

饱和软黄土停止降水后变形规律及应对措施研究

于文龙¹, 亢佳伟², 邓国华^{2,3}

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010;

2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048;

3. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 黄土地区城市地铁建设中, 降水是保障自身施工安全的重要措施, 但对周边环境会造成威胁, 必要时需采取停止降水的应急措施。依托两个典型工程, 首次研究了停止降水后建筑物和地表变形的发展规律、地下水位的回升情况、水位回升后再次湿陷的可能性及结构自身安全稳定等影响能否停止降水的关键问题, 并制定了停水前应采取的一系列技术措施。研究表明: 停止降水后, 建构筑物 and 地表变形能够得到有效控制, 并出现一定的回弹, 上覆荷载越大, 回弹变形量越小; 停止降水后, 水位回升经历迅速上升到缓慢上升再到逐步稳定的三个阶段; 在上覆压力未增大的情况下, 水位回升不会引起湿陷变形; 水位回升后, 地铁自身结构稳定无法保证, 应增加二衬和基底注浆的技术措施。

关键词: 饱和软黄土; 降水; 水位回升; 固结沉降; 环境风险

中图分类号: TU46⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)04—0197—07

Deformation Law and Countermeasures of in Saturated Soft Loess Stratum After Precipitation

YU Wenlong¹, KANG Jiawei², DENG Guohua^{2,3}

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Xi'an Loess Underground Project Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: During the construction of urban subway in the loess area, precipitation is a effective measure for its construction safety. However, it will pose a threat to the surrounding environment, so it is necessary to take emergency measures to stop precipitation when necessary. Based on two typical projects, through on-site monitoring and calculation analysis, this paper analyzed the development law of building and surface settlement after stopping dewatering, the recovery of groundwater level, the possibility of collapsing after the water level rises, the safety and stability of subway structure, and other significant issues that affect whether the dewatering can be stopped, and formulates the technical measures that should be taken before stopping dewatering. The results are as follows. After the stop of precipitation, the building and surface deformation can be effectively controlled, and there is a specific rebound. The more significant the overlying load is, the smaller the rebound deformation is; The rise of water level goes through three stages: rapid rise, slow rise and then stable; The rise of water level will not cause collapsible deformation when the overlying pressure remains unchanged; After the rise of water level, the ground subsidence will be reduced. The stability of the iron structure cannot be guaranteed, so the technical measures of adding a secondary lining and base grouting is highly recommended.

Keywords: saturated soft loess; precipitation; water level rising; consolidation settlement; environmental risk

饱和软黄土是湿陷性黄土浸水后变形未充分发展,大孔隙仍然存在的饱和黄土,常处于未压密状态^[1],分布在地下水位附近,天然状态下呈软、流塑状,灵敏度高,降水和扰动沉降量大^[2-3],是黄土地区地下工程建设中典型的危险地层。

众所周知,在黄土地区的地铁工程建设中,大量的明挖车站、竖井及暗挖隧道需在降水条件下开挖,由于地铁工程常处于城市繁华地段,周边环境复杂,工程降水必将引起环境风险,尤其是遇到降水沉降大的饱和软黄土地层,多发生建构筑物拉裂、倾斜的典型工程事故^[4-5]。为保证周边环境的安全,施工过程中需做好应急预案,停止降水是确保建构筑物安全常采用的措施。停止降水或部分停止降水后,地下水位将逐步回升。我们知道,黄土地区地下水位的上升和下降都将引起沉降,地下水位下降,土层有效应力增加,发生固结沉降,地下水位上升的过程中,可能引发黄土的湿陷变形^[6-7]。同时,地下结构临时支护措施均按照降水状态设计,停止降水后,水土压力增大,必定伴随着结构受力状态的显著改变,给工程带来较大的实施风险^[8-9],因此临时停止降水对地下结构的稳定性以及周边环境变形风险的控制是这一应急措施可行的关键。

