

邻近多条地铁的基坑降水技术

瞿成松^{1,2,3}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 上海长凯岩土工程有限公司, 上海 200002)

摘要:对地基沉降、位移极为敏感的邻近地铁隧道地区施工基坑降水工程时,为控制承压水采取回灌措施,既要克服基坑底板由于承压水造成基坑突涌等危害,又要减少基坑降水施工时对周边建(构)筑物造成的危害。通过邻近地铁 2、4 和 9 号线的上海盛大深基坑降水回灌工程成功实例,探讨邻近多条地铁区间隧道的超深基坑降水技术。

关键词:基坑工程;地铁;基坑降水;地下水回灌

中图分类号: TU46⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2011)02-0029-07

Dewatering Technology in the Vicinity of Multiple Subway—A Case Study of Dewatering for Shanghai Shanda Foundation Pits/QU Cheng-song^{1,2,3} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center for Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education of China, Beijing 100875, China; 3. Shanghai Changkai Geotechnical Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: In dewatering near multiple subway tunnels sensitive to ground subsidence and displacement, recharge measures are often taken to control the confined water. In such a case, it is necessary to overcome hazards caused by the confined water, such as water inrush, and also reduce the harm to the surrounding building (structures). This paper discusses the ultra-deep foundation dewatering technology based on the successful case of Shanghai Shanda dewatering recharge works close to Metro line 2, 4, and 9.

Key words: the foundation pits; subway; dewatering; groundwater recharge

1 工程概况

盛大国际金融中心位于上海市浦东新区,东北面至世纪大道,东南面至向城路,西面至福山路。工程主体为一幢地下 4 层、地上 40 层的甲级办公楼。本工程在邻近地铁 4 号线区域设置 3 层地下室、其余设置 4 层地下室,采用钢筋混凝土钻孔灌注桩桩筏基础。基坑平面呈三角形,基坑总面积约 7000 m²,基坑周长 360 m,其裙楼区域挖深 20.75 m (在 4 号线一侧地下 3 层区挖深 17.05 m),主楼区域挖深 22.25 m,主楼电梯井深坑挖深 27.05 m,属于超深基坑。承压含水层组顶板埋深 28.5 m。本工程场地周边分布有多条地铁区间隧道。另外,基坑在周边世纪大道、向城路和福山路下均埋设有市政管线,包括电力管线、上下水管、煤气管、通讯管线等,如图 1 所示。各地铁线区间隧道概况见表 1。

其中,地铁 9 号线区间隧道将在本工程基坑施工期间完成邻近区域的盾构推进。

基坑与地铁区间隧道关系如图 2、3 所示。

基坑围护分区将整个基坑划分为 I、II、III 区,按设计要求采取分区顺作方案,先开挖施工 I 区,在完成地下室结构后,再依次开挖施工 II、III 区。挖土分区分块,支撑也分区分块, I 区于 2007 年 10 月 5 日至 2008 年 1 月 12 日底板浇完, II 区于 2008 年 10 月 9 日至 2009 年 1 月 3 日底板浇完, III 区于 2008 年 8 月 1 日至同年 11 月 14 日底板浇完。基坑降水精心设计,在土方开挖和基坑封底阶段降水科学运行,既保证了基坑顺利开挖,又严格控制了基坑降水引起的周边地面沉降。

2 工程地质水文地质条件

场区土层物理力学性质指标见表 2。

根据钻孔资料,在本场地及其附近缺失第⑧层土,第⑦层(上海市第一承压含水层)与第⑨层(上海市第二承压含水层)连通。另根据上海市区域资料,在本场地及其附近缺失第⑩层土,第⑨和第⑪层(上海市第三承压含水层)连通,因此,该区的第一、

收稿日期:2010-11-26

基金项目:上海市科学技术委员会资助项目(09DZ1207900;10DZ1202300)

作者简介:瞿成松(1964-),男(汉族),湖北黄梅人,北京师范大学在读博士,上海长凯岩土工程有限公司副总工程师、高级工程师,水文地质专业,主要从事水文地质、工程地质和岩土工程研究和管理,上海市虎丘路 5 号 4 楼,wdkjtj@sina.com。

