

复杂地质环境控制的基坑围护设计方案比选*

田忠喜¹ 赵增辉² 代春泉³ 刚申学⁴

(1. 聊城大学建筑工程学院, 252000, 聊城; 2. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 266590, 青岛; 3. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 266590, 青岛; 4. 山东易方达项目管理有限公司, 250101, 济南//第一作者, 讲师)

摘要 泉域复杂地质环境的地铁基坑围护设计方案应以控制水资源为主。依托济南市轨道交通 R2 线一期宝华街站工程, 详细分析工程水文地质与周边环境风险, 剖析常用围护设计的特性和适用性。针对该站特定地质环境, 提出 4 种不同的围护设计方案, 基于灰色关联理论分别从设备选型、截水效果、环境影响、施工工期、工程造价 5 方面优选确定了钻孔桩+高喷桩围护设计方案。鉴于该工法在全强风化岩层适用性差的特点, 提出了 2 种高喷桩现场试验方案, 并通过钻孔取芯、注水试验、基坑开挖验证了优选方案的合理性。

关键词 地铁车站; 复杂地质环境; 基坑围护设计; 方案比选

中图分类号 TU94⁺3.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.09.035

Comparison and Selection of Foundation Pit Enclosure Design under Complex Geological and Environmental Control

TIAN Zhongxi, ZHAO Zenghui, DAI Chunquan, GANG Shenxue

Abstract The groundwater control for metro foundation pit enclosure structure has the priority in the complex geological environment of the spring area. Taking the Baohua Street Station of Jinan rail transit R2 Line phase I as an example, the engineering hydrogeology and surrounding environmental risks of the project are analyzed in detail, the characteristics and applicability of common enclosure designs are analyzed. According to the specific geological environment of the station, four different enclosure design schemes are proposed. Based on gray correlation theory, the bored pile + height scheme is selected and optimized from the aspects of equipment selection, water interception effect, environmental impact, construction period and project cost. In view of the poor applicability of the scheme in highly weathered rock formations, two high-injection pile field test schemes are proposed, their rationality is

verified by drilling core, water-injection test and foundation pit excavation construction.

Key words metro station; complex geological environment; foundation pit enclosure design; scheme selection

First-author's address School of Architecture Engineering, Liaocheng University, 252000, Liaocheng, China

在城市轨道交通工程的建设过程中, 无论是采用明挖还是暗挖, 其必然要伴随着基坑降排水工程; 且无论采取何种降排水方式, 由于降水引起的附加应力势必导致周边建构筑物环境的三维度变形, 从而引起基坑开挖工程的次生灾害^[1-3]。泉水是济南市泉文化的维系根基, 不得随意大肆抽排。济建发[2009]5 号及济建质安站字[2013]1 号文均明确规定: 济南市房建和市政工程的建设应慎用降排水措施, 如工程建设确需进行降排水的, 须施做止水帷幕和回灌补偿井^[4]。

地铁基坑开挖时对地下水资源的保护, 主要通过合理设置基坑围护设计方案、提高基坑开挖过程中止水帷幕的止水效果来保障。而不同的工程水文及周边环境, 其围护设计选型亦不同, 止水效果也不尽相同。因此, 合理选择基坑围护设计方案, 保障地下水抽排过程中的止水效果, 控制坑外因降水引起的附加变形, 是复杂地质与周边环境风险的控制点^[5-7]。

泉域地质条件下的轨道交通工程建设时, 其基坑围护设计方案的选型应以控制地下水抽排量、保障地下水资源为关键。止水帷幕是地基基坑防水的方法之一, 分落地式和悬挂式^[8-9]; 落地式是通过阻断坑内外水力联系, 保证坑外水位的稳定; 悬挂式是通过增加渗流路径来满足基坑安全, 但需在坑外设置回灌补偿井保障坑外水位的稳定。当含水层为厚或巨厚时, 落地式帷幕经济性较差, 悬挂式

* 国家自然科学基金面上项目(41472280, 51774196); 中国博士后科学基金项目(2016M592221); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE069)

帷幕应确保回灌率。鉴于回灌率的低下和回灌成本,泉域地区抽排水应优选落地式。

地下水控制方案的选择应根据地下水位降低后对周边环境的影响程度和可能采取的措施综合考虑。泉域复杂地质环境的地铁基坑围护设计方案应以控制水资源为主,支护刚度为辅^[10-11]。而如何优选设计方案,控制水资源,是当前工程界、学术界所亟需解决的课题。

