水的控制，要求地下连续墙必须贯穿⑦₂粉细砂层潜入其下的黏土隔水层中才能起到隔水帷幕作用，此时地下连续墙施工深度超过50 m，这种超深的地下连续墙不仅增加了施工技术难度和不可控性，而且延长了施工工期和增大了工程费用，从施工技术和经济效益的角度都是不可取的。

（3）水平封堵控制技术

结合本场地存在多层饱和粉砂土和车站基坑长条形以及采用地下连续墙进行基坑围护的特点，本文提出了水平封堵控制技术，即采用三重高压旋喷桩法，在基坑坑底以下一定深度、地下连续墙以内形成一个水平向满堂加固体，利用其高强度和低渗透性封堵承压水。由于该措施避免了降水的负面效应，起到了有效地减少基坑施工对周边环境和运营换乘站的影响，同时，不需施打超深的地下连续墙，从而也节约了成本和缩短工期，因此水平封堵的承压水控制措施可行性分析对该基坑工程具有重要的理论和实践意义。

南端头井地质条件最为复杂且双层承压水在此贯通，其承压水处理成功与否是决定水平封堵技术可行性的关键。本文下面以换乘站南端头井为依托开展水平封堵技术研究。

3 水平封堵技术分析

鉴于本工程地层复杂性和周边环境的重要性，基坑水平封堵措施采用三重高压旋喷桩工法满堂加固形成加固体。由于加固体依靠其上部土体及其本身自重平衡承压水对基坑施工的影响，故水平封堵层应尽可能深埋，为了确保地连墙和加固体间强度，水平封堵下底面选在地连墙墙趾上部1.5 m位置处。南端头井的平面尺寸见图3所示。

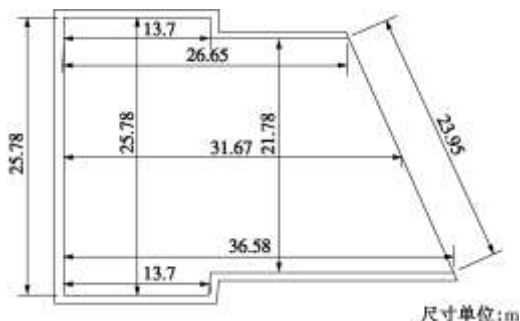


图 3 南端头井平面尺寸图

Fig. 3 Layout of southern-end pit

3.1 水平封堵厚度理论分析

根据水平封堵加固体与承压水压力之间的平衡、加固体抗剪能力、抗弯能力3个方面进行加固体厚度的

理论分析。

考虑侧壁阻力的加固体平衡作用计算公式为

$$F_s = (\gamma_s AX + fLX) / (\gamma_w A(H + X)) \quad (1)$$

式中 F_s 为安全系数，一般为1.0~1.2，本工程取1.2； γ_s 为基坑底板至含水层顶板之间土的平均重度，kN/m³； γ_w 为水的重度，kN/m³； H ， L ， X 分别为基坑开挖深度、基坑周长和坑底加固厚度，m； A 为加固区域面积，m²； f 为侧壁摩阻力，取高压旋喷桩加固体黏聚力（300 kPa）的1/3，kPa。

加固体最大抗剪强度计算公式为

$$F_s = L_x L_y^4 W / [2(L_x^4 + L_y^4) L X \tau_a] \quad (2)$$

式中 W 为加固体自重，kN； τ_a 为加固体抗剪强度，取高压旋喷桩加固体黏聚力300 kPa，kPa； L_x ， L_y 分别为基坑在 x 方向和 y 方向的长度，m；其余符号同前。

引起加固体变形的主要原因有水头压力和土体自重不平衡引起的弯曲变形，以及主动土压力和水压力的水平作用引起加固体变形。其加固体抗弯计算安全系数计算公式为

$$F_s = 9W_x L_x^2 / (8cX^2) \quad (3)$$

式中 W_x 为 x 方向惯性矩，m³； c 为加固体黏聚力，高压旋喷桩加固体黏聚力为300 kPa。其余符号同前。

按式（1）~（3）计算的满足相应条件下加固厚度计算结果见表2。

表 2 加固厚度计算结果表

Table 2 Calculated results of improved depth			
分析理论	力的平衡	抗剪能力	抗弯能力
加固厚度/m	3.5	5.0	5.5

根据以上分析，同时考虑抗弯矩法理论计算结果又较前两种方法偏于安全，故鉴于周边环境保护对坑外降水严格控制的要求，在不进行坑外降水的情况下，坑内需实施至少5 m厚的高压旋喷桩满堂加固体，才能满足双层承压水对基坑开挖稳定要求。