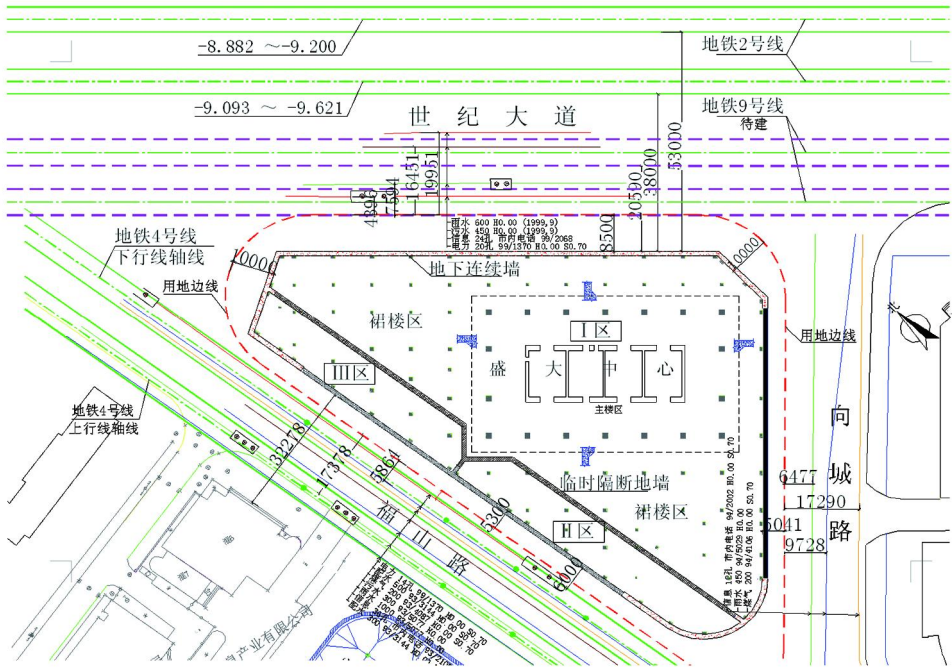


图1 基坑与周边环境平面图

表1 邻近基坑的地铁线区间隧道分布情况表

序号	地铁线区间隧道	位置走向	埋深/m	距离本工程地墙/m	运营情况
1	4 号线	福山路侧,平行	17	6.0	运营中
2	2 号线	世纪大道侧,平行	16~17	38.0	运营中
3	9 号线	世纪大道侧,平行	16~19	8.5	待建

表2 土层物理力学性质综合成果表

土层编号	土层	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	φ/(°)	c/kPa	现场注水试验渗透系数/(cm·s ⁻¹)
①	填土	1.10~3.60				
②	粉质粘土	0.20~2.20	18.8	18.0	24.0	2.5×10 ⁻⁶
③	淤泥质粉质粘土夹粘质粉土	6.20~7.90	17.8	26.0	9.0	3.0×10 ⁻⁵
④	淤泥质粘土	4.20~5.50	16.7	12.0	11.0	3.7×10 ⁻⁷
⑤ _{1a}	粘土	2.90~4.80	17.4	11.5	14.0	2.0×10 ⁻⁷
⑤ _{1b}	粉质粘土	4.20~6.80	18.3	15.5	17.0	3.0×10 ⁻⁶
⑥	粉质粘土	3.80~5.00	19.6	14.0	54.0	4.0×10 ⁻⁷
⑦ _{1a}	砂质粉土	9.00~11.40	18.8	33.0	4.0	3.7×10 ⁻⁴
⑦ _{1b}	粉砂	22.50~25.50	18.9	34.5	3.0	9.0×10 ⁻⁴

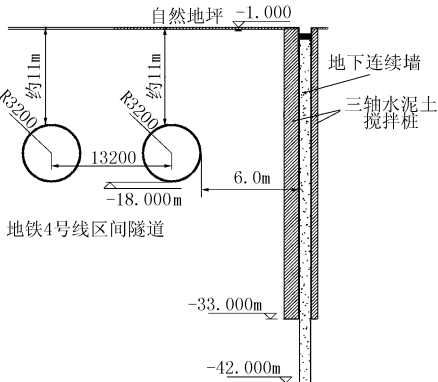


图2 基坑与地铁4号线隧道关系剖面示意图

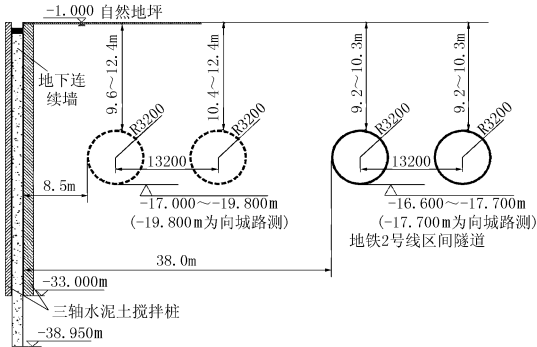


图3 基坑与地铁2、9号线隧道关系剖面示意图

二、三承压水层相互连通,含水层厚度约 110.00 m, 为巨厚的复合承压含水层组。承压含水层组顶板埋深 28.5 m。承压水水位比较高,一般在地面以下 3~11 m,随季节变化,水头压力对本基坑安全造成威胁。

