

DOI: 10.11779/CJGE2021S2002

含水层未截断条件下超深基坑回灌控制沉降技术研究

郑 刚^{1, 2}, 石建成², 程雪松^{*1, 2}, 赵悦镔², 栗晴瀚², 高 琦³, 刘 波³, 王书雄⁴, 马继山⁴

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 中铁十二局集团有限公司, 天津 300072; 4. 天津市地下铁道集团有限公司, 天津 300392)

摘要: 在中国沿海城市地区, 以天津为例, 承压含水层厚度较大, 埋深较深, 若全部截断含水层, 工程造价昂贵, 因此多采用悬挂式止水帷幕, 此时基坑周边难免受到基坑降水的影响。为保护周边建筑物安全, 常采用回灌措施来控制沉降。通过监测天津地铁6号线某车站基坑工程降水与回灌过程中的水位变化与地表沉降数据进行分析。研究表明, 在回灌全面开启后, 基坑邻近区的水位得到控制, 地表沉降发展逐渐趋于稳定。回灌区附近水位抬升较快, 地表沉降有所恢复, 存在一定延迟现象, 可以达到预期回灌保护效果。在基坑降水过程中应持续回灌, 定期监测承压含水层及地表沉降的变化, 若出现异常应逐渐增加回灌量, 避免水位骤升骤降引起地表沉降甚至建筑不均匀沉降。

关键词: 基坑降水; 地表沉降; 止水帷幕; 地连墙; 回灌

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0007-04

作者简介: 郑 刚(1967—), 男, 教授, 博士, 从事土力学及岩土工程教学和科研工作。E-mail: Zhenggang1967@163.com。

Control settlement of recharge in ultra-deep excavations under partial block effect of aquifer

ZHENG Gang^{1, 2}, SHI Jian-cheng², CHENG Xue-song^{1, 2}, ZHAO Yue-bin², LI Qing-han², GAO Qi³, LIU Bo³,
WANG Shu-xiong⁴, MA Ji-shan⁴

(1. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Civil Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. China Railway 12 Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300072, China; 4. Tianjin Underground
Railway Group Co., Ltd., Tianjin 300392, China)

Abstract: In coastal cities in China, taking Tianjin for an example, the pressure aquifer is rather thick and buried deep. Cutting off all the aquifer will lead to high construction cost. Therefore, the suspended water-stop curtain is often adopted, in which the water level outside the excavation is inevitably influenced by dewatering. To protect building safety, the recharge is often introduced to control settlement. An analysis is given based on the drawdown and ground surface settlement data monitored during dewatering and recharging in the excavation of a station of Tianjin Rail Transit line 6. After the recharge is fully started, the water level of the neighboring area remains stable, and so is the development of ground surface settlement. The water level near the recharging area rises quickly, which is related directly to the amount of recharge. The ground surface settlement is recovered to a certain extent after starting recharging, but with certain delay. The expected recharge protection can be achieved. Recharging is kept during pit excavation and change in the pressure aquifer and ground surface settlement regularly is monitored. Upon exceptions, the amount of recharge is gradually increased to avoid change of ground surface settlement or even differential settlement of buildings caused by sudden change in the water level.

Key words: dewatering; ground settlement; suspended impervious curtain; diaphragm wall; recharge

0 引言

城市地面沉降造成人类生活环境的急剧恶化, 也引发诸多工程安全问题。经研究表明, 沉降发展的主要原因是由于位于50~200 m的承压含水层水位下降引起的^[1]。由于地下水的大量抽取加速了城市地面的快速沉降, 造成了巨大的经济损失, 导致生态环境的严重破坏。因此, 城市沉降问题引起了诸多学者、专家的广泛关注。

承压层持续降水将导致地下水水质恶化、海水入侵, 使地下水水质遭到破坏, 最终影响生态环境。人工补给地下水是恢复受损含水层的主要方法之一。地下水回灌目前已经广泛应用于实际工程中, 其理论研究逐步完善。20世纪20年代中期, 很多地区逐渐开

基金项目: 天津科技计划项目(19YFZCSN01160)

收稿日期: 2021-08-15

*通信作者 (E-mail: cheng_xuesong@163.com)