本文主要通过选定西安地区两个典型饱和软黄土地场,布置了系统的沉降变形和地下水位监测系统,现场开展全部或局部关停降水井的原位试验,通过现场监测、理论分析和数值计算等多种手段来分析停止降水后,周边环境的变形发展特征以及结构受力变化规律,并给出相应的技术措施,为黄土地区同类降水工程采取关停降水井的应急措施提供一定的参考和借鉴。

1 工程概况

1.1 场地 1

西安地铁某区间竖井(以下简称竖井①)位于典型饱和软黄土地场,降水均采用开放式管井降水,共设置 12 口降水井,井深 45 m,降深为 20 m,影响范围内地层主要为 12.5 m 的饱和软黄土层和 5 m 的饱和 Q2 黄土(软塑)层。地质剖面如图 1 所示。距离竖井井口约 16.9 m 位置处分布有某三层砖混建筑物,其基础为条形基础,地基处理采用三七灰土换填形式,深度大约 3 m~5 m,工程周边环境如图 2 所示。

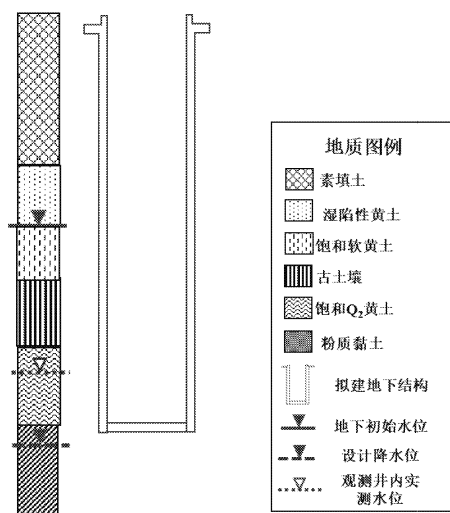


图 1 竖井①地质剖面图

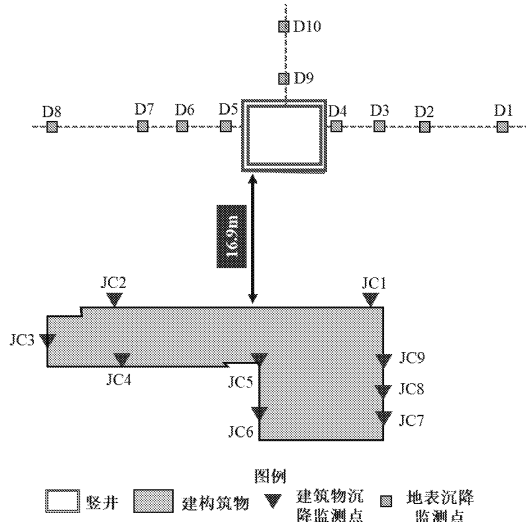


图 2 竖井①周边环境情况

在降水工程实施过程中,单日沉降速率最大达到 4.7 mm,累计建筑物沉降量达到 62 mm。结构出现裂缝,并在后续观察中发现裂缝有增加和增大趋势,为确保建筑物安全,采取了关停全部降水井的措施,地下水位逐步恢复至地层原始水平。

1.2 场地 2

西安地铁某区间竖井(以下简称竖井②)位于典型饱和软黄土地场,降水均采用开放式管井点降水,竖井及横通道周边共布置降水井 22 口,井深 50 m,降深为 20 m,影响范围内地层主要为 1.5 m 的饱和软黄土和 10 m 的饱和 Q2 黄土(软塑)层。地质剖面如图 3 所示。距离竖井(明挖基坑)距离约为 28 m 位置处分布有地上 15 层,地下 1 层的框架结构建筑物,总高为 48.00 m。地基处理采用灰土夯

扩挤密桩(DDC 法),灰土挤密桩(DDC 法),成孔 $\Phi 400\text{ mm}$,成桩 $\Phi 600\text{ mm}$,桩长为地下室结构底板以下 5 m ,桩端处于地面以下 10 m ,工程周边环境如图 4 所示。

