

沿海复杂地层深基坑地下水控制引发的 地表沉降规律分析

阮艳妹, 徐文田, 李牧羽

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 针对沿海深厚富水复杂地层开展了基坑降水回灌试验, 分析了基坑降水回灌过程中地下水位、地表沉降和邻近建筑物沉降等基本规律。结果表明: 深厚富水复杂地层降水会导致基坑周边地下水位迅速下降, 同时将引起剧烈的地表沉降, 当回灌量与抽水量逼近平衡时, 地表沉降趋于稳定。基坑降水回灌过程中, 地表沉降变化时程曲线会出现明显的转折点, 回灌开始后地表沉降值仅有小幅度的抬升, 但先期沉降基本无法恢复。回灌开启时间与地表最终沉降量呈现明显的相关性, 但对地下稳定水位影响不显著, 同抽同灌工艺对地表沉降控制的优势明显, 好于先抽后灌及先灌后抽工艺。研究成果可以为类似工程的降水设计与环境控制提供数据支持。

关键词: 降水回灌试验; 地下水位; 地表沉降; 建筑物沉降; 回灌开启时间

中图分类号: TU 463

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0712-08

Analysis of surface subsidence law caused by groundwater control of deep foundation pit in coastal complex strata

RUAN Yanmei, XU Wentian, LI Muyu

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: The foundation pit dewatering and recharge test is carried out for the deep and complex water-rich strata in the coastal area, and the basic laws of groundwater level, surface subsidence and adjacent building subsidence during the foundation pit dewatering and recharge process are analyzed. The results show that the dewatering of deep water-rich complex strata will lead to the rapid decline of groundwater level around the foundation pit, and at the same time, it will cause severe surface subsidence. When the recharge and pumping amount approach the balance, the surface subsidence tends to be stable. In the process of dewatering and recharging of foundation pit, there will be an obvious turning point in the time-history curve of surface settlement. After recharging, the surface settlement only rises slightly, but the early settlement can't be recovered basically. The starting time of recharge is obviously related to the final settlement of the surface, but it has no significant effect on the stable groundwater level. The technology of simultaneous pumping and irrigation has obvious advantages in controlling the surface settlement, which is better than the first pumping and then irrigation or first irrigation and then pumping technology. The research results can provide data support for precipitation design and environmental control of similar projects.

Key words: precipitation recharge test; water table; surface subsidence; building settlement; recharge start time

在城市繁华地区开展基坑工程时往往会遇到作业条件受限、周边建筑物密集等问题, 基坑降水回灌技术的应用为其安全施工带来了极大的便利, 而基坑降水会在基坑附近形成降水漏斗, 改变土体孔隙水压力及土体结构, 引起基坑周边土体的不均匀沉降, 对邻近建筑物的安全带来极大

威胁。因此, 针对基坑开挖降水回灌过程中的土体水力联系、地下水位变化、土体沉降与隆起等问题开展研究具有重要意义。

对于基坑开挖降水回灌问题, 国内外学者进行了大量研究^[1-6]。郑刚等^[7]依托天津某基坑工程进行降水回灌试验, 研究发现在粉土和粉砂中采

用回灌措施效果显著。刘祥勇等^[8]在南通富水砂性地层开展了一系列单井和群井抽灌现场试验, 试验表明回灌过程中地层沉降呈现一定的“塑性”特性, 在敏感建筑物区应尽量做到抽灌一体化来减小附加变形。金小荣等^[9]利用有限元软件对基坑降水工程进行数值模拟, 探索基坑降水开挖过程中各参数的敏感性和土体沉降规律。李罡^[10]针对济南轨道交通基坑工程, 从回灌技术的实施要点、施工难题及处置措施角度阐述了新型降水回灌装置在实际工程中的应用。瞿成松等^[11]依托上海盛大国际金融中心基坑工程, 针对基坑交接处三条地铁线路运营对周边环境的较高要求, 利用数值模拟方法分析降水回灌技术控制降水的影响效果, 并将其成功应用于实际工程中。

以上研究多是针对软土、黏土、砂性土等土层, 而对于深厚富水复合地层中基坑降水的相关研究较少。本文针对沿海深厚富水复杂地层开展了基坑开挖降水回灌试验, 分析先抽后灌、先灌后抽及同抽同灌等不同技术措施下的地下水位、地表沉降和邻近建筑物沉降的变化规律, 基于试

验现场监测数据, 结合沿海地区现行设计规范与技术规程, 验证基坑降水回灌技术在沿海复杂地层中的适用性及合理性, 研究成果可为类似工程的降水设计与环境控制提供数据支持。