基坑各部位的开挖深度与承压水层的距离如图 4 所示。

3 邻近多条地铁区间隧道的超深基坑工程降水技术

3.1 基坑底板突涌稳定性分析

本基坑工程开挖深度大,基坑降水,尤其是降压水,是保障基坑顺利施工的关键;而另一方面,基坑周侧分布有多条地铁区间隧道,周边环境保护极

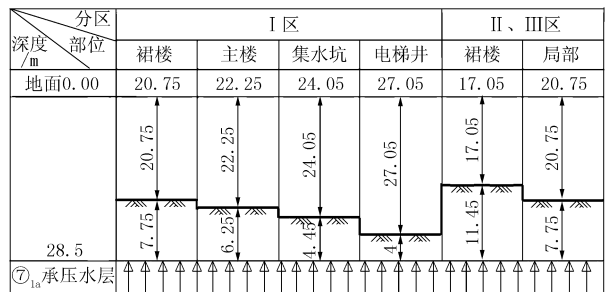


图4 基坑各部位开挖深度与承压含水层的关系示意图

为严格,必须有效控制降承压水对周边环境造成的不利影响。

承压水位控制原则是:当开挖深度 > 25.50 m 时,承压水位必须始终控制在开挖面以下 1.0 ~ 2.0 m 范围之内;当基坑开挖深度 < 25.50 m 时,承压水位控制按下式进行:

$$F = \frac{\gamma_s(28.50 - h_s)}{\gamma_w(28.50 - D)} \geq 1.1$$

式中: F ——安全系数,本工程取 1.1; h_s ——基坑开挖深度, m; D ——安全承压水头埋深值, m; γ_s ——基坑底板至承压含水层顶板间的土层重度的层厚加权平均值; γ_w ——水的重度, 10 kN/m³。

由于地质条件和桩基施工的不确定性,为了避免盲目降水对周边环境造成较大影响,在设计降水方案前应通过现场抽水试验确定各种设计参数。

3.2 现场抽水试验

抽水试验安排在地下连续墙全部封闭后进行。抽水试验主要目的是检验计算模型中各土层水文地质参数为降承压水方案设计提供依据,同时检验现场的供电、排水以及监测等系统。抽水试验在 I 区坑内布置 6 口试验井,其中 2 口抽水井,4 口观测井。先观测静止水位埋深,然后开启 2 口抽水井(Y9、Y12)进行抽水试验,在抽水 22 h 后试验井水位基本稳定。抽水试验结果见表 3。

表3 抽水试验观测成果

井孔编号	用途	井深/m	静止承压水位埋深/m	静止水位埋深平均	抽水后水位下降/m	抽水后水位埋深/m	单井出水量/(m ³ ·h ⁻¹)
Y9	抽水井	42	8.90				17.0
Y12	抽水井	40	8.90				6.2
Y14	观测井	42	9.07	9.00	2.65	11.72	
Y25	观测井	42	8.81		2.61	11.44	
Y37	观测井	42	9.15		4.94	14.09	
J4	观测井	37	9.12		4.85	13.97	

根据各观测井水位实测值,利用三维渗流 MODFLOW 软件对实测数据进行模拟计算得到本工

程承压含水层的水文地质参数,结果见表 4。

表4 水文地质参数反演值

土层	k_{xx} /(m·d ⁻¹)	k_{yy} /(m·d ⁻¹)	k_{zz} /(m·d ⁻¹)	s_s /m ⁻¹	μ
⑦1a	1.8	1.8	0.40	0.00008	0.15
⑦1b	3.4	3.4	0.56	0.00050	0.20

抽水试验结束后,对观测井 Y14、Y25、Y37 进行了水位恢复观测。水位恢复曲线见图 4。

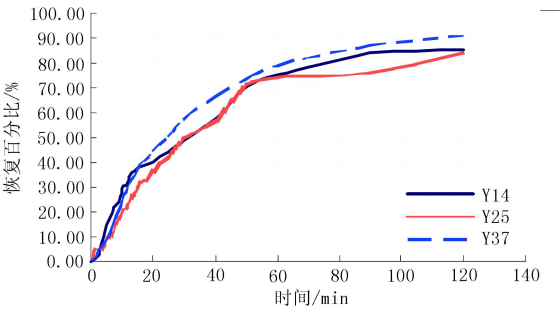


图5 水位恢复比例曲线图

由图 5 可得出下述结论:因停电或其它因素的影响,导致停止抽水时间间隔不宜超过 5 min,否则将影响基坑的安全。因此,现场必须设置备用电源,并且保证能及时启动,否则将影响基坑安全。

3.3 降承压水方案设计

3.3.1 减压降水井深度的确定

本工程确定减压降水井的深度主要考虑以下几方面:

(1) 根据周边环境保护要求,减压降水井的深度不宜超过围护墙的深度。本工程地下连续墙深度为 37.95 ~ 41.00 m,减压降水井的深度不宜超过 38.00 m。