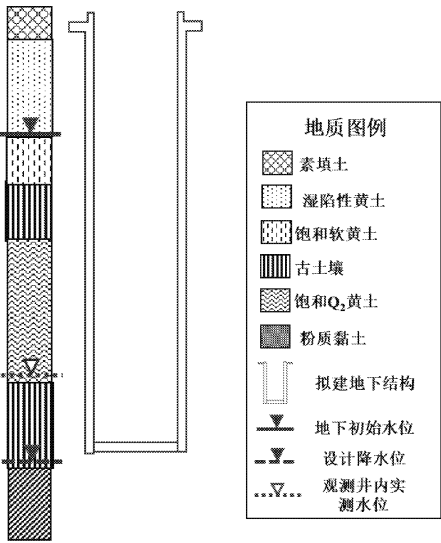


图 3 竖井②地质剖面图

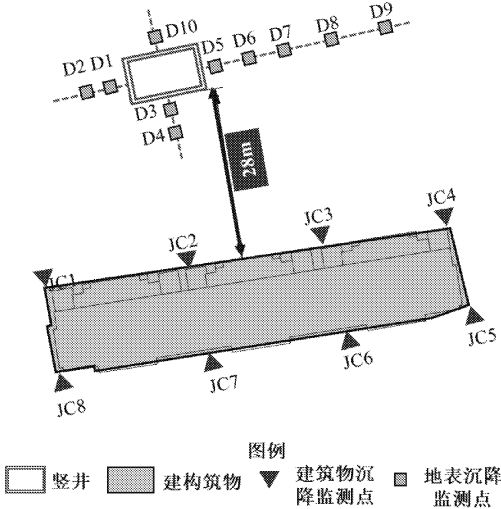


图 4 竖井②周边环境情况

在工程降水实施过程中,建筑物累积最大沉降量 87 mm ,建筑物倾斜率到达 1.5% (含未降水前建筑物自身差异沉降),并有持续发展的趋势。考虑到建筑物的重要性和已施作竖井结构的稳定性,采用局部关停降水井的措施,控制地下水位抬升幅度,保证竖井结构的受力变形稳定。

2 停止降水后现场监测分析

本节主要对比分析停止降水井运行前后,周边

建构筑物、地表变形和周边观测井内的水位变化三个方面的监测数据,对地下水位抬升过程和周边环境变形规律开展相关研究工作。

2.1 场地 1

本场地中地层原始水位 5 m ,降水后地下水位为 22.8 m 。2016 年 6 月 3 日开始逐步关停降水井。2016 年 6 月 5 日,观测井内水位 10.2 m ,水位变幅达到 12.6 m 。2016 年 6 月 20 日,观测井内水位约 7 m ,水位变幅达到 15.8 m ,已基本恢复至地层原始水位水平。

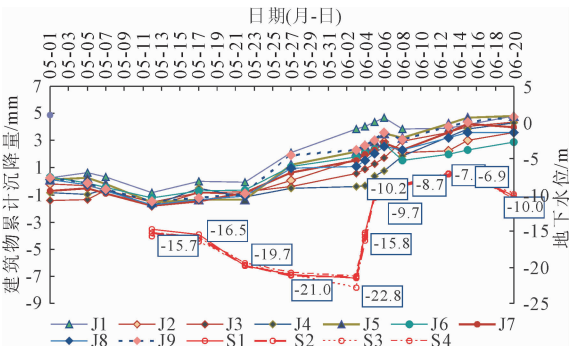


图 5 水位恢复过程中建筑物沉降监测发展规律

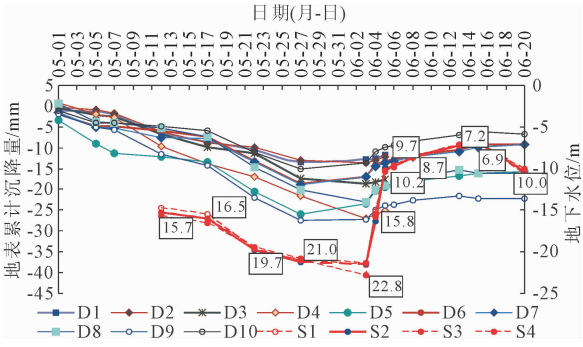


图 6 水位恢复过程中地表沉降监测发展曲线

截止 2016 年 6 月 20 日,水位回升后的半个月,建筑物和地表沉降变形发展趋势得到了有效的抑制,建筑物沉降变形基本呈现稳定趋势,地表沉降具有一定回弹特征,回弹变形量多在 10 mm 以内。