1 试验方案

1.1 试验场区概况

广州市某轨道交通车站位于 107 国道(广深公路)下, 车站为地下两层岛式站台车站, 车站含折返线总长 653.6 m, 标准段宽 19.7 m, 有效站台宽 11.0 m。明挖基坑围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙及竖向 3 道内支撑, 基坑深度约 16.0~18.6 m。地连墙底伸入中、微风化地层。车站采用明挖法, 局部盖挖法施工。

考虑基坑周围交通疏解、管线改迁及施工进度影响, 在基坑中部增设 2 道分隔墙, 将基坑划分为 A 区、B 区、C 区三个工区, 即在每个工区内独立降水, 以便进行中部基坑的土方开挖及主体结构等施工, 本次试验车站基坑平面图及典型地质剖面图如图 1 所示。

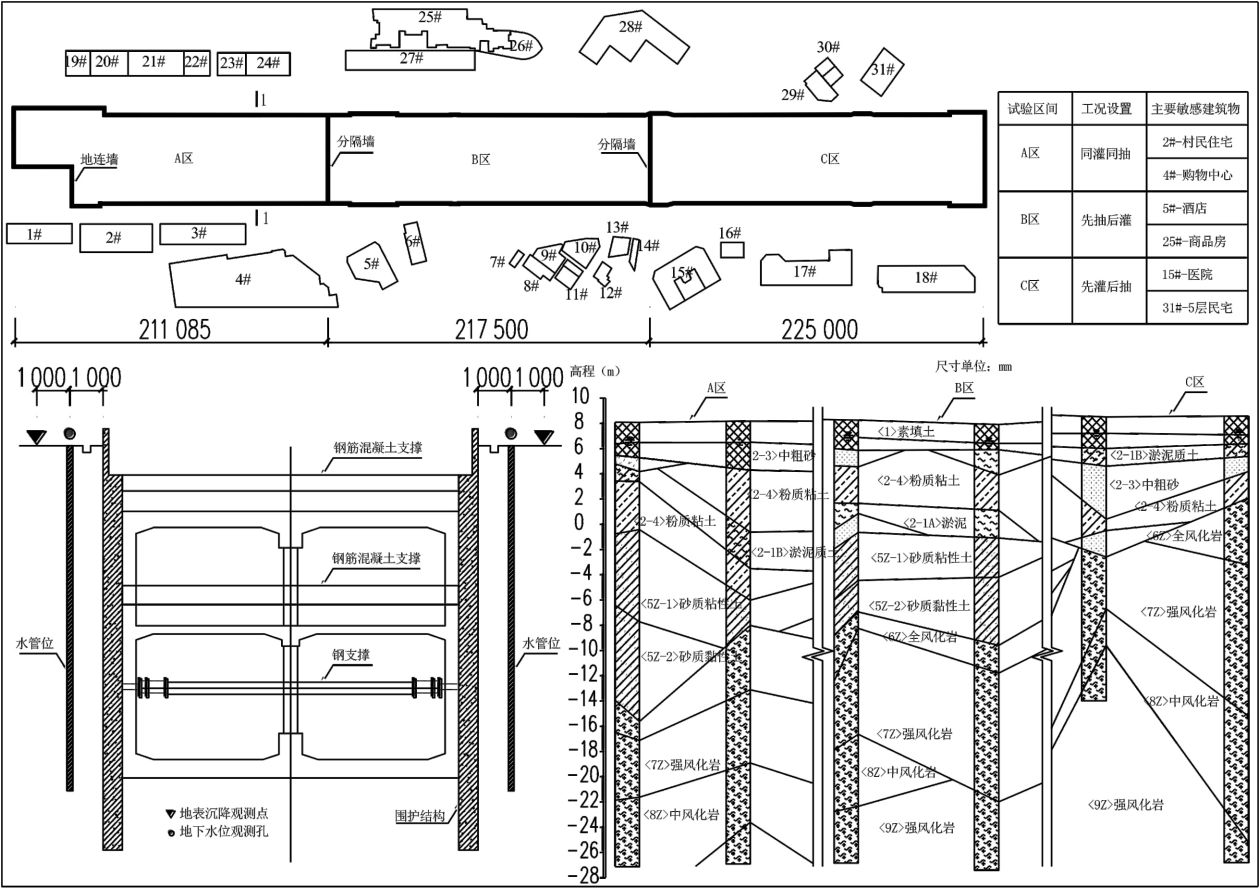


图 1 基坑平面图及典型地质剖面图

Fig. 1 Plan of foundation pit and typical geological profile

1.2 水文地质条件

试验场区地貌上主要属于剥蚀残丘地貌。揭露第四系地层为人工填土层,海陆交互相沉积层及残积层,基岩为震旦系混合花岗岩,本次试验场区土层分布及物理力学参数如表 1 所示。沿线地下水稳定水位埋深 1.20~12.60 m,标高 5.44~15.17 m。地下水位的变化受地形地貌和地下水补给来源等因素控制。

