

承压富水地层地铁车站基坑降水与回灌施工 渗流稳定性及地面变形研究^{*}

卢福聪^{1,2,3} 索 潇^{1,4**} 吴 波^{1,2,3} 陈立平¹ 卞士海⁵ 农忠建¹ 许九保¹

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 530004, 南宁; 2. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 530004, 南宁;

3. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 530004, 南宁; 4. 广西交科集团有限公司, 530007, 南宁;

5. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 315211, 宁波//第一作者, 讲师)

摘 要 结合实时监测数据, 分析济南某富水承压基坑周边地面沉降以及地下水渗流等主要影响因素。采用有限元数值分析方法建立车站端头基坑的三维地下水应力-渗流耦合有限元模型, 分析地铁车站考虑开挖-降水-回灌情况下的渗流稳定性。研究结果表明: 随着基坑的开挖与降水过程的持续进行, 周边地层在距基坑 10~20 m 处的沉降呈现明显凹槽; 回灌能在一定程度上恢复地下水的原本渗流, 减缓由降水带来的地面沉降, 且随着回灌井距离基坑位置的不同而呈现出不同的效果; 过近回灌带来的地下水升幅具有危害性, 过远回灌则导致恢复地下水渗流效果不理想。模拟结果显示, 在距离基坑约 30 m 处进行回灌, 能最大限度地控制地面变形情况且不使基坑过度变形。

关键词 地铁车站; 基坑; 降水施工; 回灌施工; 渗流稳定性; 地面变形

中图分类号 TU433:U213.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.031

Seepage Stability and Ground Surface Deformation in Metro Station Foundation Pit Dewatering and Recharge Construction in Confined Water-rich Stratum

LU Fucong, SUO Xiao, WU Bo, CHEN Liping, BIAN Shihai, NONG Zhongjian, XU Jiubao

Abstract Based on the real-time monitoring data, the main influencing factors such as land subsidence and ground water seepage around a water-rich confined foundation pit in Ji'nan are analyzed. A three-dimensional ground water stress-seepage coupling finite element model of the station end foundation pit is established by using finite element numerical analysis method, and the seepage stability of the metro station under the con-

dition of excavation-dewatering-recharge is analyzed. Research results show that: with the excavation of the foundation pit and the continuous dewatering process, the subsidence of the surrounding stratum presents obvious groove 10~20 m away from the foundation pit. Recharge can restore the original seepage of ground water to a certain extent, slowing down the land subsidence caused by precipitation, and showing different effects with different relative locations of the recharge well from the foundation pit. The ground water rise caused by too close recharge is harmful, and too far recharge will lead to unsatisfactory effect of ground water seepage recovery. The simulation results show that recharge at a distance of about 30 m from the foundation pit can maximize the control of land subsidence and avoid excessive deformation of the foundation pit.

Key words metro station; foundation pit; dewatering construction; recharge construction; seepage stability; ground surface deformation

First-author's address College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 530004, Nanning, China

地下水控制是岩土工程的一大技术难点^[1], 为了降低基坑开挖过程中由地下水带来的危害, 需要施以降水施工。但过渡的降水会带来地下水资源的破坏以及过大的地面沉降, 回灌是一种良好的地下水控制方法^[2]。近年来, 国内已有较多针对基坑降水方面的研究。文献[3]考虑了降水过程中的地下水位分布情况, 在二维渗流条件下计算地面沉降变形, 推导了降水过程中预测地下水及地面沉降的计算方法。文献[4]在降水引起的土体沉降计算中考虑了修正分层总和法, 合理推算出在基坑开挖条件下

^{*} 国家自然科学基金项目(51678164, 51478118); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFDA138009); 广西科技计划项目(AD18126011); 广西特聘专家专项资金项目(20161103); 广西大学科研基金项目(XTZ160590)

^{**} 通信作者

的基坑外部土体沉降理论公式。文献[5]结合理论计算和数值模拟对回灌井深度和回灌压力进行了控制研究,分析了不同回灌压力和回灌井深度情况下的地面沉降变化情况,结果表明:选择合适的回灌井深度和回灌压力能够减小地面沉降,但当回灌井过长或回灌压力过大时,减小地面沉降的效果不太明显。文献[6]基于 Mod Flow 软件和 GTS NX 软件,对工程场地进行压力回灌试验,并获得了不同回灌量下的地面沉降控制情况。目前,对于基坑降水与回灌对地面沉降的影响已有一定的研究,但大多数研究对象均为潜水,针对承压水降水和回灌渗流分析的研究较少。