3.2 水平封堵厚度的有限元分析

有限元数值模拟采用Plaxis 3D Foundation软件。考虑土体的卸荷膨胀及加载硬化的性质，土体采用较好地适用于土体开挖的Hardening-Soil本构模型。该模型使用3个不同刚度——轴向加荷刚度 E_{s0} 、轴向卸荷刚度 E 及等向固结刚度 E_{od} 来描述土体力学特性。Hardening-Soil模型中土的竖向应变 ε_1 和偏应力 q 之间满足双曲线关系：

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{s0}} - \frac{q}{1 - q/q_a} \quad (4)$$

有限元模拟计算模型如图4所示。该分析模型考虑运营四号线影响和边界效应，基坑周边宽度取基坑开

挖宽度的3倍。地面荷载假设为20 kPa。潜水埋深为0.5 m。微承压水和承压水连通，埋深为18.5 m，水头埋深为3.85 m。地下水分布情况在有限元分析的初始条件中设定。水平封堵底面仍选在地连墙墙趾上部1.5 m位置处，有限元模拟分析加固厚度分别为3.0，4.0，5.0和6.0 m四种比选方案的加固厚度。加固体为高压旋喷桩形成的满堂加固体，其抗剪强度为300kPa，抗拉强度为120 kPa，安全系数要求不低于1.2。模拟过程按照实际施工工况分为12步，如表3所示。

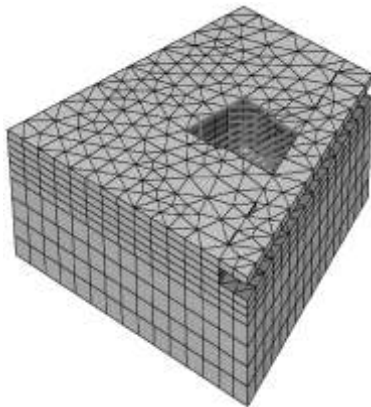


图 4 计算模型图

Fig. 4 Meshed model

表 3 地铁站基坑施工工况表

Table 3 Construction order of pit for subway station	
工序编号	情况说明
1	地下连续墙施工
2	基坑坑底水平封堵施工
3	开挖至 0.9 m 后支护第一道支撑
4	坑内降水并开挖至坑底以下 4.9 m
5	支撑第二道支撑
6	坑内降水并开挖至坑底以下 7.9 m
7	支撑第三道支撑
8	坑内降水并开挖至坑底以下 11.1 m
9	支撑第四道支撑
10	坑内降水并开挖至坑底以下 13.9 m
11	支撑第五道支撑
12	坑内降水并开挖至坑底以下 16.3 m

表 4 水平封堵加固厚度计算结果表

Table 4 Calculated results of improved depth by using horizontal sealing technology				
加固方案	加固体厚度/m	最大拉应力/kPa	最大剪应力/kPa	计算安全系数
I	3.0	122.0	175.0	0.98
II	4.0	110.0	156.2	1.09
III	5.0	93.0	144.3	1.29
IV	6.0	76.0	123.5	1.58

计算结果如表4所示。从表4可知，在不进行坑外降水时，高压旋喷桩形成的水平封堵加固体厚度不小于5.0 m时，其安全系数大于1.2，满足双层承压水对基坑稳定性要求。

3.3 水平封堵方案优化

根据理论和有限元模拟分析结果可知，满足安全性要求的水平封堵加固体厚度为5 m。为了提高5 m厚水平封堵加固体抵抗基坑侧向位移的能力，本文提出了水平封堵加固体的优化设计方案，如图5所示。在坑底下2 m和地下连续墙底上1.5 m分别施打2 m和3 m厚的高压旋喷桩整体加固体，并在紧邻地下连续墙处施打3 m宽的高压旋喷桩将上下加固体联接成箱形整体。基坑坑底上部加固体采用桩径1600 mm，搭接200 mm；下部加固体采用桩径1800 mm，搭接400 mm。上下两层桩位布置均匀并保持一致。桩径的大小通过改变施工参数获得。为了论证优化方案的可行性，本文对其进行有限元模拟。土体本构模型与土体参数同前。