(2) 第一承压含水层上段⑦1a层为草黄色砂质粉土夹粉砂,水平向渗透系数仅 1.8 m/d,渗透性较差,减压降水井的深度宜超过该层的层底深度,以保证减压降水井的单井抽水量,该层的层顶埋深约 28.3 m,层底埋深约 38.7 m,按前述,减压降水井的深度宜大于 38.7 m,以保证减压降水井的单井抽水量。

(3) 基坑内普遍采用三轴水泥土搅拌桩或旋喷桩加固,加固体的最大深度达到 32.0 m。因此,减压降水井过滤器的顶端埋深宜大于 32.0 m。

(4) 本着安全、有效的原则,现场进行了预成井试验,预成井深度分别为 36.0、37.0、38.0、40.0、42.0 m。预成井试验结果见表 5。

综合考虑各种因素,减压降水井深度初步确定为 40.0 ~ 42.0 m,在裙楼基坑区域,减压降水井深度

表 5 水文地质参数反演值预成减压井的单井抽水量汇总表

序号	降水井编号	井深 /m	单井抽水量 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	说明
1	J1	36.0	<0.5,断流	作观测井
2	J12	37.0	<0.9,断流	作观测井
3	Y23	38.0	1.71	单井流量不满足要求
4	Y12	40.0	6.2	单井流量基本满足要求
5	Y9	42.0	17.0	单井流量满足要求

40.0 m;在主楼基坑区域,减压降水井深度 42.0 m。

3.3.2 减压降水井平面布置与井结构

根据抽水试验及参数反演分析结果,对开挖基坑时的承压水降压过程进行模拟预测分析。计算结果如下:在基坑内布置 39 口减压井(含备用井及观测井)。基坑降水井平面布置见图 6,井结构剖面见图 7。