试验场区地下水主要有松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两种基本类型。松散岩类孔隙水主要赋存于海陆交互相砂层<1>、<2-3>中。砂层被淤泥、淤泥质土及粉质黏土层覆盖,地下水具微承压性。块状基岩裂隙水主要含水层为基岩层的强风化带和中风化带中,岩性主要有混合花岗岩、花岗岩等。

1.3 试验目的

本文通过基坑降水回灌过程中抽水量、回灌量、水位变化、回灌开启时间等参数的分析,结合现场监测得到的地面沉降、深层土体沉降结果,为类似基坑降水回灌工程提供理论指导和实践经验。本次现场试验的目的为:(1)分析基坑降水回灌试验过程中抽水量、回灌量、地下水位间的变化规律,明确回灌措施对地下水位的控制效果;(2)根据地下水位、地表沉降、建筑物沉降等监测数据,绘制基坑降水回灌过程中地表土体沉降及建筑物沉降时程曲线,揭示基坑降水回灌引起的地表和邻近建筑物沉降规律;(3)对比先抽后灌、同灌同抽、先灌后抽三种方案下地下水位、地表沉降、深层土体沉降等监测数据,分析回灌开启时间对地层沉降的影响,为实际工程应用提供理论依据。

表 1 土层分布及物理力学参数

Tab. 1 Soil layer distribution and physical and mechanical parameters

| 层号 | 土层名称 | 含水层类型 | 层底深度/m | 天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 天然含水量 $w/\%$ | 天然孔隙比 e | 渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ |
|--------|-------|-------|------------|--|-----------------|-----------|--|
| <1> | 素填土 | 潜水层 | 0.70~7.60 | -- | 37.00 | 1.08 | -- |
| <2-1A> | 淤泥 | 微透水层 | 3.40~14.00 | 1.68 | 53.06 | 1.52 | <0.001 |
| <2-1B> | 淤泥质土 | 微透水层 | 2.60~12.40 | 1.72 | 47.80 | 1.37 | <0.001 |
| <2-3> | 中粗砂 | 中透水层 | 3.10~15.80 | 2.01 | 19.48 | 0.71 | 1.50 |
| <2-4> | 粉质黏土 | 微透水层 | 4.40~14.20 | 1.91 | 29.13 | 0.84 | <0.001 |
| <5Z-1> | 砂质黏性土 | 弱透水层 | 6.20~26.50 | 1.89 | 26.53 | 0.84 | 0.10 |
| <5Z-2> | 砂质黏性土 | 弱透水层 | 5.20~28.70 | 1.90 | 22.02 | 0.69 | 0.10 |
| <6Z> | 全风化岩 | 中透水层 | 5.40~32.00 | 1.92 | 30.10 | 0.83 | 0.90 |
| <7Z> | 强风化岩 | 中透水层 | 3.50~37.20 | 2.00 | 20.00 | -- | 1.50 |
| <8Z> | 中风化岩 | 中透水层 | 2.20~38.10 | 2.60 * | -- | -- | 1.50 |

2 现场试验方案

2.1 回灌井设置

对基坑内实施降水试验会引起基坑外地层水位显著下降,因此需采用回灌对基坑周围水层进行补偿。根据回灌井作用原理可知,回灌井的钻孔深度需进入渗透性较好的土层,全风化混合花岗岩<6Z>具有很好的渗透性,结合基坑回灌成本拟定现场试验的回灌深度为到达全风化混合花岗岩<6Z>。本试验拟设 48 个降水井、46 个回灌井,降水井沿基坑内部两侧均匀布置,编号为 J01~J48;回灌井沿基坑两侧建筑物相对密集区域布置,水平间距 20 m,距基坑边 1.5 m 布置,编号分别为 N01~N22、S01~S24。基坑中部加入两道

分隔墙后划分为三个试验区,其中 A 区布设 12 个回灌井,B 区布设 22 个回灌井,C 区布设 12 个回灌井。回灌井设计钻孔孔径 350 mm,主管孔径 200 mm,副管孔径 50 mm,顶部 4 m 采用砂浆孔,回灌压力 0.2 MPa。现场回灌量控制系统如图 2 所示,基坑内降水井及回灌井平面布置图如图 3(a)所示。