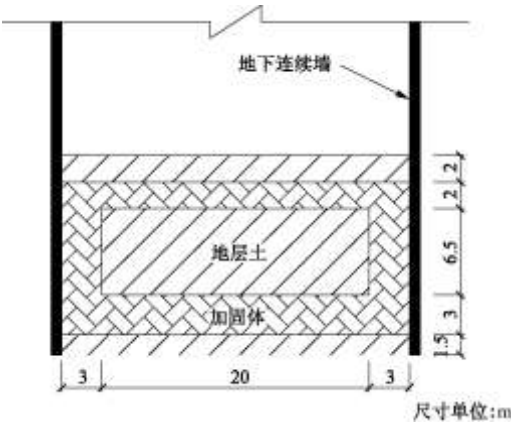


图 5 基坑加固优化方案示意图

Fig. 5 Layout of optimization program

加固5 m的优化方案与原方案在基坑开挖完成时基坑及周边地表变形的对比如图6和图7所示。由图6可知，当采用箱形优化方案时，地表沉降明显小于原加固方案，且在开挖完成时其坑外最大地面沉降为10.0 mm，该值小于《上海地铁基坑工程施工规范》(SZ—08—2000)规定的0.1%*H* (*H*为开挖深度，该计算模型开挖深度为18.5 m)地面沉降变形值要求。

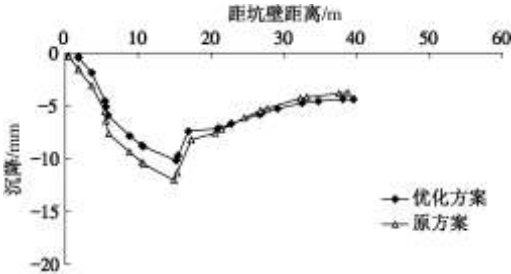


图 6 坑外地表沉降曲线

Fig. 6 Curves of surface settlement outside pit

从图7可以看出，优化方案与原加固方案基坑侧壁侧向位移都随深度的增加逐渐增大，但优化方案对于基坑侧向位移的控制效果明显好于原方案。在开挖完成时的最大侧向位移发生在基坑底稍下位置，其值为

10.2 mm, 同样小于《上海地铁基坑工程施工规范》(SZ—08—2000) 规定的 $0.14\% H$ 侧向位移值要求。

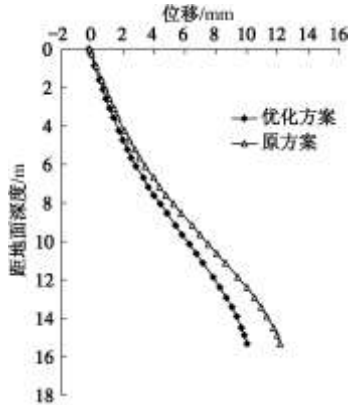


图 7 基坑侧壁水平位移曲线

Fig. 7 Curves of horizontal displacement of pit wall

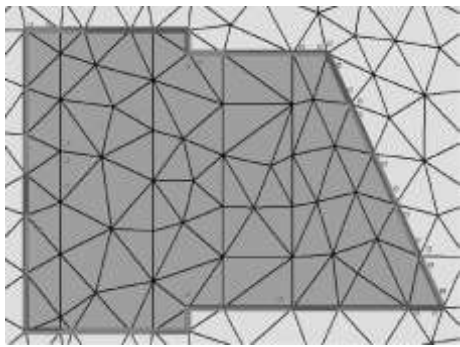


图 8 优化方案旋喷桩顶面塑性点分布图

Fig. 8 Distribution of plastic points at top of rotating pile

采用箱型加固方案后, 加固体最大拉应力为75.0 kPa, 最大剪应力为137.0 kPa, 计算安全系数为1.6, 完全满足基坑稳定性要求。同时从塑性点分布图(图8)可知, 采用箱型加固方案, 增强了坑底下土体的整体刚度, 在承压水的作用下加固体的塑性点只分布在地连墙周边, 大部分的加固体都未进入塑性状态。

4 现场监测结果分析

为了了解水平封堵优化方案的加固效果以及基坑开挖、坑内降水等措施对周边环境的影响, 在施工过程中对基坑变形以及周边环境的响应进行了现场监测。监测内容主要包括: 围护结构侧向和垂直位移、支撑轴力、周边管线位移、坑外潜水位和周边地表沉降等。

图9为支撑拆除后围护结构观测点P11和P13的侧向位移随深度变化曲线。由图9可知: 围护结构侧向位移随基坑开挖深度的增加, 其侧向位移也不断增大, 各测孔最大侧向位移基本出现在基坑开挖面附近, P11孔最大值为13 mm, P13孔最大值为15 mm, 与有

限元数值模拟分析结果较为接近, 且在 $0.14\% H$ 规范要求的范围内。

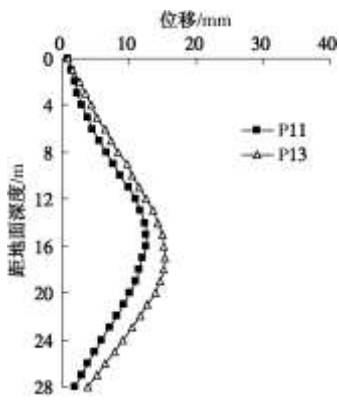


图 9 地下连续墙水平位移曲线

Fig. 9 Curves of horizontal displacement of diaphragm wall

图10为坑外地面沉降曲线。从图中可知, 该段底板浇筑完成(2008-01-11)后, 监测断面各测点的沉降速率明显趋缓, 各测点的最大垂直位移量均不超过15 mm, 且满足 $0.1\% H$ 一级基坑开挖要求。