济南市水文地质条件特殊,地下水类型以承压水为主且水头压力较大,对基坑施工具有较大的危害。本文以济南某富水承压基坑为研究对象,分析基坑监测结果,并采用有限元数值分析方法,建立基坑降水-开挖-回灌的三维渗流应力耦合模型,将其与经验值及实测值进行对比,以验证有限元模型的合理性。本文研究揭示了承压富水地层车站基坑降水-回灌施工的渗流变形规律,可为施工相关问题提供借鉴与参考。

1 工程概况

济南某富水承压深基坑的设计里程为 SK 26+559.367—SK 26+769.967,全长 210.6 m。车站站台长为 120.0 m,站台宽为 11.0 m,车站标准段总宽为 18.3 m。采用旋喷桩止水帷幕与袖阀管注浆结合的方式作为围护结构方案。根据《济南市轨道交通 R2 线一期工程设计技术要求》和 JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》中的相关规定,车站围护结构形式为 ϕ 1 000 mm@1 400 mm 钻孔灌注桩+钢支撑,标准段竖直方向采用顶部冠梁与 2 道钢支撑,端头井通过换撑架设第 4 道钢支撑。

1.1 工程地质概况

该车站所在地貌为平原,地势较为平整,地质勘测结果显示,车站场地地层自上而下划分为 7 层,各层的土层物理参数如表 1 所示。

1.2 降低水位设计

潜水及承压水为该车站降水目标。在车站标准段,降水井的井深为 22 m,间距为 24~26 m;在车站端头,降水井的井深为 24 m,间距 25~30 m。降水井设置 36 眼。降水井设置于基坑内部。回灌井共 20 眼,

表 1 基坑场地各地层物理性质指标
Tab. 1 Physical property index of each layer of foundation pit site

地层	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	渗透系数/ (m/d)	重度/ (kN/m ³)
素填土	20.8	0.30	24.8	53.7	0.345	17.9
粉质黏土	21.6	0.34	20.8	37.1	0.005	19.2
黏土	22.1	0.30	21.3	44.5	0.007	19.5
碎石	26.5	0.26	16.3	28.1	3.500	19.3
残积土	28.7	0.33	18.3	50.8	1.380	17.4
全风化闪长岩	32.3	0.28	33.4	32.2	1.296	20.6
中风化闪长岩	37.1	0.19	33.9	34.6	2.160	21.8

距离基坑围护结构 10~20 m,沿基坑外延设置,间距为 25 m,回灌井深度为 12 m,过滤段长度为 3 m。

2 基坑监测方案

对基坑支护体系和周边环境进行监测,基坑监测点布置图截图如图 1 所示。测点主要用于监测基坑开挖过程中围护结构的水平位移、地面沉降与水位变化,针对监测数据合理安排开挖与降水速率,同时采取必要措施保证基坑施工的安全。围护结构水平位移、地面沉降与水位监测点均沿坑周布置,地面监测点每处径向各布置 3 个点,用以监测远离基坑方向的地面沉降变化。