始采用回灌的措施提高承压含水层水位，保护周围建筑，控制地表沉降^[2]。在理论研究方面，也有诸多学者通过现场回灌试验及数值模拟的方式研究了地下水人工回灌的可行性与实际效果^[3]。

在天津地区，地下水回灌技术在基坑降水期间保护坑外建筑管线、控制区域沉降、改善地下水水质等方面具有一定的应用。郑刚等^[4]、曾超峰等^[5]在天津地区进行了现场回灌试验，提出了在以粉土粉砂层为主的天津地区可以利用回灌的措施来减少沉降，并通过研究回灌开启时间、回灌的组合方式、渗流场方向的发展等内容，提出了双井组合回灌与越流回灌理论。

目前,虽然利用回灌技术控制沉降的理论与实践已经有了比较成熟的研究,但尚未有学者针对在有悬挂式止水帷幕的场地回灌的效应方面进行深入研究。

本文介绍了天津地区某地铁站深基坑工程,该基坑采用悬挂式止水帷幕,并结合回灌技术来控制沉降。本文对基坑降水和回灌不同阶段的水位变化、地表沉降与周围建筑物沉降发展进行分析,并对回灌保护效果做出评价,为与该工程类似的案例提供参考依据。

1 工程概况

本车站的地理位置处于天津市津南区，场地地质条件复杂，承压含水层多以粉土、粉细砂为主，其渗透系数较小，回灌可行性值得研究。基坑标准段距离南侧小区直线距离 42.24 m，距离地产在建项目直线距离 30.4 m。

1.1 地质勘探概况

本工程场地地质剖面图如图 1 所示。其中, ⑦粉质黏土、⑧₁粉质黏土均为不透水层, 可视为潜水含水层与其下承压含水层的相对隔水层。因⑪₁粉质黏土层较薄且不连续, 本场地可将⑧₂黏质粉土层、⑨₂粉砂、⑩₂粉砂与⑪₂粉砂视为第一承压含水层, 承压层水头大沽标高为-4.5 m, 即埋深 7.0 m。由图 1 可见, 此场地第一承压含水层顶板埋深 22.8 m, 含水层深度较厚, 底板埋深达 47.5 m。

1.2 基坑及围护结构

该基坑底板位于⑦粉质黏土持力层, 埋深 17 m。车站地下连续墙墙趾埋深 32 m, 位于⑨₂ 层中, 如图 1 所示。该地区承压含水层深且厚, 地下连续墙未能完全隔断承压含水层, 基坑降水引发基坑外地表及周围建筑沉降风险较高。

2 降水及回灌方案

在前期预降水试验过程中，悬挂式止水帷幕一定程度阻隔基坑内外水力联系，但需在基坑外合理布设回灌井，对地表沉降进行控制，保护周围建筑安全。

因此在该基坑降水期间，采用悬挂式止水帷幕与回灌保护相结合的方案。

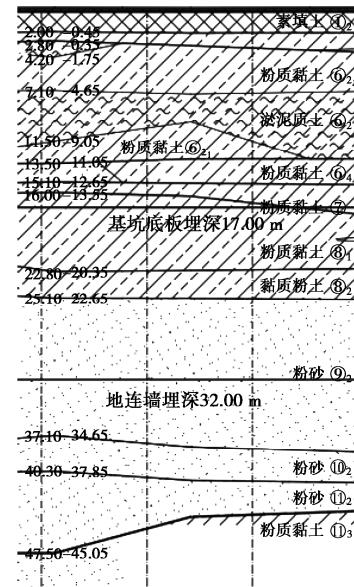


图 1 场地典型地质剖面图

Fin

2.1 降水方案
本基坑工程中,疏干井在主体基坑开挖前 21 d 开启。主体基坑疏干井数量布设 39 口。降水井深度设置在基坑底板以下 6 m 左右。

在基坑底板以下6m左右。基坑开挖过程中,对于第一承压含水层有突涌风险,结合基坑形状及含水层分布特征,主体基坑布设降压井18口,其中各用降压井2口。

降压片 16 号,

本基坑的止水帷幕未完全隔断第一承压含水层,所以基坑降水期间引起的含水层水位变化将对周边环境产生影响。故需在基坑外侧靠近南、北侧住宅处设置回灌井,回灌层主要为第一承压含水层,减少由本基坑降水引发的周边沉降。