2.2 场地 2

本场地中地层内初始水位处于地面以下 8 m ,降水后水位约 $23\text{ m} \sim 27\text{ m}$ 。2020 年 9 月 16 日起逐步关停距离建筑物较近的 3 口降水井。2020 年 9 月 27 日,竖井周边观测井内水位为 $20\text{ m} \sim 23\text{ m}$;较停水前地下水位相比,抬升约 $2\text{ m} \sim 4\text{ m}$ 。既有建筑物的沉降变形呈稳定趋势,地面变形具有一定的回弹,整体回弹变形量不超过 5 mm 。

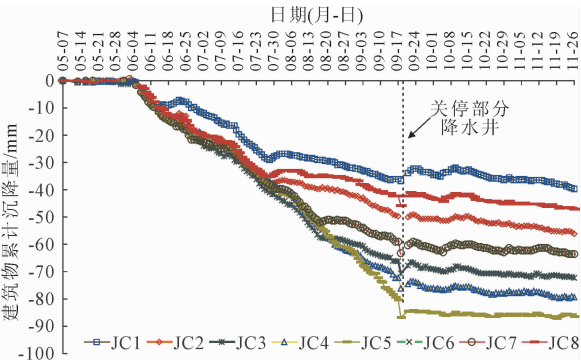


图 7 建筑物沉降监测发展变化历程曲线

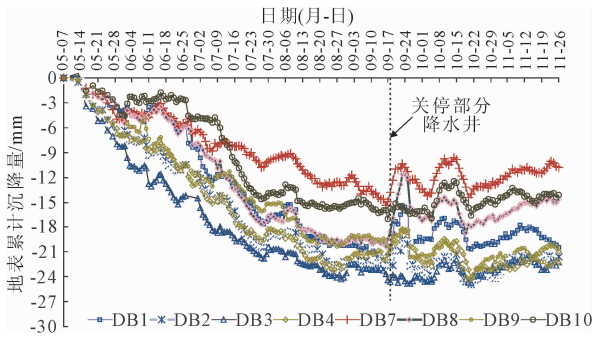


图 8 地表沉降监测发展变化历程曲线

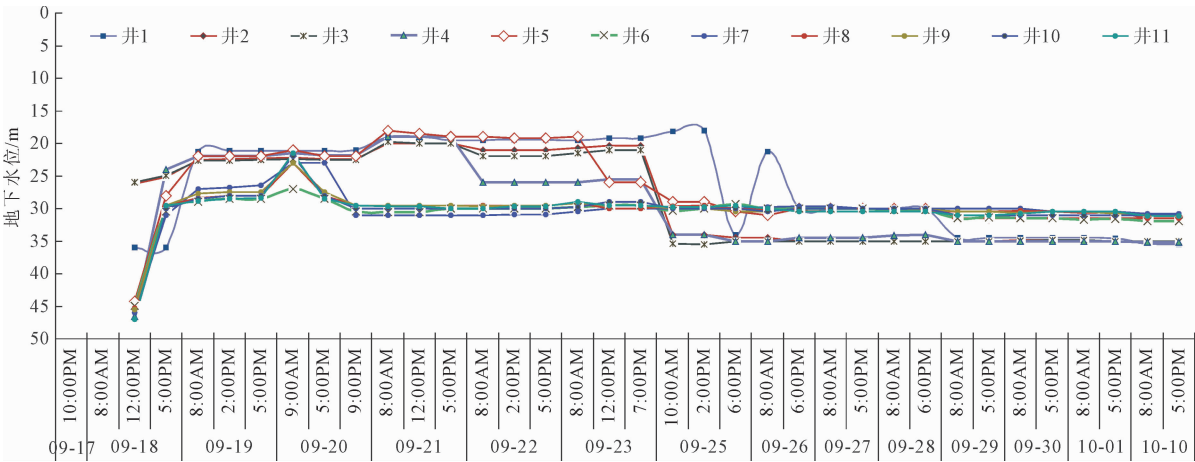


图 9 观测井内水位恢复曲线变化历程

本文研究的两个案例,竖井①全面停止降水,竖井②局部停止降水。采用关停降水井的措施后,地下水位均经历了迅速上升、缓慢上升和逐步稳定三个阶段。尤其是全面停水后,首先经历了水位迅速回升阶段,以竖井①为例,关停全部降水井后,竖井周边水位迅速上升,2 d 内水位变幅达 12.6 m,这是因为饱和软黄土孔隙比较大,常为 0.9 ~ 1.0 左右,渗透性相对较强,约为 5 m/d ~ 8 m/d,降水井停止抽水后,周围地下水迅速补给,地下水位迅速抬升所致;然后进入缓慢上升阶段,降水影响区域内的土体的水位有所回升,但速率相对较小,这一过程一般需要 1 ~ 2 个月;最终进入逐步稳定阶段,地下水位逐步达到新的渗流平衡状态,这一阶段需要 2 ~ 3 个月。

2.3 水位回升引发湿陷变形分析

工程降水实施过程中,原饱和 Q3 软黄土与饱和 Q2 黄土(软塑)经历了有效的疏干过程,形成非饱和状态下的欠压密非饱和 Q3 黄土和欠压密非饱和 Q2 黄土,此时,黄土可能仍具有湿陷特征(另文讨论)。根据场地①、②位置处的地质特征和建筑