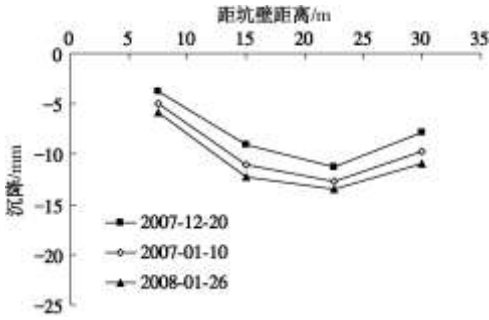


图 10 坑外地面沉降曲线

Fig. 10 Curves of surface settlement outside pit

另外, 在整个施工过程中, 污水管线观测点最大累积位移为25.3 mm, 其余各管线的最大累积观测值约为20 mm, 且至底板浇筑完成后, 附近各测点的沉降速率已明显趋缓; 坑外潜水位在整个工程施工过程中较为平缓, 其水位波动主要与天气降雨相关, 说明本工程中止水帷幕抗渗性能较好; 基坑围护施工区域西侧的建筑物靠施工区域一侧建筑物最大累计沉降为11.7 mm; 轨道交通4号线出入口各监测点累计垂直位移量均在预警值以内。

通过以上监测结果说明, 水平封堵优化方案不仅能够很好地防治双层承压水影响和增大加固体整体刚度, 而且能有效地控制基坑开挖对周边环境的影响和节约施工费用, 故该优化方案是一个经济效益与环境效益双赢的加固方案。

5 结论与建议

通过溧阳路地铁换乘站基坑施工中双层承压水影响和治理措施的理论分析和有限元数值模拟,得到以下结论和观点:

(1)由于溧阳路车站周边环境要求和施工技术以及经济效益的制约,其基坑施工承压水的控制既不能采用坑外降水方案,又不宜采用隔水帷幕措施,承压水水平封堵措施成为该类基坑施工中宜采用的承压水控制措施。

(2)通过理论分析和数值模拟,在不进行坑外降水时,需在地下连续墙底上部1.5 m处施打厚度不小于5.0 m的高压旋喷桩,其形成的水平封堵加固体可满足场地双层承压水对基坑稳定性的要求。

(3)本文提出了箱型加固优化方案,即在坑底下2 m和地下连续墙底上1.5 m分别施打2 m和3 m厚的高压旋喷桩整体加固体,并在紧邻地下连续墙处施打3 m宽的高压旋喷桩将上下加固体联接成箱形整体。该优化方案因结构形式改变而提高了整体刚度,从而不仅提高了双层承压水对基坑稳定性的要求,而且减少了基坑竖向变形和侧向位移,较好地满足周边环境对基坑开挖的变形控制要求。

参考文献:

- [1] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑工程的空间性状分析[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 21 - 25. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [2] 陈 郁. 基坑开挖引起下卧隧道隆起的研究分析[D]. 上海: 同济大学, 2005. (CHEN Yu. Analysis on the heave of the existing tunnel due to the above excavation[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [3] 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.
- [4] 刘国彬, 王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(6): 790 - 792. (LIU Guo-bin, WANG Hong-xin. Influence of the pressure water in shallow silty sand in Shanghai on excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 790 - 792. (in Chinese))
- [5] 张雪婵, 张 杰, 龚晓南, 等. 典型城市承压含水层区域性特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 待刊. (ZHANG Xue-chan, ZHANG Jie, GONG Xiao-nan, et al. Regional property of confined aquifer in typical cities[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), in press. (in Chinese))
- [6] 张惠忠, 刘明建. 上海软土中的“微承压水”与基坑工程[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 944 - 947. (ZHANG Hui-zhong, LIU Ming-jian. “Feeble confined water” in Shanghai area and related geotechnical engineering problems in foundation excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 944 - 947. (in Chinese))
- [7] 丁春林, 孟晓红. 承压水基坑离心模型试验与现场实测分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, **36**(1): 22 - 26. (DING Chun-lin, MENG Xiao-hong. Centrifuge model test and field measurement analysis for foundation pit with confined water[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008, **36**(1): 22 - 26. (in Chinese))
- [8] 戴 斌, 王卫东. 受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊): 1659 - 1663. (DAI Bin, WANG Wei-dong. Discussions on technologies of deep foundation pit projects affected by confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S0): 1659 - 1663. (in Chinese))