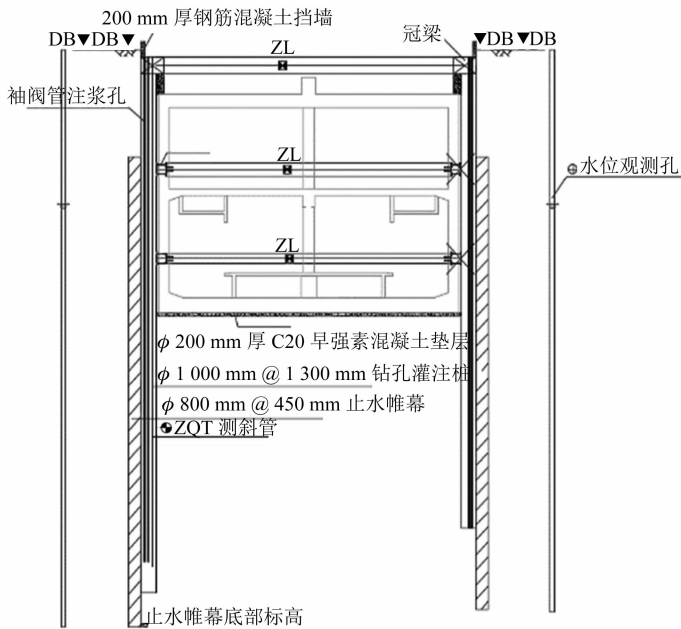
3 基坑监测结果

3.1 坑周地面沉降变化监测

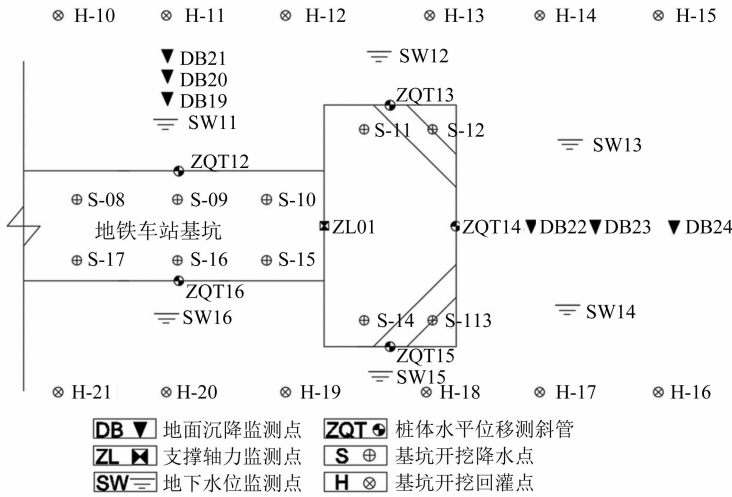
选取基坑端头 6 个地面沉降监测点(DB19—DB24),其坑周地面沉降变化如图 2 所示。截至 2019 年 3 月 1 日基坑开挖至设计标高时,DB20 观测点处的地面沉降为 23.4 mm,距基坑约 10~20 m 处为地面沉降最大点位。在回灌施工后,距基坑较远处 DB24 观测点的地面沉降逐渐恢复至 8.7 mm,最后趋于稳定。由于在基坑开挖前进行了地基加固处理,且降水及回灌对远端地面沉降的影响有限,距基坑小于 5 m 或大于 30 m 处的沉降趋势不明显。

3.2 基坑开挖期间的水位变化监测

选取 6 个水位监测点进行分析,不同测点地下水位随时间的变化曲线如图 3 所示。地下水位下降按降水设计要求一直保持在基坑开挖面以下,在 2019 年 3 月 20 日基坑周边施作回灌施工后,地下水位呈上升趋势。故需在施工过程中合理降水并施以回灌施工,以减小由降水带来的地下水渗流破坏而导致的地面沉降过大,保证基坑施工的安全性。



a) 剖面图



b) 平面图

图 1 基坑监测点布置图截图

Fig. 1 Screenshot of monitoring points layout in foundation pit

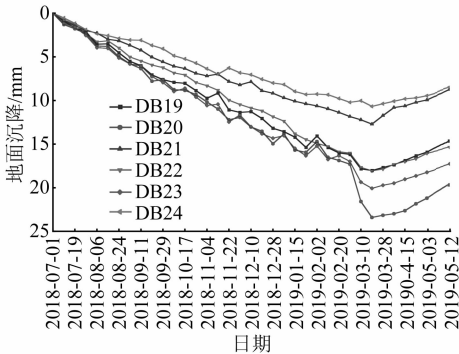


图 2 基坑周边不同测点的地面沉降曲线

Fig. 2 Land subsidence curves at different measuring points around foundation pit

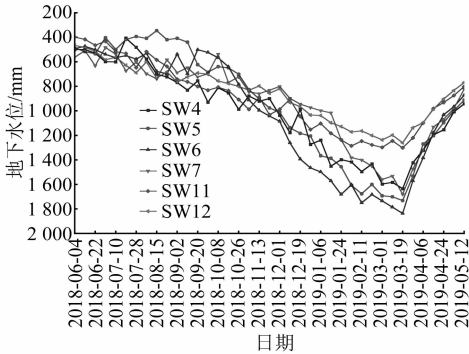


图 3 不同测点地下水水位随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of ground water level over time at different measuring points

4 基坑开挖渗流模拟与分析

4.1 地下水渗流理论

在承压完整井降水-回灌共同作用时,假设承压含水平面的二维渗流中势函数为:

$$d\varphi = kMdh \tag{1}$$

式中:

- M ——含水层厚度;
- k ——含水层渗透系数;
- φ ——渗流量;
- h ——水头。

同样,按潜水完整井求承压完整井降水-回灌共同作用下的浸润曲线方程,其具体推导过程可参考文献[7]。降水井与回灌井共同作用下的地下水变化为:

$$h_c = h_{c_j} + h_{ch} - M \tag{2}$$

式中:

- h_c ——降水-回灌共同作用下的水头;
- h_{c_j} ——降水井群共同作用下的水头;
- h_{ch} ——多回灌井共同作用下的水头。

4.2 数值模拟

对车站深基坑建立 Midas GTS 有限元软件的开挖-降水-回灌应力渗流耦合模型,在模型两侧施加初始水头边界(水头值为 31 m),用以模拟施工前地下水初始渗流场。承压水通过节点水头进行模拟,在每开挖步前施加低于开挖面 3 m 的节点水头模拟降水。开挖过程中,地下水一直保持在基坑底部。土体选用修正摩尔-库伦弹塑性屈服准则实体单元,内部支撑和围护桩采用线弹性本构模型进行模拟。基于基坑开挖与降水影响范围,土体模型设置为 600 m×400 m×50 m。有限元计算模型如图 4 所示,围护结构单元如图 5 所示。具体施工步骤为:

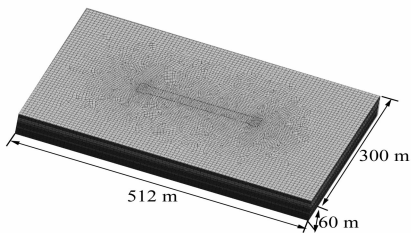


图 4 有限元计算模型

Fig. 4 Finite element calculation model

步骤 1:在开挖深度为 0 处设置混凝土支撑和冠梁;

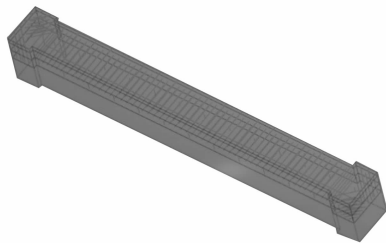


图 5 围护结构单元

Fig. 5 Enclosure structure unit

步骤 2:第 2 道钢支撑架设于开挖深度 5.75 m 处,水头降至 23 m(开挖深度为 7.60 m);

步骤 3:第 3 道钢支撑架设于开挖深度 11.15 m 处,水头降至 17 m(开挖深度为 13.50 m);

步骤 4:第 4 道钢支撑架设于开挖深度 14.30 m 端头井处,设置底板,水头降至 13 m(开挖深度为 16.00 m);

步骤 5:进行回灌施工。

4.3 降低水位渗流分析

上述施工步骤中,步骤 1、步骤 2 和步骤 5 中的孔隙水压力软件模拟结果截图如图 6 所示。由图 6 可知,基坑未开挖及降水施工时,基坑内、外部存在水头差,孔隙水压力呈水平自然状态分布,土体在原有应力状态下保持静止;向基坑内部的渗流作用是由于降水导致了地下水压力失衡;在进行回灌施工时,与降水过程相反,回灌过程中的回灌井内压力一般大于地下水孔隙水压力,从而形成压力差,

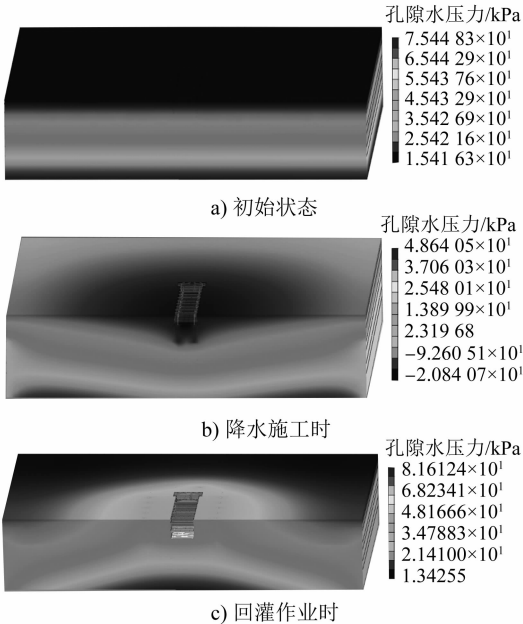


图 6 孔隙水压力软件模拟结果截图

Fig. 6 Screenshots of software simulation results of pore pressure

将水流压入地下,在一定程度上恢复由降水而破坏的地下水原本渗流。

在降水的过程中,降低地下水水位会引起土体有效应力的增加,进而加大周边地面的沉降;在回灌过程中,提升地下水水位会引起土体有效应力的降低,进而影响土体固结与地面沉降。因此,在降水与回灌施工中都应密切关注基坑周边的地面沉降情况,避免事故的发生。