物、地面沉降变形发展特征,可以得到在水位回升过程中,周边环境的沉降发展趋势均得到了有效的抑制,甚至局部发生回弹变形,湿陷变形并未发生。

结合饱和软黄土所经历过的水力历史,我们可对其在水位抬升阶段的湿陷变形发展规律开展进一步的分析。首先,饱和软黄土是湿陷性黄土在水位上升过程中形成的,即水位上升时,上覆压力没有达到湿陷起始压力,湿陷变形未发生,仅发生了一小部分压缩变形,形成了具有大孔隙结构、呈软、流塑状态的饱和软黄土。当水位下降时,在有效应力增量作用,变形充分发展,此时形成的非饱和黄土较原湿陷性黄土相比,性质较稳定,孔隙比更小,湿陷性更弱。因此,当地下水位回升过程中,仍然会因为上覆压力不够,而无法湿陷,从而形成新的饱和软黄土或者饱和黄土(不一定具有软弱特征)。由此可知,工程降水后在水位回升过程中,饱和软黄土降水后将不会发生湿陷变形,周边建构筑物、管线及地面若在降水之前已经稳定,那么也不会因为水位回升而引起湿陷变形。需要强调的是,若停水前或停水过程中上覆压力增大,则应结合实际情况,开展湿陷试

验,判定上覆总压力与湿陷起始压力关系,进而确定湿陷变形发展规律。

3 停水水位预测与结构受力分析

一般地,地铁临时施工竖井平面尺寸 5 m×7 m,采用倒挂井壁法施工,临时支护措施为 0.5 m 一榀横支撑,挂网喷 0.3 m 混凝土,不做永久衬砌,施工完成后回填。而采取局部或全部关停降水井措施之后,水土压力增大,必定伴随着结构受力状态的显著变化。因此,水位逐步抬升过程中,保证已完成竖井结构的受力变形稳定是采取暂停降水措施可行的前提条件。

本节以场地②为工程背景,采用 Midas GTS/NX 软件为手段,在现场降水井实际布置位置处,通过控制降水井布置位置处的模型节点流量的开启与关闭,模拟降水井的开启与关停工况。对局部或全部关停降水井工况下竖井结构受力变形特征开展相关研究工作。

3.1 关停部分降水井

本节分析过程中,通过建立三维数值模型如图 10、图 11 所示,在关停邻近建筑物一侧的 3 口降水井后,重点针对竖井结构和建筑物侧的水位分布特征和竖井结构变形规律开展相关研究工作。