2.2 工况设置

为了对地铁车站基坑内外、各土层间的水力联系以及回灌开启时间对基坑周边土层沉降的影响进行研究,本次现场试验共设置 3 组试验,分别为先抽后灌、同灌同抽、先灌后抽,具体的试验工况如表 2 所示。

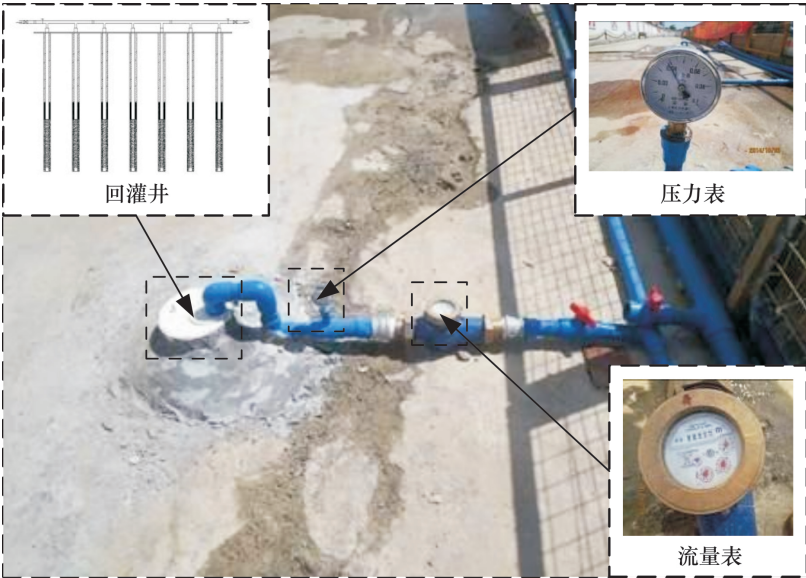


图 2 施工现场回灌量控制系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reinjection control system in construction site

表 2 降水回灌试验工况设置表

Tab. 2 Setting table of precipitation recharge test conditions

| 序号 | 试验工况 | 试验场区 | 抽水时间/d | 回灌时间/d | 拟抽水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 拟回灌量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) |
|----|------|------|--------|--------|---|---|
| 1 | 同灌同抽 | A 区 | 0 | 0 | 120 | 110 |
| 2 | 先抽后灌 | B 区 | 0 | 30 | 135 | 120 |
| 3 | 先灌后抽 | C 区 | 30 | 0 | 110 | 105 |

2.3 监测点布置

基坑降水回灌过程中地下水位变化情况至关重要, 因此本次试验共布设 24 个地下水位监测点, 监测编号为 H01~H24, 基坑各工区地下水位监测点平面布置示意图如图 3 所示. 为了掌握基坑降水

回灌过程中基坑周围环境的位移、变形规律, 结合试验场区条件在基坑周围共布设 26 个地面沉降监测点, 监测编号为 A01~A26, 每间隔 30 m 布设一个监测断面, 基坑各工区地面沉降监测点平面布置示意图如图 3(b)所示.

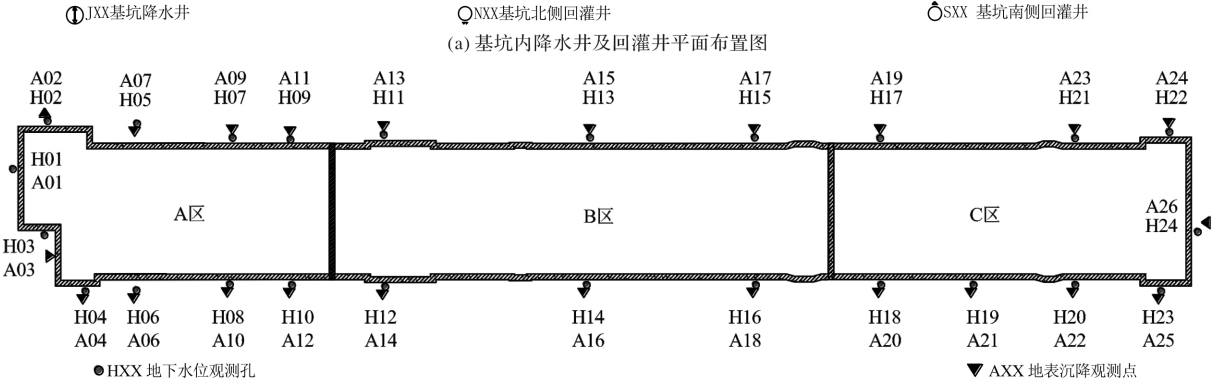
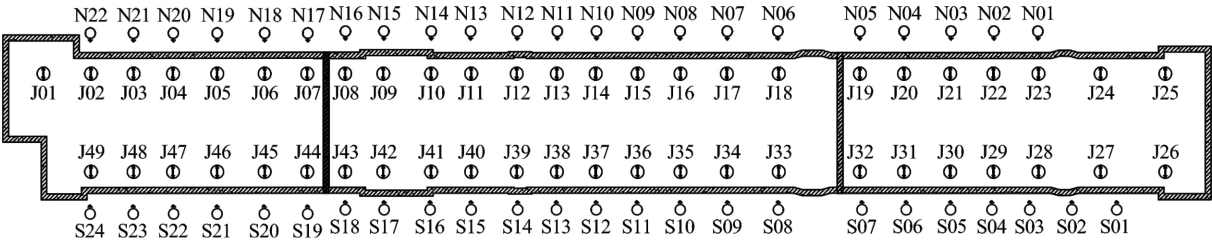