坑外沿基坑南、北两侧住宅小区处按间距 15 m 设回灌井, 设回灌井 H1 至 H32, 备用回灌井 H1-1 至 H1-8, 井深 32 m。布设潜水观测井 G1-G14 及承压水观测井 G1-1 至 G1-14 共 28 口。具体井点平面布置如图 2 所示。试验期间, 各回灌井及降压井开启工况如表 1 所示。

3 回灌引起承压层水位抬升及控沉效果分析

为方便叙述, 定义基坑止水帷幕至基坑南北两侧的回灌井(H1~H32)间的土体范围内的区域(如G1~G14、G1-1~G1-14井及周边地表)称为基坑邻近区, 而以南北两侧回灌井为界, 距基坑更远的一侧的土体范围内的区域(如HG1-1~HG1-14及周边地表)称为回灌区。

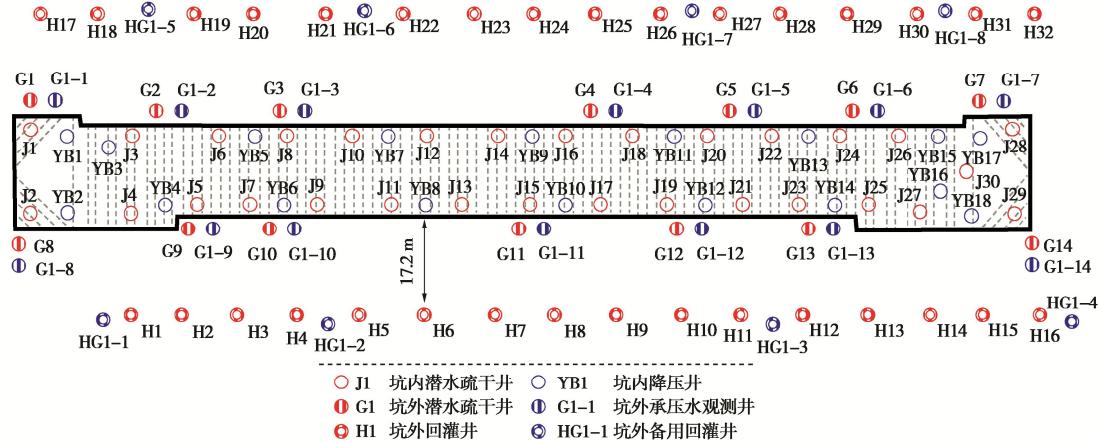


图 2 井点平面布置图

Fig. 2 Layout of wells

表 1 现场试验工况

Table 1 Test conditions of site

日期	现场工况	回灌井 /口	回灌量 /(m ³ ·d ⁻¹)	降水井 /口
10.9—10.10	工况 A	—	—	6
10.11—10.13	工况 B	17	83	6
10.14—10.16	工况 C	17	380	6
10.17—10.20	工况 D	22	490	12
10.21—10.25	工况 E	29	630	12
10.26—11.10	工况 F	29	800	12

3.1 基坑邻近区地表沉降分析

地表沉降监测点 DBC-01 至 DBC-30 绕基坑周围布置, 每组沿地连墙由近至远分别编号 DBC-X-01 至 DBC-X-06, 其中 DBC-X-01~DBC-X-04 间距为 4 m, DBC-X-04~DBC-X-06 间距为 8 m。

选取南侧基坑邻近区的 DBC-24/27/30-02 监测点数据, 将基坑邻近区的地表沉降和水位变化作对比, 如图 3 所示。

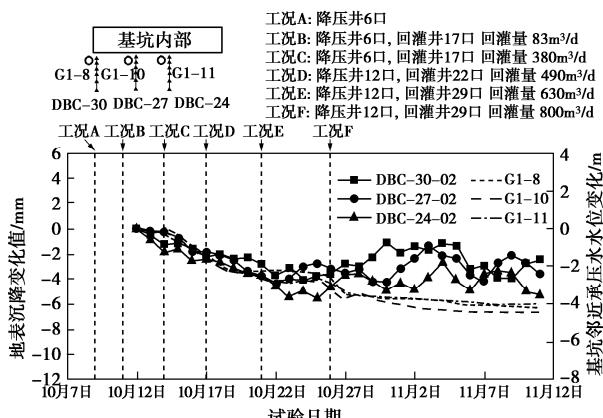


图 3 基坑邻近区地表沉降与承压水水位变化对比曲线

Fig. 3 Contrast curves of change of surface settlement and confined water level at edge of excavation area