1 工程概况

济南轨道交通 R2 线一期工程宝华街站为地下两层标准岛式车站,地处堤口路与无影山东路交叉

口,沿堤口路东西向布置,是典型的中心老城区位,周边环境极其复杂。基坑开挖影响区内建构筑物、管线同基坑的相对位置关系如图 1 以及表 1、表 2 所示。

济南市地势南高北低,东西两侧有部分小山脉,是典型的半盆地地形^[12-13]。该站地处盆地中心,地形平缓,地势较低。基坑开挖深度为 16.31 ~ 19.31 m,钻孔揭露工程地质自上而下:杂填土、素填土、粉质黏土、全风化闪长岩、强风化闪长岩、中风化闪长岩,厚度分布相对均匀,起伏变化不大。以 XKR0208 钻孔分析获得的该站地层物理力学参数如表 3 所示。地下水埋深 2.1 ~ 3.2 m,以第四系

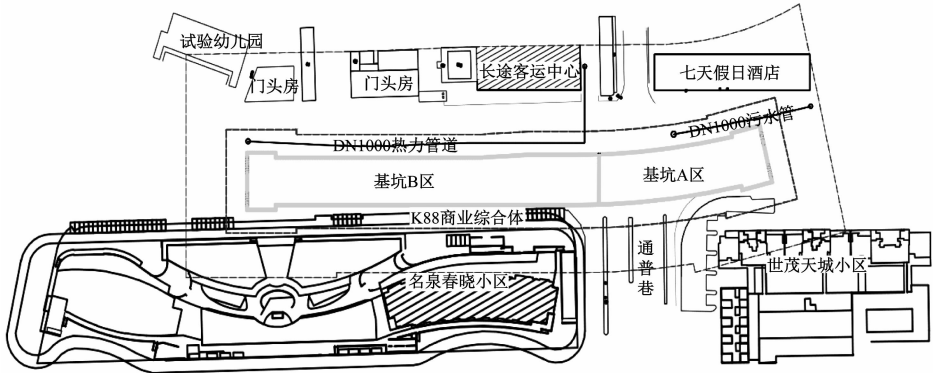


图 1 宝华街车站与邻近建构筑物相对位置关系

表 1 车站周边建(构)筑物风险

序号	邻近建筑物名称	建筑物与基坑相对位置关系	建筑物结构形式	建筑物基础刚度	建筑物几何特征	建筑物形状	建筑物基础所在持力层	风险等级
1	名泉春晓 K88 商场	名泉春晓一层地下室,地下 1 层,地上对应为商业部分,位于车站南侧,紧贴 2 号风亭基坑,框架结构,底板标高 -11.7 ~ -16.3 m	框架结构	桩基础			7-1 粉质黏土	Ⅲ级
2	长途客运中心办公楼	在车站西北侧,与站轴线垂直,最近距基坑 25 m,埋深 4 m。距离 1B 号口为 6 m	砖混结构	条形基础			1-2 素填土	Ⅲ级
3	济南长途客运中心	在车站西北侧,与站轴线平行,最近距离基坑 25 m,埋深 4 m。距离 1B 号口为 6 m	多层框架	独立基础			1-2 素填土	Ⅱ级
4	七天假日酒店	车站北侧,车站轴线平行,最近距离基坑 21 m	多层框架	条形基础			7-1 粉质黏土	Ⅲ级
5	世茂天城 2#楼	车站南侧,与站轴线平行,最近距离基坑 58 m	高层剪力墙	桩基础			19-2 中风化闪长岩	Ⅲ级
6	门头房	车站北侧,与站轴线平行,最近距离基坑 21 m	砖混结构	砖基础			1-1 杂填土	Ⅲ级
7	天桥区幼儿园	车站北侧,与站轴线平行,最近距离基坑 20 m	砖混基础	毛石基础			1-1 杂填土	Ⅲ级

表 2 车站周边管线情况

序号	管线名称	管线与基坑相对位置	材质	埋深	接头性质	现状	管径	风险等级
1	热力管道	DN1 000,临改,待主体完成后恢复	铸铁	1.29	刚性	良好	DN 1 000	Ⅱ级
2	污水管	DN1 000,临改,待主体完成后恢复	PE	2.77	柔性	良好	DN 1 000	Ⅱ级