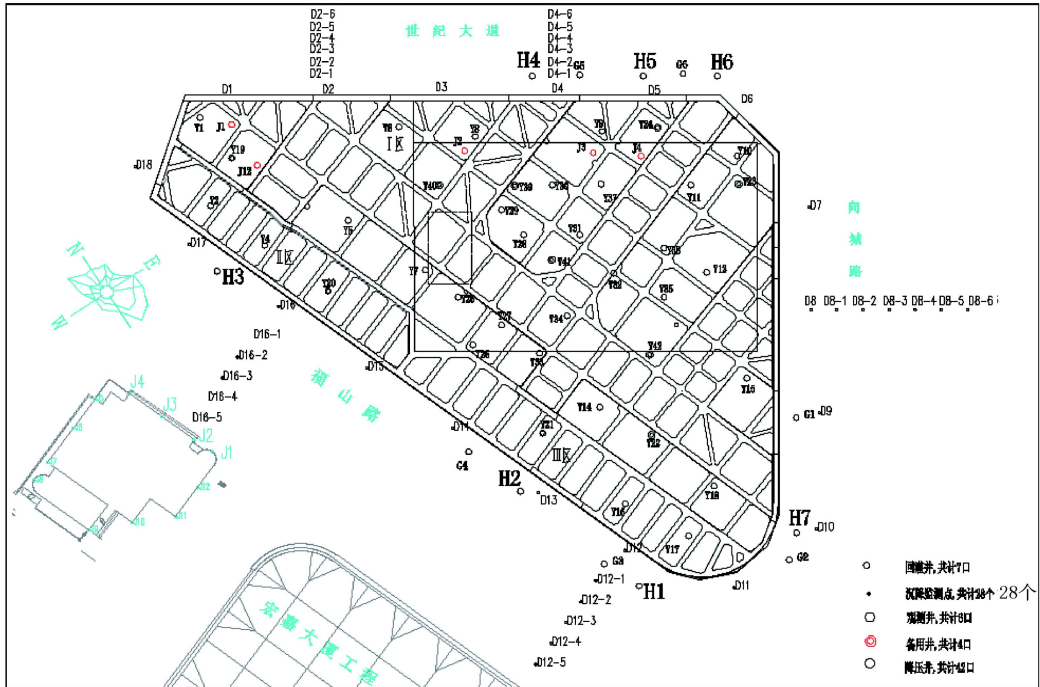


图 6 基坑降水井及监测点平面布置图

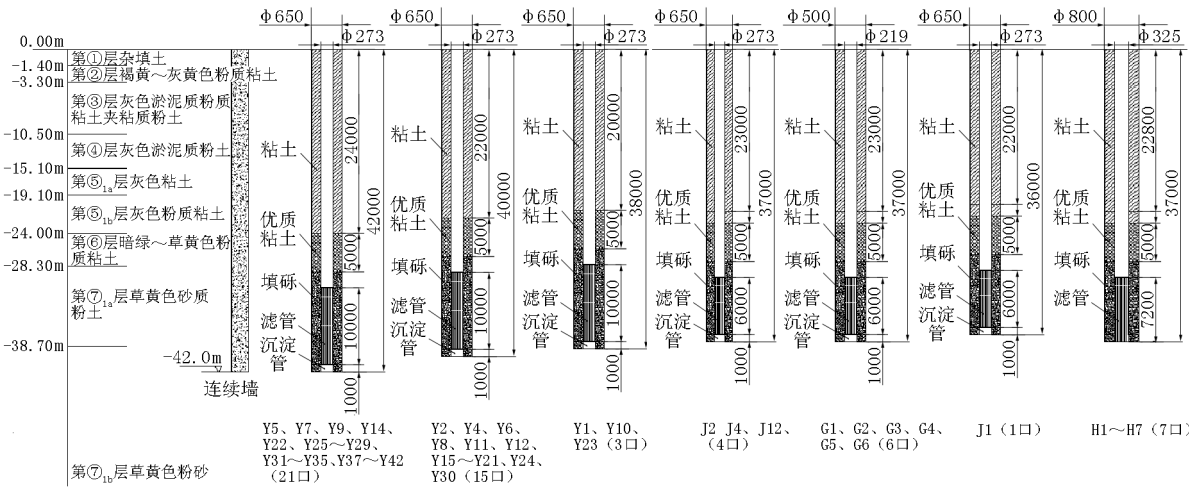


图 7 基坑降水井剖面示意图

3.3.3 减压降水运行与水位控制

根据Ⅰ区基坑开挖工况,分阶段适时开启数量不等的降水井进行降水,各阶段开启井数方案见表 6。

根据上述降水运行计划,主楼区基坑开挖深度达 27.05 m,要求承压水水位埋深控制在地面下

28.05 m,开启 30 口减压井,可以满足基坑安全的要求,采用 MODFLOW 三维渗流软件预测承压水水位埋深等值线如图 8 所示。

3.3.4 地面沉降、地铁隧道沉降预测

采用经典弹性地面沉降公式进行减压降水引起

表 6 不同开挖深度减压降水运行方案

序号	支撑序号或部位	开挖标高/m	开挖深度/m	水位埋深/m	是否降压	开启井数/口
1	一	-2.00	1.00		否	0
2	二	-7.50	6.50		否	0
3	三	-11.35	10.35		否	0
4	四	-15.55	14.55	5.67	否	0
5	五	-18.95	17.95	11.24	是	9
6	裙楼坑底	-21.75	20.75	15.82	是	16
7	主楼坑底	-23.25	22.25	18.27	是	20
8	主楼电梯深坑	-28.05	27.05	28.05	是	30

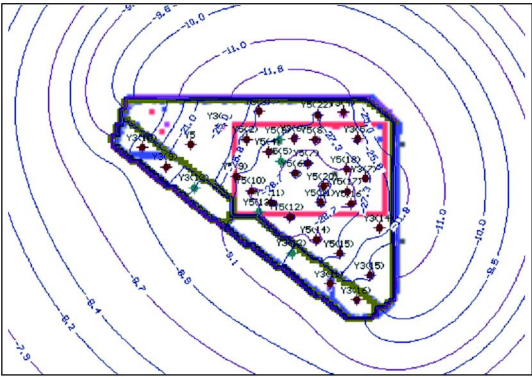


图 8 开挖施工基坑降水 30 天后承压水位埋深等值线图 (单位:m)

的地层沉降计算:

$$\Delta b = \sum b_0 m_v s \gamma_w F$$

式中: Δb ——地层压缩量,mm; b_0 ——地层初始厚度,m; m_v ——体积压缩系数, MPa^{-1} ; s ——水位降深,m; γ_w ——地下水的重度, kN/m^3 ; F ——沉降经验系数,其取值与土性及降水持续时间有关。

根据上述公式进行沉降预测,结合计划工期降水按持续 180 天考虑,地铁隧道埋深按 17.0 m 考虑。计算结果详见图 9、图 10 及表 7。

减压降水施工运行在基坑外 10 m 处由降水引起的地面沉降应控制在 5 mm 以内。

3.4 降水过程控制

本工程基坑减压降水运行分 4 个时段进行:

第一时段:基坑开挖到主楼电梯井深坑设计坑底标高前,降压井逐步开启运行进行降水;

第二时段:主楼电梯井深坑基础底板施工前,保留部分降压井继续抽水,其余井进行封井并将井管割到基坑开挖面;施工底板时,对保留的降压井周边焊接止水钢板,并从结构角度为以后封井做好准备;

第三时段:主楼基础电梯井底板养护阶段继续抽水,当达到养护强度后,再封闭部分井,其余井继续抽水;