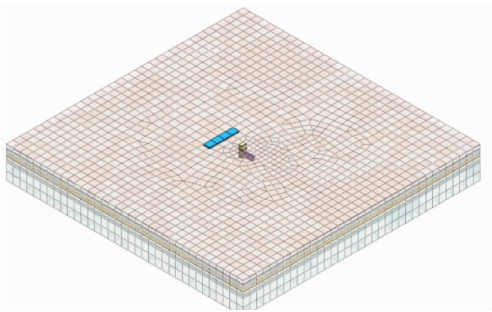


图 10 数值计算模型

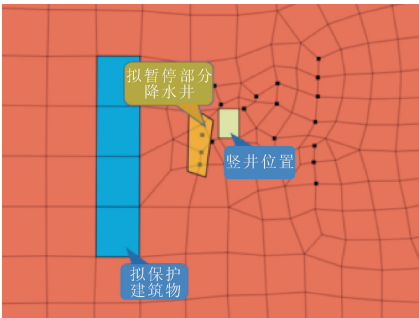


图 11 拟保护建筑物、竖井及降水井平面位置

依据图 12、图 13 所给出的竖井和建筑物基础

位置处的压力水头分布特征,竖井位置处动水位处于地下 25.0 m~26.5 m,与现场观测井内水位基本保持一致;建筑物位置处动水位处于地下 15.0 m~16.4 m 位置处。在此基础之上逐步关停邻近建筑物一侧的 3 口降水井。建筑物位置处的压力水头分布如图 14 所示。

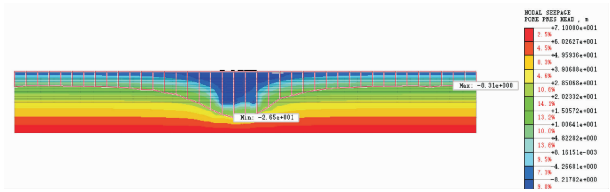


图 12 竖井周边既有降水漏斗分布

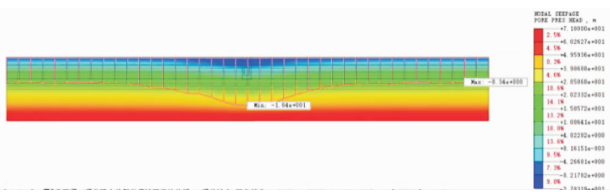


图 13 建筑物基础周边已有降水漏斗分布

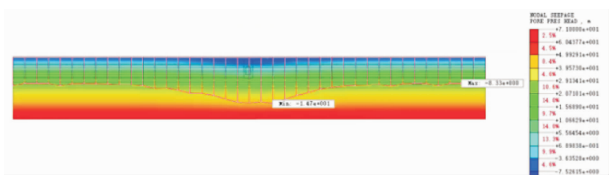


图 14 降水井关停运行后建筑物位置处降水漏斗分布

在关停邻近建筑物一侧 3 口降水井运行后,建筑物基础位置处水位由 16.4 m 恢复为 14.7 mm,水位上升幅度为 1.7 m。由于本场地共布设 22 口降水井,关停 3 口降水井对其水位变幅有一定的影响但变化较小。

为有效评价局部关停降水井对竖井结构受力变形特征的影响,绘制竖井结构收敛变形特征如图 15 所示。

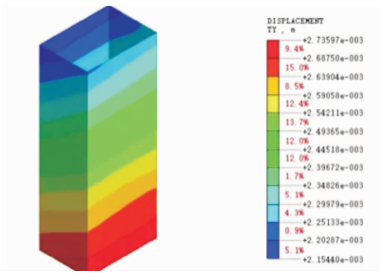


图 15 局部降水井暂停后竖井结构变形图

关停临近建筑物侧 3 口降水井运行状态下,既有竖井结构收敛变形约 3 mm 左右,基本维持稳定。

3.2 关停全部降水井

在 3.1 节的基础上,关停竖井实施范围内全部降水井,模拟地下水位逐步恢复至地层初始状态过程,对关停降水井前后竖井结构的受力特征汇总对比如图 16、图 17 所示。