表 3 工程地质物理力学参数

地层	天然重度	孔隙比	黏聚力	内摩擦角/	承载力特征	泊松比	基床系数/(MPa/m)		饱和单轴抗压	渗透系数
	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	c/kPa	$(^\circ)$	值 f_{ak}/kPa	ν	垂直	水平	强度/MPa	$K/(\text{cm}/\text{s})$
1-1 杂填土	19.0									9.0×10^{-3}
1-2 素填土	19.0									5.0×10^{-3}
7 黏土	19.1	0.846	25	17.0	110	0.35	21.0	43.0		1.2×10^{-4}
7-1 粉质黏土	19.4	0.744	29	17.0	130	0.30	39.0	44.0		2.0×10^{-6}
10-1 粉质黏土	19.5	0.750	30	19.0	220	0.30	40.5	47.0		2.9×10^{-3}
10-2 黏土	19.3	0.752	35	20.0	240	0.35	38.0	49.0		2.0×10^{-6}
14-1 粉质黏土	19.3	0.784	37	20.0	300	0.30	28.0	42.0		1.2×10^{-4}
19-1 全风化闪长岩	19.5	0.754	20	22.0	260					6.5×10^{-3}
19-2 全风化闪长岩	21.0		35	35.0	400				5.99	4.6×10^{-3}
19-3 中风化闪长岩	23.0				9 000				83.4	1.2×10^{-6}

松散孔隙潜水(赋存于杂/素填土、粉质黏土)及下伏基岩裂隙中的潜水(赋存于全强风化闪长岩)为主,属降水高风险区。

2 复杂地质环境的围护设计方案比选方法

2.1 基坑围护设计方案

根据宝华街车站工程地质、水文地质以及周边环境,可选用如下 4 种围护设计方案,4 种方案均可满足周边环境支护变形和地下水控制要求。

1) 方案一:地下连续墙。标准围护选用 29.0 m 的 800 mm 地连墙(入中风化 2 m,确保止水效果),沿坑深方向设三道支撑,第一道钢筋混凝土支撑 800 mm×1 000 mm,二、三道为 Φ 609 mm($t=16$ mm)钢管撑;端头围护选用 31.0 m 的 800 mm 地连墙,墙底位于第 19-3 中风化闪长岩中,沿坑深方向设四道撑+换撑,第一道钢筋混凝土支撑 800 mm×1 000 mm,其余均为 Φ 609 mm($t=16$ mm)钢管支撑。费用合计为 1 632.8 万元。

2) 方案二:钻孔咬合桩。标准围护选用 Φ 800 mm@600 mm 钻孔咬合桩,素桩 29.0 m(C15 超缓凝,入中风化 2 m,确保止水效果),咬合量为 200 mm,钢筋混凝土桩长 31 m(C30,入中风化 4 m,确保支护强度),沿坑深方向设三道支撑,第一道钢筋

混凝土支撑 800 mm×1 000 mm,其余均为 Φ 609 mm($t=16$ mm)钢管撑;端头围护选用 Φ 800 mm@550 mm 钻孔咬合桩,咬合量为 250 mm,素桩 29.0 m,钢筋混凝土桩长 32.0 m,桩底位于第 19-3 中风化闪长岩中,沿坑深方向设四道支撑+换撑,第一道钢筋混凝土支撑 800 mm×1 000 mm,其余均为 Φ 609 mm($t=16$ mm)钢管撑。费用合计为 1 675.5 万元。

3) 方案三:钻孔桩+高喷桩。标准围护结构选用 Φ 800 mm@1 200 mm 的钻孔桩+桩间 Φ 800 mm@1 200 mm 的高喷桩,高喷桩轴线向坑外偏移 200 mm,与钻孔桩咬合量为 200 mm,高喷桩深 29.0 m(水泥浆液,入中风化 2 m,确保止水效果),钻孔桩 31 m,桩底位于第 19-2 层中风化闪长岩(C30,入中风化 4 m,确保支护强度);沿坑深方向设三道支撑,第一道钢筋混凝土支撑 800 mm×1 000 mm,其余均为 Φ 609 mm($t=16$ mm)钢管撑;端头围护选用 Φ 1 000 mm@1 300 mm 咬合桩+桩间 Φ 800 mm@1 300 mm 高喷桩,高喷桩轴线沿钻孔桩轴线偏移 200 mm,与钻孔桩咬合为 200 mm,高喷桩(29.0 m)+钻孔桩(32.0 m)底均位于中风化闪长岩,沿坑深设四道支撑+换撑,第一道钢筋混凝土支撑 800 mm×1 000 mm,其余均为 Φ 609 mm($t=$