第四时段:在基础后浇带封闭前,保留的部分井

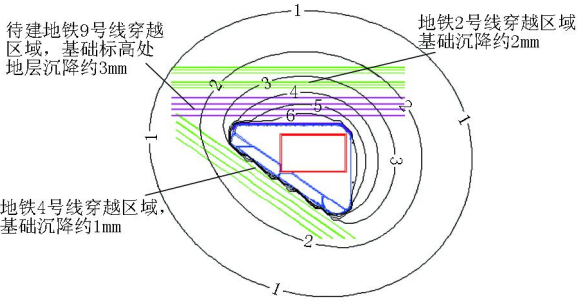


图 9 降水持续 180 天后的预测地面沉降等值线图

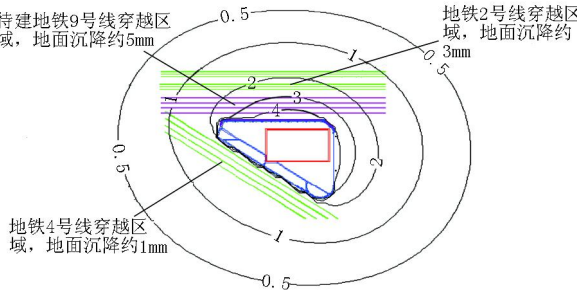


图 10 降水持续 180 天后的预测地铁隧道沉降等值线图

表 7 预测沉降汇总表

平面位置	最大承压水位降深/m	最大基础沉降/mm	最大地面沉降/mm
地铁 2 号线穿越区域	2.7	2.0	3.0
地铁 4 号线穿越区域	1.8	1.0	2.0
待建地铁 9 号线穿越区域	4.4	3.5	5.0
紧邻地墙外侧处	5.2	4.0	6.0

继续抽水,根据设计承压水控制水位标高以及承压水水头实际观测数据,调整降水井井数,做到逐步采用井内高压注浆法封井。

实际减压降水运行情况见图 11 和表 8。

3.5 地下水回灌控制

基坑周边布置 7 口 37 m 深回灌井,从 2007 年 12 月 12 日~2008 年 2 月 14 日,回灌量共计 22096 m^3 ,同时期坑内抽水量为 170508 m^3 。有效地保护了地铁隧道的正常运营。没有回灌时,坑内日抽水量为 3500 t,坑外观测孔 G1 和 G2 水位埋深为 20.39 m 和 18.15 m,回灌后,坑内日抽水量达 4251 t,坑外观测孔 G1 和 G2 水位埋深为 18.56 m 和 16.92 m,分别上升了 1.83 m 和 1.23 m。降水回灌情况见图 12。

从 2007 年 12 月 30 日~2008 年 1 月 23 日,主楼电梯井深坑开挖,施工底板,历时 25 天,开启 26 口降水井降水,根据图 13 这一期间地下连续墙外侧 10~20 m 范围地面沉降监测资料显示,世纪大道侧地面累计最大沉降 10.16 mm;向城路侧地面累计最大沉降 10.35 mm;福山路侧地面累计最大沉降

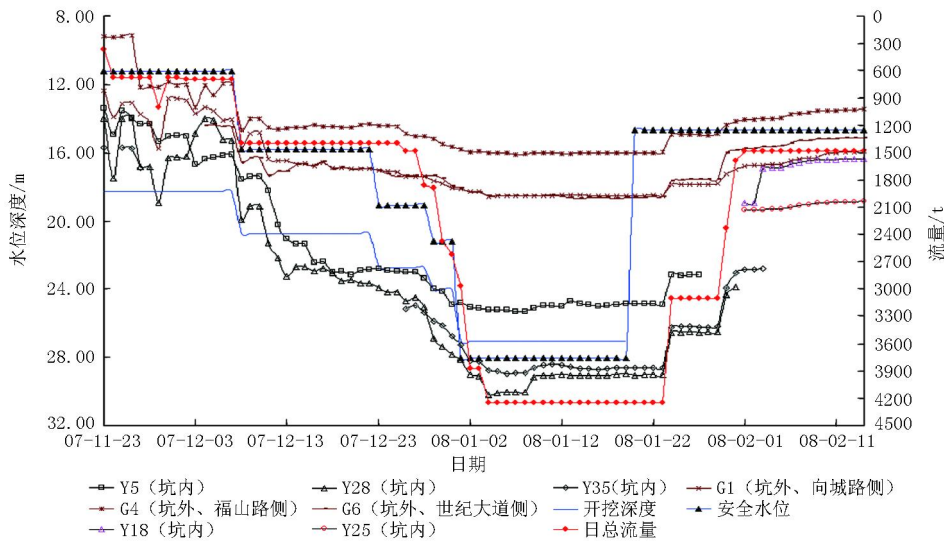


图 11 降水综合信息图(2007 年 11 月 23 日 ~ 2008 年 2 月 14 日)