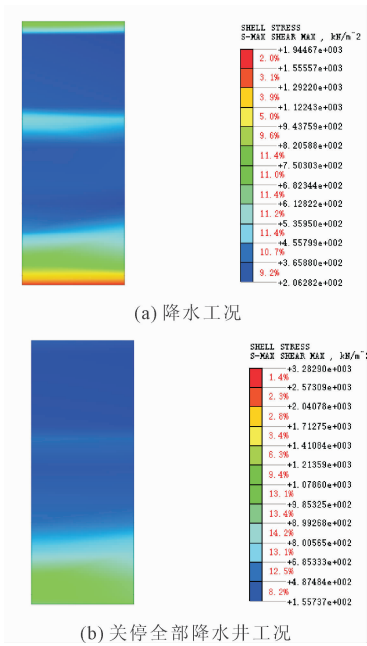


图 16 关停降水井前后竖井结构最大剪应力

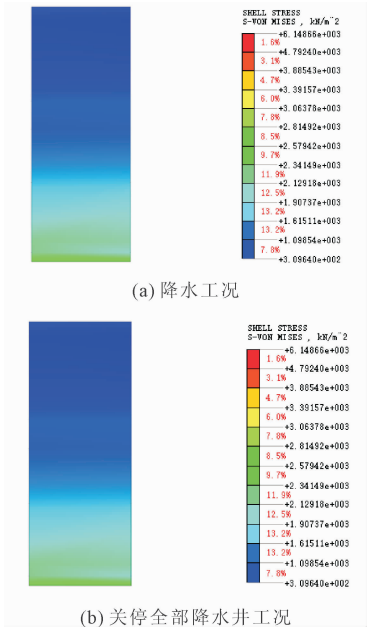


图 17 关停降水井前后竖井结构最大 Mises 应力图

分析结果,当竖井周边全部停止降水,地下水位恢复至初始状态,此时竖井结构的最大剪应力和最

大 Mises 应力较维持现阶段降水工况下受力状态变化较为显著。既有竖井结构在水土共同作用下,最大 Mises 应力由 4.03 MPa 增加至 6.14 MPa,最大剪应力由 1.95 MPa 增加至 3.28 MPa,增幅达到 50%~60% 左右。由于竖井设计阶段一般按照降水状态计算,均未考虑防水和水位回升后结构的安全状态。水位回升,一是土的侧压力系数增大,非饱和黄土有一定的结构性,侧压力系数相对较小,而水位回升形成饱和软黄土后,处于软流塑状态,侧压力系数显著增大,必然造成结构应力增大;二是增加了水头压力;三是对于欠压密的水敏性黄土,饱和后强度和自稳能力大幅度降低;四是结构浮力增大。

通过逐步停止降水和全部停止降水计算分析对比表明,关停 3 口降水井对地下水位的回升、初支结构的受力及变形都是基本可控的,而一次性全面停止降水,水位变幅较大,结构受力发生显著变化,在实际工程中应予以避免。