4.4 模拟结果与监测结果的对比分析

4.4.1 桩体水平位移

模拟结果选取 ZQT12—ZQT14 在施工步骤 4~5 中的桩体水平位移,实测值选取 2019 年 3 月 1 日(基坑开挖至设计标高并架设钢支撑,此时处于最大桩体水平位移状态)ZQT12—ZQT14 的水平位移,其对比曲线如图 7 所示。由图 7 可知,考虑渗流耦合效应后,模拟值与实测值吻合得较好,则此模型可用于模拟后续优化设计模型。但实测值与模拟值也具有一定的差值,这主要是由于在实际基坑开挖至设计标高前控制了降水速率,给予了坑下土排水固结时间,使坑下土具有较好的固结度,从而使其围护结构水平位移稍小于模拟值,这表明土体的降水固结行为能提升其抵抗变形的能力。

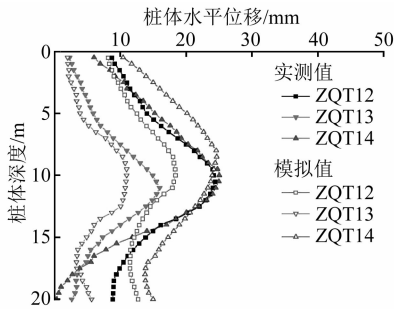


图 7 实测值与数值模拟值的桩体水平位移结果对比
Fig. 7 Comparison between the measured and the numerical simulated values of pile horizontal displacement

考虑渗流效应的模拟能够应用于预测实际变形过程,这与文献[7]得出的结论类似。考虑降水回灌的影响,基坑底部大于开挖标高的坑下土部分受到渗流作用的影响,导致桩体水平位移在开挖土层下部再次增大,形成“踢脚”的危险工况。在实际工程中,特别是富水承压地层中,应对坑下土进行加固压实作业,并严格控制降水与回灌量,以避免坑下地下水突涌导致发生事故。

4.4.2 地下水变化与地面变形

基坑底部 4 m 以下的地下水回灌和降水压力

曲线与受地下水回灌影响的地面变形曲线如图 8 所示。由图 8 可知,相较于单一的由降水、回灌带来的水-土应力失衡,降水与回灌共同作用带来了较大的水头应力差,当其超过一定临界值后,水-土的应力失衡进一步增大,需经更大的变形才能重新平衡,故其孔隙水压力与地面变形曲线并不是简单的叠加。文献[7]的研究结果表明越近的压力回灌,对围护结构的不利影响越大。

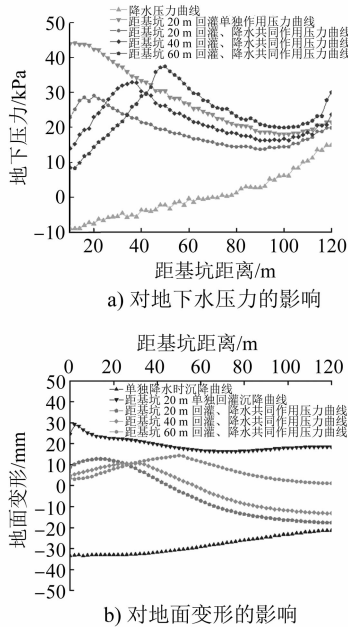


图 8 回灌与降水对地面变形和地下水压力的影响
Fig. 8 Influence of recharge and dewatering on ground surface deformation and groundwater pressure

当回灌井距离基坑越近,在其作用下的水位变化会越大,则产生的水头变幅就越大,由此产生的地面变形也会相应增大,从而带来过高的地下水位,也增加了基坑施工的风险,增大了围护结构发生渗水、突涌等危险工况的可能性。但回灌井距离基坑过远,其抬升地下水的幅度在降水中心处的作用会显得过于薄弱,对恢复降水区域地下水渗流效果不明显,所以应严格控制回灌井与基坑之间的距离。

4.4.3 回灌井距离优化设计

控制回灌井与基坑之间的距离既能控制地下水位与地面变形,又不至于危害围护结构。控制距离设为 3 m,研究与基坑之间不同距离的回灌井对围护结构和地面隆起的影响,模拟结果如图 9 所示。由图 9 可知:在考虑渗流-回灌耦合情况下,在距基坑约 30 m 处设置回灌井,对基坑围护结构隆起的影