表 8 减压降水井实际运行记录

序号	阶段	开挖标高	开挖深度	安全水位深	开启井数	运行时间 /(年.月.日)	实测水位深/m	
		/m	/m	/m	/口		坑内	坑外
1	开挖施工第五道支撑	-18.95	17.95	11.24	8	07.11.24 ~ 12.7(14 天)	13.62	12.04
2	裙楼坑底开挖施工底板	-21.75	20.75	15.82	16	07.12.8 ~ 12.25(18 天)	19.56	16.49
3	主楼坑底开挖	-23.25	22.25	18.27	20	07.12.26 ~ 12.29(4 天)	23.02	15.87
4	主楼电梯深坑开挖,施工底板	-28.05	27.05	28.05	26	07.12.30 ~ 08.1.23(25 天)	28.65	16.02
5	主楼电梯深坑底板养护			19.10	16	08.1.23 ~ 08.1.29(7 天)	23.15	16.54
6	后浇带保持阶段(前期)			14.69	12	08.1.30 ~ 08.2.27(29 天)	15.88	14.82
7	后浇带保持阶段(中期)			14.69	8	08.2.28 ~ 08.5.8(29 天)	15.88	14.82
8	后浇带保持阶段(后期)			14.69	4	08.5.8 ~ 09.3.8(300 天)	15.60	14.50

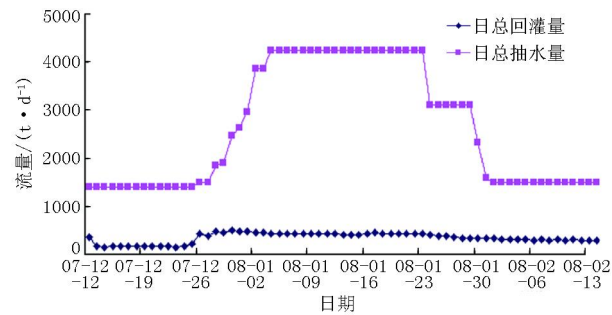


图 12 降水回灌信息图

3.85 mm,根据图 13 分析,同样位置降压降水期间引起的累计沉降分别为 3、3.1 和 1.1 mm,均控制在 5 mm 以内。在底板浇筑完以后,随着逐步封井,上述区域地面沉降也随之回弹一部分。同时,根据福山路侧地铁 4 号线区间下行线自动沉降监测数据显示(见图 14),在 I 区基坑开挖期间,地铁轨道的沉降变形均在 -1.5 ~ 2 mm 之间,远小于相关规范控制限值,而由降承压水引起的轨道沉降值更小,与预测值接近,不会造成危害性影响(在世纪大道侧邻近的待建地铁 9 号线区间隧道在本工程 I 区地下室

结构施工至地下一夹层前未盾构推进)。

4 结语

- (1) 邻近多条地铁区间隧道的超深基坑降水应在考虑地下水回灌措施,在基坑地墙与被保护地铁区之间设置回灌井,以有效减少地铁隧道区地下水水位下降幅度,有效抑制基坑降水引起的各土层沉降对隧道的影响。
- (2) 施工单位严把施工质量关,特别是降水井施工质量控制。
- (3) 基坑降水工程应先做抽水试验,设计和运行时一方面保证水位降至安全水位,另一方面保证由降水引起的地层沉降尽量小。抽水试验获取水文地质参数,对地下水降深和地面沉降通过解析法和三维数值模型进行分析计算预测调整,计算与实际值较吻合。理论指导实际运行,保证基坑降水满足基坑开挖的目的和环境控制的条件。
- (4) 从本工程深基坑降承压水运行监测数据来看,各项控制指标均在预测控制范围以内,再次验证了有回灌控制的深层降水对地面沉降的影响较小,