16 mm)钢管撑。费用合计为 1 399.4 万元。

4) 方案四: SMW 工法桩。标准围护选用 Φ 850 mm @600 mm 水泥土搅拌桩内插 H 型钢(700 mm \times 300 mm \times 13 mm \times 24 mm), 互相咬合 250 mm, 深 31.0 m(水泥土浆液由场地内建站自产, 桩底入中风化 2 m, 确保支护与止水效果), 沿坑深方向设三道支撑, 第一道钢筋混凝土支撑 800 mm \times 1 000 mm, 其余均为 Φ 609 mm(t = 16 mm)钢管撑; 端头围护选用 Φ 850 mm @ 550 mm, 相互咬合 300

mm, 深 32.0 m, 桩底入中风化闪长岩 4 m, 沿坑深方向设四道支撑 + 换撑, 第一道钢筋混凝土支撑 800 mm \times 1 000 mm, 其余均为 Φ 609 mm(t = 16 mm)钢管撑。费用合计为 1 199.9 万元。

2.2 围护设计方案评价指标

选取设备的普适性、止水适用性、环境影响、施工工期、工程造价 5 个指标作为围护设计方案的控制评价指标, 如表 4 所示。

表 4 围护设计方案评价指标

方案序号	机械设备选型	止水适用性	环境影响	施工工期	工程造价
地下连续墙	双轮铣不普遍	适用性好	泥浆污染大	较长	最高
钻孔咬合桩	设备较普遍	适用性较好	泥浆污染稍大	一般	较高
高压旋喷 + 钻孔桩	设备广泛	适用性较好	泥浆污染小	一般	高
SMW 工法桩	机械不常见	适用性好	环境污染小	短	较低

设备选型普适性可用采购或租用便利性(A)表示; 止水适用性可用该方案在该工程地质下的优选系数(B)表示; 环境影响可用环境友好系数(C)表示; 施工工期可用单位延米围护所需时间(D)表示; 工程造价可用单项工程围护结构完成所需总价(E)表示。

2.3 基于灰色关联的围护设计方案比选

灰色关联分析法是对各影响因素作用程度进行量化比较的有效工具, 并以关联度表示关联因素与参考因素之间的关系^[14-15]。为了更科学地得到宝华街站围护设计方案评价系数, 采用德菲尔 + 层次分析法制作专家调查表, 并从济南市工程质量监督站专家库中择优选取 10 位专家就上述评价系数进行调研。汇总的各围护设计评价系数如表 5 所示。

表 5 地铁基坑围护结构设计方案评价参数

序号	指标 A	指标 B	指标 C	指标 D/d	指标 E/5 000 元
方案一	0.3	1.0	0.8	1.5	1.0
方案二	0.6	0.8	0.5	1.3	0.3
方案三	0.2	0.8	0.8	2.0	0.5
方案四	0.3	0.3	0.3	1.8	0.2

由此推知: 上述评价指标 A 、 B 、 C 、 D 、 E 均为成本型评价参数, 则相对最优方案参数指标为:

$Z_0 = [0.2, 0.3, 0.3, 1.3, 0.2]$

则原始向量矩阵为:

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} 0.3, 1.0, 0.8, 1.5, 1.0 \\ 0.6, 0.8, 0.5, 1.3, 0.3 \\ 0.2, 0.8, 0.8, 2.0, 0.5 \\ 0.3, 0.3, 0.3, 1.8, 0.2 \end{bmatrix}$$

无量纲化 + 规范化决策矩阵为:

$$\bar{Z}' = \begin{bmatrix} 0.85, 1.38, 1.33, 0.91, 2.00 \\ 1.71, 1.10, 0.83, 0.79, 0.60 \\ 0.57, 1.10, 1.33, 1.21, 1.00 \\ 0.85, 0.41, 0.50, 1.09, 0.40 \end{bmatrix}$$

分辨率系数 β 取值范围为: $0.17 < \beta < 0.85$, 可取 $\beta = 0.35$ 。计算得灰色关联系数矩阵为:

$$Z_i \begin{bmatrix} 0.902\ 5 & 0.939\ 2 & 0.805\ 7 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0.941\ 1 & 0.957\ 6 & 0.887\ 2 & 0.982\ 1 & 0.637\ 7 \\ 0.988\ 5 & 0.987\ 6 & 0.974\ 7 & 0.957\ 6 & 0.468\ 7 \\ 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0.904\ 4 & 0.305\ 6 \end{bmatrix}$$