由图可知, 在工况 E 前, 基坑邻近区的沉降值受基坑降水影响较大, 这是因为基坑邻近区与回灌区距离远达 12 m, 回灌引起的水位抬升有时间延迟效应。在回灌量较小时, 回灌水位抬升效果远小于基坑降水

引起的水位下降, 基坑邻近区沉降值逐渐发展。基坑侧边缘沉降累积值约为 2 mm, 而位于基坑中部附近的 DBC-24-02 和 DBC-27-02 的沉降累积值可达 3.5 mm。

工况 E 下, 水位稳步保持, 略有下降, 沉降值虽在此回灌过程中有先降后升的起伏变化, 但在 27 日时, 沉降累积值基本没有变化。工况 F 后, 回灌量达到 800 m³/d, 水位基本稳定不变, 沉降值有先降后升的反复变化趋势, 但最终也达到稳定。即刚开启回灌时, 水位尚未稳定时, 沉降发展呈现反复波动, 待水位稳定后沉降也随之稳定。

3.2 回灌区地表沉降分析

将回灌区的地表沉降和水位变化作对比, 如图 4 所示。由图可知, 回灌区承压层水位从回灌开始后持续上升, 开始阶段上升速度较快, 之后上升态势较为平缓。因此沉降在工况 C 前发展较为缓慢, 沉降值在 1~2 mm。工况 C 下, 回灌量增大后, 沉降发展迅速停止, 并有恢复的趋势。10月 17 日—27 日, 降水量增加, 回灌量虽也增加, 但由于沉降发展有延迟, 受水位变化影响, 因此沉降继续发展, 达到 3.7~5 mm, 一段时间后沉降曲线有开始恢复趋势。工况 F 后, 回灌量达到 800 m³/d 时, 沉降曲线上升变化明显, 使得沉降恢复到 2 mm 以内, 局部区域更小, 相比与基坑邻近区, 回灌区沉降反弹更为明显, 说明此时回灌井对于回灌保护区有良好的保护效果。

3.3 基坑周围建筑沉降分析

基坑周围存在大量建筑物, 与地连墙中心直线距离达 35 m。现场于每个建筑四周分别布置 4~6 个建筑沉降监测点, 基坑降水期间对建筑沉降进行观测, 选取基坑南侧的建筑沉降监测数据进行分析, 绘制建筑沉降随时间变化曲线如图 5 所示。

现场基坑从 9 月 12 日开始从两侧至中间开挖, 11 月 18 日全部开挖完毕。10 月 30 日前, 两侧端头井开挖完毕, 期间对周围建筑沉降变化进行监测。由图 5 可知, 当降水与回灌同步开启后, 建筑沉降变化趋于

稳定，并未出现不均匀沉降或大幅沉降，说明回灌保护效果良好。降水方案设计中，尤其是有风险的降水工程应该设置回灌井，并实时观测，当发现有沉降风险时及时启用回灌并控制回灌量。

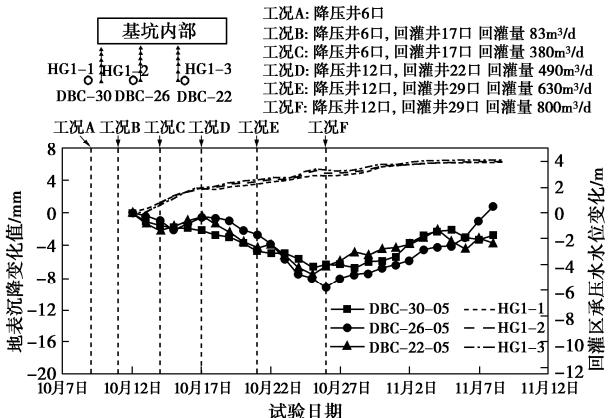


图4 回灌区地表沉降与承压水水位变化对比曲线

Fig. 4 Contrast curves of change of surface settlement and confined water level in recharge area