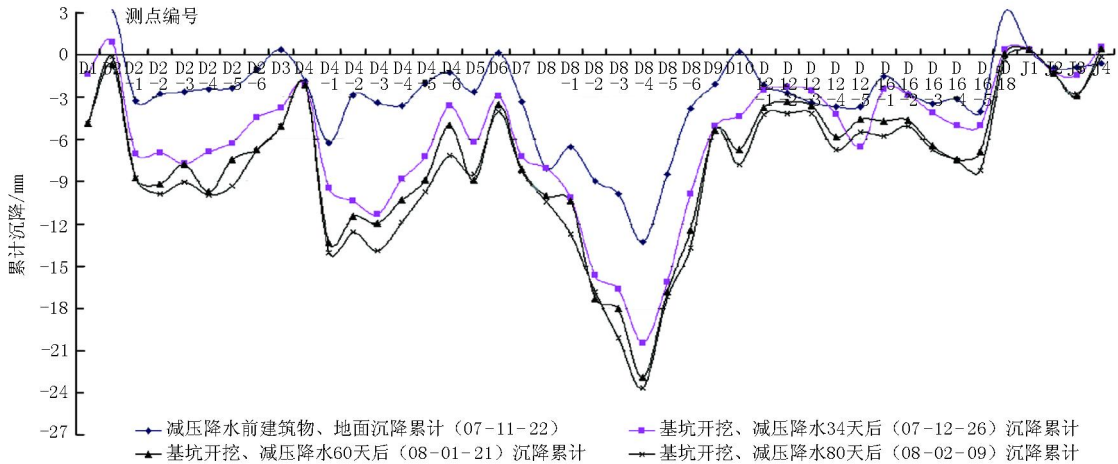


图 13 降水与开挖引起地面沉降历时曲线图

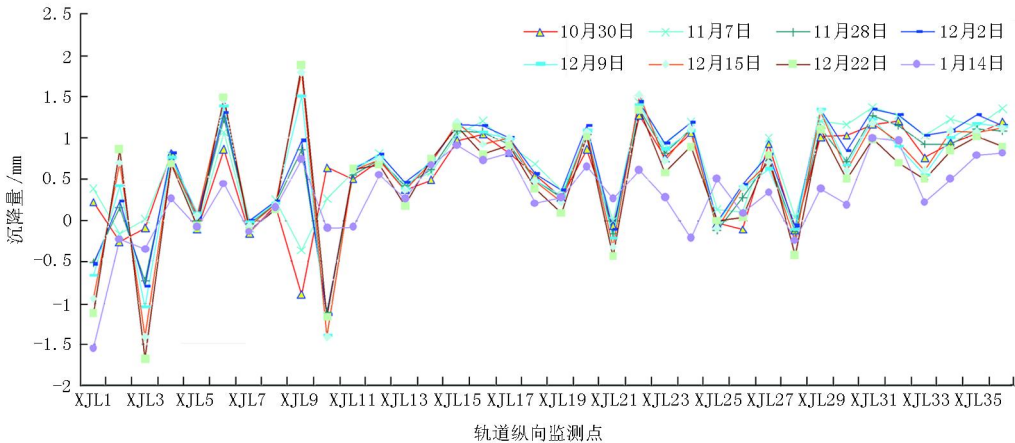


图 14 地铁 4 号线轨道沉降变化曲线

分布范围较小。

(5)在复杂的周边环境与特殊的水文地质条件下,深基坑工程降承压水施工应以“预防为主、分层降水、按需降压、动态调整”为基本原则。本基坑工程在土方开挖与降水的高峰期,在满足基础结构顺利施工的同时,降水没有对邻近的地铁区间隧道造成附加的危害。

参考文献:

[1] 朱明忠,施淑芬,王春雨. 深井降水设计与施工干问题探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):35-38.
[2] 王小刚,邓丁海. 管井与轻型井点复合降水方式的设计与施工[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(11):17-19.
[3] 姚天强,石振华. 基坑降水手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
[4] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
[5] 武永霞,张楠,陆建生. 地下水回灌技术在浅层承压含水层中的实践与探讨[J]. 岩土工程技术,2010,24(3):156-160.

中国地质科学院勘探技术研究所喜获两项铝合金钻杆实用新型专利

本刊讯 近日,经国家知识产权局审查、授权,中国地质科学院勘探技术研究所承担的国土资源大调查地质调查项目“地质岩心钻探铝合金钻杆研究”喜获两项铝合金钻杆实用新型专利。

2009 年 2 月至今,“地质岩心钻探铝合金钻杆研究”项目组在高性能铝合金管材研制、管材热处理工艺研究、钻杆结构设计、室内试验及野外生产试验研究过程中,克服了众多难题及技术“瓶颈”,取得了大量的基础性数据、积累了丰富的实践经验。在安徽淮北彭桥矿区的野外生产试验中,铝合金钻杆应用取得了良好的效果,累计进尺

近 2000 m,最深终孔深度 960 m,开辟了我国地质钻探铝合金钻杆在中深孔应用的先河。并于 2011 年 2 月成功获批“地质钻探铝合金钻杆”及“反循环钻进铝合金双壁钻杆”两项实用新型专利。

开展地质钻探铝合金钻杆研究,对于提高我国地质调查钻探工程施工效率、推动地质钻探科学技术进步以及节能降耗工作具有重大的现实意义。中国地质科学院勘探技术研究所部、局的领导下,将进一步加大轻合金钻杆研究力度,为科学超深井钻探研究及实施进行相关的技术储备。
(梁 健、孙建华 供稿)