图 3 基坑井点及监测点平面布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layout of foundation pit and monitoring points

城市繁华地区基坑工程周边往往存在大量建筑物,考虑到基坑降水可能引起的土体扰动问题,需对基坑周边建筑物的沉降变形情况进行实时监测,以便充分掌握基坑降水回灌施工过程中建筑物地基变形特性。本次试验选取周边31个敏感建筑物,在其四个角离地面150 mm处分别布置沉降、倾斜监测点。

3 降水回灌试验结果分析

3.1 地下水位影响分析

基坑中部试验区采用先抽水后回灌的方式,选取基坑周围4个典型测点的监测数据绘制地下水位变化时程曲线如图4所示。

由图4可以看出,基坑降水试验开始后,由于地层应力释放及地下水渗流,导致基坑周边地下水位开始逐渐下降,水位下降值超过1.5 m,地下水位迅速下降可能引起地表沉降加剧,对周边构筑物的安全产生影响,故深厚富水地层基坑围护结构宜进入稳定不透水层或岩层;回灌系统开启后,地下水得到补充而逐渐回升,经过一段时间后恢复到了原始地下水位;继续进行降水回灌试验,地下水位出现不同程度的抬升,但抬升幅度不超过1.0 m;当回灌量与抽水量逼近平衡时,基坑周边地下水位趋于稳定状态,基坑内部降水施工对基坑周边建筑物的影响也相对较小。

通过地下水位变化时程曲线可知,采取基坑降水及回灌技术以后,基坑降水引起的地下水位累计沉降的平均值为1.6 m,接近并小于一级基坑水位累计沉降预警值2.0 m,说明了基坑降水回灌技术在广州地区的适用性及合理性。

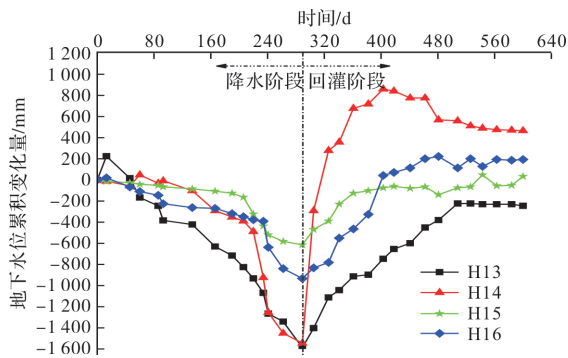


图4 地下水位变化时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of groundwater level change

3.2 地表沉降影响分析

基坑降水回灌引起基坑内外地下水位的变化,进而对周围土体产生扰动,为了分析基坑降水回灌过程中地表土体沉降规律,选取基坑中部试验区6个典型监测点的监测数据,绘制地表累积沉降

变化时程曲线如图5所示。

由图5可以看出,基坑降水回灌试验过程中,地表沉降变化时程曲线出现明显的转折点,最大累积沉降值为-21.60 mm;在回灌系统开启后,地表沉降值仅有小幅度的抬升,整个试验过程地表沉降出现较大的塑性变形量;当回灌量与抽水量相对稳定后,地表沉降呈现稳步下降趋势。

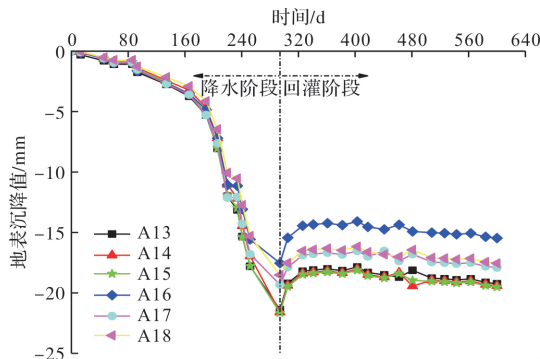


图5 地表累积沉降变化时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of cumulative surface subsidence change