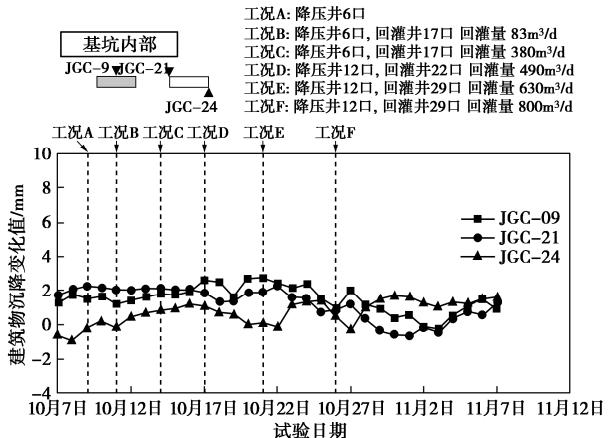


图5 建筑沉降变化时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of change of building settlement

4 结 论

本文通过开展现场降水与回灌试验，证实了在深厚承压含水层条件下回灌的应用效果。为天津地区回灌保护可行性加以佐证，通过对基坑邻近区和回灌区水位发展和沉降变化进行分析，得出如下结论：

(1) 基坑邻近区承压层水位变化受坑内降水影响较大，由回灌引起的水位抬升效果有延迟效应，若距离较远或回灌量小，回灌效果不明显。在降水开始后，降水初期(3~5 d)阶段，基坑邻近区的地表沉降与水位变化趋势基本一致。回灌全面开启后，地表沉降发展逐渐趋于稳定。

(2) 回灌期间，回灌区附近水位抬升较快，与回灌量直接相关。地表沉降在回灌全面开启后有所恢复，存在一定延迟现象，相比于基坑邻近区，回灌区的沉降控制效果更好。在实际工程中，若想控制某点或某

建筑沉降，可在其与降水基坑之间，靠近需保护建筑附近打设回灌井，以达到沉降控制效果。

(3) 在基坑开挖过程中保证持续回灌，定期监测承压含水层及地表沉降的变化，若出现异常应逐渐增加回灌量，避免水位骤升骤降引起地表沉降变化甚至建筑不均匀沉降。

(4) 在悬挂式止水帷幕基坑现场进行了回灌保护，承压层水位及沉降均得到了较好控制，验证了回灌保护的可行性。在悬挂式止水帷幕中，可以通过回灌保护的方式控制基坑安全。

参 考 文 献：

- [1] 段永侯. 中国地面沉降研究现状与 21 世纪可持续发展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 3~7. (DUAN Yong-hou. Research status on land subsidence and sustainable development in the 21st century of China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(2): 3~7. (in Chinese))
- [2] GAMBOLATI G, TEATINI P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection[J]. Water Resources Research, 2015, 51(6): 3922~3955.
- [3] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程地下水回灌系统的设计与应用技术研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5): 70~74. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Study on the design and the application of the groundwater recharge system in excavation[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(5): 70~74. (in Chinese))
- [4] 郑刚, 曾超峰, 薛秀丽. 承压含水层局部降压引起土体沉降机理及参数分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 802~817. (ZHENG Gang, ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li. Settlement mechanism of soils induced by local pressure-relief of confined aquifer and parameter analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 802~817. (in Chinese))
- [5] 曾超峰, 薛秀丽, 罗鹏. 基坑工程地下水回灌对土层变形的影响[J]. 工程建设, 2017, 49(11): 1~5. (ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li, LUO Peng. Influence of artificial recharge on ground deformation in excavation engineering[J]. Engineering Construction, 2017, 49(11): 1~5. (in Chinese))
- [6] 金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等. 基坑降水引起周围土体沉降性状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575~1581. (JIN Xiao-rong, YU Jian-lin, ZHU Shao-chen, et al. Analysis of behaviors of settlement of pit's surrounding soils by dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1575~1581. (in Chinese))