响将会降至最小,且随着回灌井与基坑之间距离的增加,其影响变化并不明显;当回灌井与基坑之间的距离约为 32 m 时,回灌点地表隆起最小,适当减小或增大此距离都会导致过大的地表隆起。所以,回灌井与基坑之间的最佳距离应控制在 20~60 m,在此区间内能在最大程度上控制由回灌带来的地面隆起。

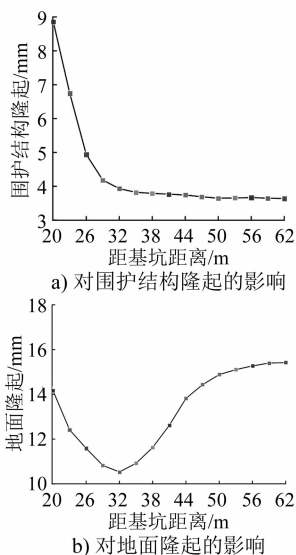


图9 不同回灌井距离对围护结构和地面隆起的影响

Fig. 9 Influence of different recharge well distances on enclosure structure and ground surface heave

5 结语

1) 在开挖-降水-回灌作用下,对比实际施工监测数据与数值模拟结果,两者总体上吻合得较好,但数值模拟较实测值偏大,可能是由于实际施工中地层的不均匀渗透系数导致地下水渗流较小引起的。

2) 考虑降水-回灌作用,在基坑开挖与降水过程中,基坑上部支撑先增大后稳定减小、底部支撑轴力逐渐增加、围护结构与周围土体绕中轴整体转动。

3) 应严格控制基坑降水量,避免回灌井与降水井同时作业,在保证开挖处水位低于开挖面的同时,尽可能降低降水参数;加强对周边地层沉降的监测,在实际施工前应加强土体底部的压实性;施工中在开挖至底层时应加强基坑底部监测,开挖至标高后应尽快施作底板以稳定基坑。

4) 应严格控制回灌井与基坑距离,避免回灌井过近造成地下水位抬升过高而危害基坑围护结构;同时也应避免回灌井过远导致其作用效果减

小,无法起到恢复地下水渗流与控制地面变形的情况。

5) 本文讨论了在开挖-降水-回灌作用下,基坑及其周边土层与地下水渗流的变化情况,但仅限于回灌井与基坑的距离,对于回灌井的数量、密度、间距及回灌压力等参数如何进一步影响基坑、土层与地下水渗流还需进一步研究。

参考文献

- [1] 罗晶. 富水砂层地铁车站施工期动态降水技术研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LUO Jing. The research of dynamic dewatering during metro station construction under watered sandy condition[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [2] 钟建文,牛磊,李罡,等. 济南西郊基坑工程地下水加压回灌试验分析[J]. 土木工程学报,2019,52(增刊1):174.
ZHONG Jianwen, NIU Lei, LI Gang, et al. Analysis of pressurized groundwater recharge test for foundation pit project at western suburbs of Ji'nan[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1):174.
- [3] 宋建学,周乃军,邓攀. 基坑降水引起的环境变形研究[J]. 建筑科学,2006,22(3):26.
SONG Jianxue, ZHOU Naijun, DENG Pan. Environmental settlement caused by construction pit dewatering[J]. Building Science, 2006, 22(3):26.
- [4] 张世民,景峰卫,黄英省,等. 基坑开挖及降水对抗外地表沉降的影响[J]. 土木与环境工程学报,2016,38(5):43.
ZHANG Shimin, JING Fengwei, HUANG Yingsheng, et al. The influence of foundation pit excavation and dewatering to ground surface settlement[J]. Journal of Civil and Environment Engineering, 2016, 38(5):43.
- [5] 李明. 回灌对减小降水引起地面沉降的数值分析[J]. 山西建筑,2017,43(18):61.
LI Ming. On numeric analysis of reducing ground settlement caused by rainfalls with recharge[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(18):61.
- [6] 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.
ZHOU Yong, WANG Xiaoli, ZHU Yanpeng, et al. Seepage stability analysis of deep foundation pit of Lanzhou Metro under the condition of water level reduction in collapsible loess[J]. China Railway Science, 2017, 38(1):86.
- [7] 李大宁,赵刚,韩冬冰. 基于数值分析的降水与回灌相互影响分析[J]. 山西建筑,2020,46(1):88.
LI Daning, ZHAO Gang, HAN Dongbing. Analysis of interaction between precipitation and recharge based on numerical analysis[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(1):88.

(收稿日期:2020-09-06)