3.3 周边建筑物沉降影响分析

为了分析基坑降水回灌对周边建筑物沉降的影响程度,在基坑周边建筑物角部布置沉降监测点,选取基坑B区南侧两个典型建筑物上的6个沉降监测点为研究对象,绘制建筑累积沉降及建筑沉降速率变化时程曲线如图6所示。

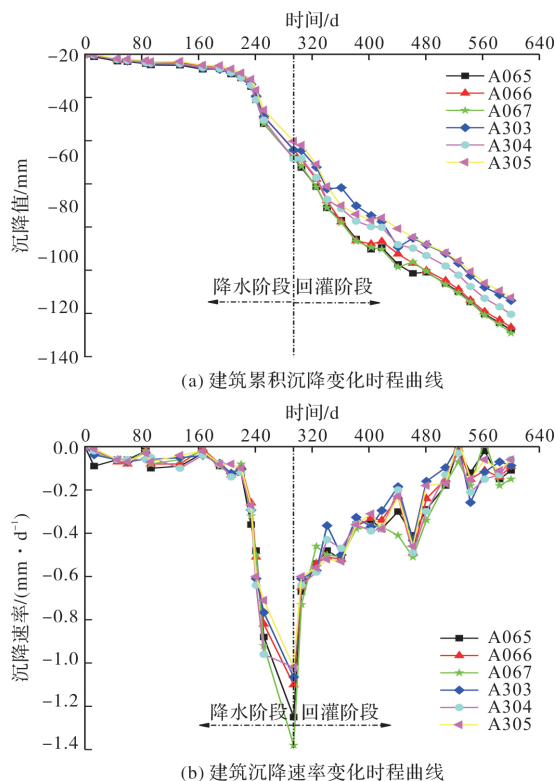


图6 建筑累积沉降及建筑沉降速率变化时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of building cumulative settlement and building settlement rate change

由图6可知,基坑开挖初期周边建筑物受到扰动,基坑周边建筑物出现小幅沉降,但沉降的速率较为平稳;当基坑内抽水系统开启后,基坑周边建筑物发生大幅度沉降,沉降速率达到 $-0.91\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,较大的沉降量对建筑物结构安全十分不利。当基坑外回灌系统开启后,地下水位逐渐上升,基坑周边建筑物的沉降速率逐渐下降到 $-0.40\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,基坑底部封底后,沉降速率逐渐稳定在 $-0.20\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,但前期降水阶段产生的沉降并不能恢复。

综上所述,基坑降水开挖过程中,运用回灌系统对周边地下水进行补充,可以有效减缓周边建筑物的沉降速率,同时对敏感建筑物周边的基坑工程应谨慎选择降水措施。

4 回灌开启时间对周围环境的影响

通过基坑中部工区的降水回灌试验可知,对于降水引起的土体沉降,回灌并不能将已经发生的塑性沉降恢复,仅能减慢基坑降水过程中土体沉降速率。因此,本次试验设置了先抽后灌、同抽同灌、先灌后抽等三种工况,进一步分析回灌系统开启时间对地下水位及地表沉降的影响规律,为类似工程施工中优化基坑降水施工策略提供理论支撑。

4.1 回灌时间对地下水位影响分析

为了揭示回灌开启时间对地下水位的影响规律,分别选取基坑A区、B区、C区的三个典型监测点的监测数据,绘制不同回灌时间下地下水位变化时程曲线如图7所示。

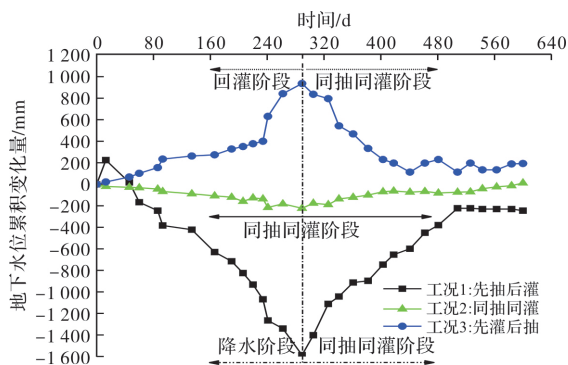


图7 不同回灌时间下地下水位变化时程曲线

Fig. 7 Time-history curve of groundwater level change under different recharge time