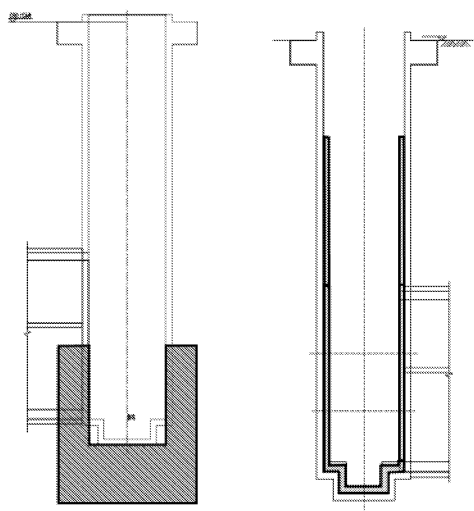
4 降水技术措施研究

竖井停止降水后,水位回升,临时支护结构安全受到威胁,且无法保证防水效果。为此,为确保结构安全和后续继续施工,应采取可靠措施后方可停止降水。

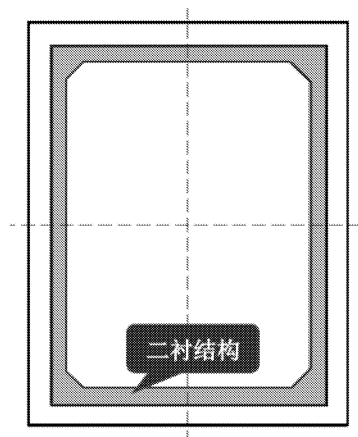
考虑停水前后,竖井结构受力状态的变化,结合工程实际,为保证竖井结构安全和防水,并考虑控制投资的需要,制定以下技术措施:一是在原始地下水位以下的竖井内部施作防水和二次衬砌结构;二是考虑到二衬结构施工后不满足抗浮的要求,需对结构底板以下 3 m~6 m 及结构底板、侧墙外侧以上 3 m~6 m 范围内土体进行注浆加固,如图 18 所示。同时,二衬强度达到 80% 后方可停止降水。

根据停止降水水位回升情况和结构受力特性的分析,降水井宜逐步关停,避免地下水位迅速上升给结构安全和周边环境带来新的风险。停止降水前应对水位恢复情况进行预测,每阶段停井导致水位回升不应超过 2 m。

场地①中,起初并未采取结构加强措施,且一次性全面停水,导致竖井结构收敛变形急剧发展,临时加强支撑后,逐步施作了二衬,结构最终稳定;场地②中,停止 3 口降水井的同时施作二衬,最终房屋建筑和竖井变形逐步稳定。



(a) 二衬剖面与基底注浆加固处理



(b) 二次衬砌结构平面图

图18 停止降水前结构安全加强措施

5 结 论

在黄土地区的地下工程实践中,停止降水是必要的应急处置措施,尤其是在存在饱和软黄土的地区,降水导致周边环境安全不可控,不得不做好随时停止降水的准备。本文首次研究了饱和黄土地层停止降水过程中沉降变形、水位回升及结构受力的变化规律,分析了采取停止降水措施后可能带来的风险,制定了可行的技术措施。研究结论如下:

(1) 停止降水后,周边建构筑和地表变形能够得到有效控制,并出现一定的回弹。建筑物回弹变形量较小,地表回弹变形量较大。水位回升后,上覆荷载是影响回弹变形的关键因素。

(2) 降水井停抽后,水位回升经历迅速上升到缓慢上升再到逐步稳定的三个阶段;建议工程中逐步关停降水井。

(3) 在上覆压力未增大的情况下,水位回升后,失水后的非饱和黄土恢复到原来的饱和软黄土或者饱和黄土,不会引起湿陷变形。

(4) 水位回升后,地铁自身结构内力变化较大,无法满足结构安全和抗浮的要求,应采取必要的应对措施,如增加二衬和基底注浆等技术措施。

参考文献:

- [1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [2] 于国新,白明洲,许兆义. 西安地区饱和软黄土工程地质特征研究[J]. 工程地质学报,2006,14(2):196-199.
- [3] 高虎艳,邓国华. 饱和软黄土的力学与工程性质分析[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(3):38-42.
- [4] 曹平,李冀伟,卢致强,等. 大厚度饱和软黄土地层矿山法地铁隧道施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(6):177-185.
- [5] 刘建伟,李冀伟,卢致强,等. 饱和软黄土地层降水及引起周边环境沉降特点——以西安地铁5号线为例[J]. 科学技术与工程,2019,19(25):334-340.
- [6] 刘振红,张一. 地下水位抬升对非湿陷地基变形的影响[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(5):52-55.
- [7] 李延川,王森,钟祖良. 不同排水孔失效长度下岩溶隧道衬砌结构受力分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S2):833-839.
- [8] 李玉波,朱才辉,段宇,等. 黄土隧道地层增湿条件下衬砌力学响应[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):33-38.
- [9] 张明飞. 地下水位变动诱发地铁隧道变形机理及其与地铁隧道相互影响研究[D]. 南京:东南大学,2018.