根据工程实际, 除止水适用性之外, 其他指标对方案决策控制权重基本相同, 故得关联系数矩阵的各指标权重分别取: $w_1 = 0.20$, $w_2 = 0.35$, $w_3 = 0.10$, $w_4 = 0.10$, $w_5 = 0.25$, 则比较序列关联度: $[r_{01} \ r_{02} \ r_{03} \ r_{04}] = 0.95, 0.94, 0.98, 0.92$ 。由于关联度越大, 表明评价方案与理想方案接近程度越高, 因此, 得知方案三在设备选型、止水效果、环境影响、施工工期及工程造价上均有优势, 因此方案三为宝华街站的较优围护设计方案。

3 优选方案的工程应用

选定改进型高喷桩试喷方案: 提升喷射压力,

增强土体切削能力,浆压力为 38~40 MPa,气压力为 0.6~0.8 MPa;降低提升速率,提升浆液均匀密实度,将钻头在全强风化闪长岩中提升速度控制在 3~5 cm/min,调整浆液配比,水灰比为 0.8(泥浆比重 1.7);缩小高喷间距,增大咬合量,将桩间一根旋喷桩($\Phi 800 \text{ mm} @ 350 \text{ mm}$)调整为桩间两根旋喷桩($\Phi 800 @ 450 \text{ mm}$)。

通过对试验桩进行取芯可知:芯样较完整,呈柱状(芯样采取率高于 80%),水泥浆分布均匀(水泥含量达 80% 以上),在全强风化岩与钻孔桩的交界咬合较好,如图 2 a)所示。

通过在钻孔桩与高喷桩(钻孔一)、高喷桩与高喷桩(钻孔二)之间咬合部分取芯钻孔注入一定的无压水头(水头高度为 2 m),间隔 5 min、10 min、15 min、30 min、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h、24 h 对钻孔内水头高度进行观测可知:钻孔一(钻孔桩与高喷桩咬合处)与钻孔二(高喷桩相互咬合处)在 24 h 内总的地下水位降均可控制在 0.2 m 以内,分别为 0.18 m、0.15 m。总地下水位下降速率大致不变,呈单一水平线。对比钻孔一与钻孔二地下水位降发现,高喷桩在同样压力作用下,与高喷桩相互咬合较与钻孔桩咬合效果要好,这是由于空压机虽然调整的喷射压力相同,但经过管路、钻杆、钻头之后,产生了大量的压力损失,使得喷射压力小于钻孔咬合桩强度,而高于高喷桩强度所致。

由图 2 b)可知:基坑开挖后,侧壁较干燥,仅局部存在较小渗漏点,截水效果好。因此,钻孔桩+高喷桩的方案是合理的,在基坑开挖过程中,未出现明显渗水。



a) 芯样:粉质黏土及全强风化岩层芯样



b) 开挖:侧墙渗点较少,截水效果好

图2 不同现场试验方案旋喷桩芯样完整性程度

4 结语

在工程地质复杂、建构筑物风险高、泉水敏感区等地域,如何保障基坑安全、节约水资源是轨道

交通建设的重点。本文优选围护结构设计方案,兼顾了基坑安全、设备选型、截水效果、环境影响、工期和造价,是一种围护结构设计方案比选的尝试。应用此方案对特殊性全强风化岩层中施工参数进行了现场试验,确定了合理施工方案,达到了精细化管理的目的。

参考文献

- [1] 吕放. 济南奋战“1+454”体系“现代泉城”建设风劲潮涌[N]. 济南日报,2018-02-22(1).
- [2] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报,1998(1):112.
- [3] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社,2004.
- [4] 李志伟,郑刚. 基坑开挖对邻近不同刚度建筑物影响的三维有限元分析[J]. 岩土力学,2013(6):1807.
- [5] 田海亮. 基坑开挖对邻近建筑物的影响及其支护结构参数优化研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.
- [6] 李大勇,龚晓南. 软土地基深基坑工程邻近柔性接口地下管线的性状分析[J]. 土木工程学报,2003(2):77.
- [7] 刘建国. 富水复杂地址浅埋暗挖隧道修建技术[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通监测技术规范:GB/T 50911—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通岩土工程勘察规范:GB 50307—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范:GB 50652—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规范:JGJ 120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 黄欢. 基于层次-模糊评价法评判地铁车站地下水风险[J]. 建筑施工,2014(3):286.
- [14] 孙玉刚. 灰色关联分析及其应用的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [15] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范:DLT 5200—2004[S]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

(收稿日期:2018-12-06)