根据图7可知,采用先抽后灌方案时基坑周边地下水位发生显著下降,而后逐渐回升,直至稳定在原始地下水位附近;采用先灌后抽方案时基坑周边地下水位发生显著抬升,而后逐渐回落,直至稳定在原始地下水位附近。因此不同回灌开启时间下仅在有限时间内对地下水位有所影响,降水回灌系统运行稳定后,地下水位受回灌开启时间的影响较小。

4.2 回灌时间对地表沉降影响分析

选取基坑A区、B区、C区的三个典型监测点数据,绘制地表累积沉降变化时程曲线如图8所示。采用先抽后灌方案时,基坑周围地表发生显著下降,回灌开启后地表沉降发生小幅度抬升,但无法对已经造成的塑性沉降产生影响;采用先灌后抽方案时,基坑周边地表发生明显隆起,随着抽水系统开启地表隆起量逐渐下降;对比基坑降水回灌稳定后的地表沉降值可知,地表沉降量与回灌开启时间关系密切,同抽同灌条件下的地表沉降值最小。

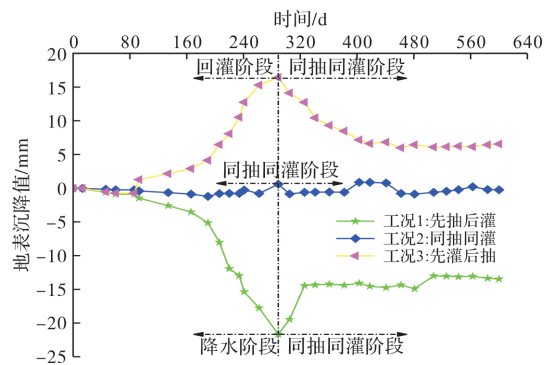


图8 不同回灌时间下地表累积沉降变化时程曲线

Fig. 8 Time-history curve of surface cumulative settlement under different recharge time

5 结论

针对沿海深厚富水复杂地层开展了基坑降水回灌试验,分析了基坑降水回灌过程中地下水位、地表沉降和邻近建筑物沉降等基本规律,从而证明基坑降水回灌技术在广州地区的适用性及合理性,主要得到以下结论:

(1)深厚富水复杂地层开挖降水会引起地层应力释放及地下水渗流,进而导致基坑周边地下水位下降及地表沉降,故深厚富水地层基坑围护结

构宜进入稳定不透水层或者岩层;回灌系统开启后,地下水得到补充而逐渐回升,基坑降水引起的地下水位累计沉降的平均值为1.6 m,接近并小于一级基坑水位累计沉降预警值2.0 m,说明了基坑降水回灌技术在广州地区的适用性及合理性;

(2)基坑降水回灌试验过程中,当基坑内抽水系统开启后,基坑周边建筑物发生大幅度沉降,当基坑外回灌系统开启后,基坑周边建筑物的沉降速率逐渐下降且逐渐稳定,但前期降水阶段产生的沉降不能恢复,故邻近敏感建筑物的基坑工程应谨慎选择降水措施;

(3)对比分析先抽后灌、同抽同灌、先灌后抽等三种工况下地下水位及地表沉降情况,回灌开启时间与地表最终沉降量呈明显的相关性,其中同抽同灌技术在深厚富水复杂地层基坑开挖降水工程中的安全控制优势更为显著。

参考文献 References

- [1] ZHANG Y Q, LI M G, WANG J H, et al. Field tests of pumping-recharge technology for deep confined aquifers and its application to a deep excavation [J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 249-259.
- [2] 周勇, 王晓莉, 朱彦鹏, 等. 兰州地铁湿陷性黄土深基坑在降低水位条件下的渗流稳定性分析 [J]. *中国铁道科学*, 2017, 38(1): 86-94.
ZHOU Yong, WANG Xiaoli, ZHU Yanpeng, et al. Seepage stability analysis of deep foundation pit of lanzhou metr under the condition of water level reduction in collapsible loess [J]. *CHINA RAILWAY SCIENCE*, 2017, 38(1): 86-94.
- [3] ZHENG G, ZENG C F, DIAO Y, et al. Test and numerical research on wall deflections induced by pre-excavation dewatering [J]. *Computers & Geotechnics*, 2014, 62(oct.): 244-256.
- [4] 杨潇. 多基坑深层承压水降水引起地表沉降规律研究 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 47(1): 66-70.
YANG Xiao. Study on the law of formations settlement induced by dewatering in deep confined aquifer in multiple excavations [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2015, 47(1): 66-70.
- [5] SHEN S L. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(9): 1378-1392.
- [6] 张扬清, 冉岸绿, 武朝军, 等. 降压回灌作用下黏土的渗透特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015 (S1): 21-25.
ZHANG Yangqing, RAN Anlü, WU Chaojun, et al. Experimental study on permeability properties of soft clay in process of pumping and recharge [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015 (S1): 21-25.
- [7] 郑刚, 曹剑然, 程雪松, 等. 天津第二粉土粉砂微承压含水层回灌试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(4): 592-601.
ZHENG Gang, CAO Jianran, CHENG Xuesong, et al. Experimental study on artificial recharge of second Tianjin silt and silty sand micro-confined aquifer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(4): 592-601.
- [8] 刘祥勇, 宋享桦, 谭勇, 等. 南通富水砂性地层地铁深基坑抽水回灌现场试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(7): 1331-1340.
LIU Xiangyong, SONG Xianghua, TAN Yong, et al. Field tests on groundwater recharge of deep excavations in Nantong water-rich sandy stratum [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(7): 1331-1340.
- [9] 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(10): 54-60.
JIN Xiaorong, YU Jianlin, ZHU Shaochen, et al. Analysis of behaviors of settlement of pit's surrounding soils by dewatering [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005(10): 54-60.
- [10] 李罡. 基坑降水回灌技术在济南地铁中的应用 [J]. *施工技术*, 2018, 47(1): 79-83.
LI Gang. Application of foundation excavation dewatering and recharge technique in Jinan subway [J]. *Construction Technology*, 2018, 47(1): 79-83.
- [11] 瞿成松, 徐丹. 地下水回灌在地铁深基坑降水中的应用 [J]. *岩土工程技术*, 2012, 26(5): 4.
QU Chengsong, XU Dan. Groundwater recharge of pit dewatering close to the metro [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2012, 26(5): 4.
- [12] WU Y X, LYU H M, SHEN J S, et al. Geological

- and hydrogeological environment in Tianjin with potential geohazards and groundwater control during excavation [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(10): 392.
- [13] SHEN S L, TANG C P, BAI Y, et al. Analysis of settlement due to withdrawal of groundwater around an unexcavated foundation pit; Geo Shanghai International Conference 2006[C], 2015.
- [14] LEUNG E, NG C. Wall and Ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(2):129-143.
- [15] 梅源,袁一力,胡长明,等. 西安地铁深基坑变形模式统计规律分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 48(3): 371-375.
- MEI Yuan, YUAN Yili, HU Changming, et al. Statistical analysis of the construction deformation model of the deep foundation pit in Xi'an Metro Station [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2016, 48(3): 371-375.
- [16] SHEN S L, WU Y X, XU Y S, et al. Evaluation of hydraulic parameters from pumping tests in multi-aquifers with vertical leakage in Tianjin [J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 2015:196-207.
- [17] 王国富,王倩,路林海,等. 济南轨道交通某深基坑降水与回灌数值分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(5): 1280-1288.
- WANG Guofu, WANG Qian, LU Linhai, et al. Numerical analysis on dewatering and recharging of a deep foundation pit of in an railway[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(5): 1280-1288.
- [18] URBAN L V, CLABORN B J. Ogallala recharge with stormwater collected in playa lakes; Artificial recharge of ground water[C], 2015.
- [19] TUGEL F, HOUBEN G J, GRAF T. How appropriate is the Thiem equation for describing groundwater flow to actual wells? [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(8):2093-2101.
- [20] 伍毅敏,吕康成,郑颖人. 深基坑周边位移实时监测系统的研发[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 194-198.
- WU Yimin, LÜ Kangcheng, ZHENG Yingren. Development of the monitoring system for instant displacement surrounding deep foundation pits[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2006(2): 194-198.
- [21] 陆建生,潘伟强. 上海某枢纽基坑工程浅层承压水回灌试验分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(4): 9.
- LU Jiansheng, PAN Weiqiang. Test and analysis of artificial recharge to the shallow confined aquifer of deep foundation pit in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(4): 9.
- [22] 许健,杨少飞,吴海洋,等. 黄土地区深大基坑桩锚支护结构监测与数值分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(4): 517-524.
- XU Jian, YANG Shaofei, WU Haiyang, et al. Monitoring and numerical analysis of pile-anchor supporting structure for deep and large foundation pit in loess area [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2019, 51(4): 517-524.
- [23] 党发宁,王海洋,高仓,等. 超期服役粉细砂基坑变形时效性研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2023,55(1):41-51.
- DANG Faning, WANG Haiyang, GAO Cang, et al. Study on deformation timeliness of excessive service siltfine sand foundation pit [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2023, 55(1): 41-51.

(编辑 桂智刚)