

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.06.013

南水北调某泵站深基坑开挖对 邻近建筑物影响研究

许正松¹, 姜小红¹, 路威^{2,3}, 赵卫全^{2,3}

(1. 中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 合肥 230601;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

3. 北京中水科工程集团有限公司, 北京 100044)

摘要: 南水北调东线二期某泵站基坑位于强透水裂隙土层, 开挖深度达 25.3 m。为保证基坑开挖时邻近建筑物的安全运行, 运用 MIDAS 有限元程序建立三维渗流-应力耦合模型, 研究悬挂帷幕止水和深井降水时, 基坑开挖引起的邻近一期泵站和公路桥的变形规律, 分析帷幕深度和土体弹性模量取值对邻近建筑物沉降的影响。结果表明, 邻近建筑物的变形主要由坑内降水引起, 土方开挖的影响较小; 与深井降水相比, 采用悬挂帷幕止水时邻近建筑物的沉降和水平位移最大降幅分别为 85.3% 和 72.4%; 综合考虑帷幕对邻近建筑物变形的控制效果和经济性, 泵站基坑帷幕插入深度为 8.7 m 较为合理, 此时一期泵站主、副厂房和邻近公路桥的沉降分别为 3 mm~4 mm、10 mm~12 mm 和 26 mm~34 mm。

关键词: 深基坑; 悬挂式帷幕; 渗流-应力耦合

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)06-0082-06

Influence of Deep Foundation Pit on Adjacent Structures of a Pump Station in South-to-North Water Transfers Project

XU Zhengsong¹, JIANG Xiaohong¹, LU Wei^{2,3}, ZHAO Weiquan^{2,3}

(1. China Water Huaihe Planning Design & Research Co., Ltd., Hefei, Anhui 230601, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China;

3. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100044, China)

Abstract: A pump station in the second stage of east route of south to north water transfer project was located in the highly permeable cracked soil stratum, and the maximum excavation depth of the foundation pit was 25.3 m. In order to ensure the safe operation of adjacent structures, a 3D seepage-stress coupling model was created by employing MIDAS finite element software, and the deformation law of the adjacent pump station and bridge was studied under condition of foundation pit with unclosed curtain sealing or deep well dewatering, and the influence of curtain depth and elastic modulus of soil was analyzed. The results are as follows. The deformation of the adjacent structures was generally induced by the dewatering process. Comparing with deep well dewatering method, the maximum drop of settlement and horizontal deformation of adjacent structures were 85.3% and 72.4%, respectively. Considering the control effect of settlement and economic, the reasonable depth of the unclosed curtain was 8.7 m for this project, the settlements of the adjacent main and auxiliary powerhouse of pump station and bridge were 3 mm~4 mm, 10 mm~12 mm and 26 mm~34 mm, respectively.

Keywords: deep foundation pit; unclosed curtain for cutting off drains; seepage-stress coupling

收稿日期: 2021-07-30

修稿日期: 2021-08-21

基金项目: 中水淮河规划设计研究有限公司科研专项 (HTEM0203A082021)

作者简介: 许正松 (1981—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程设计、施工工作。E-mail: 625732872@qq.com

通讯作者: 路威 (1984—), 男, 正高级工程师, 主要从事基坑支护和地基处理等方面的研究工作。E-mail: luwei@iwhr.com

位于高水位、强透水土层中的深基坑工程,当采用深井降水或止水帷幕不能完全隔断含水层时,降水施工会导致在基坑周边较大范围以外出现明显的地面沉降。目前,对于降水引起的地层变形计算方法尚不成熟,通常采用工程类比选取沉降经验参数^[1-2]、模型试验^[3-4]和数值模拟^[5-11]计算分析,其中渗流-应力耦合数值模拟是较为有效和常用的手段。龚晓南等^[12-13]认为,数值分析结果是岩土工程综合分析、判断的重要依据之一。采用数值模拟计算基坑降水引起的地面沉降,其准确性很大程度上依赖于土体参数,特别是弹性模量参数的选择。通常,岩土工程勘察报告中的土体强度特性参数可直接用于数值计算,但土体弹性模量等变形特性参数却不易获得。Preene^[14]认为,由于降水过程引起的土体应变远小于常规室内固结实验时的土体应变,导致土体刚度被低估。根据贾堤等^[15]、梁云发等^[16]和郑刚等^[17]研究成果和实践经验^[18],不同类型的土体弹性模量与压缩模量之间存在一定的关系,但是差别很大,一般为压缩模量的 2 倍~10 倍,且与土的性状、地区条件等密切相关,土体物性指标越高,弹性模量与压缩模量的比值越大。

南水北调东线二期某泵站深基坑工程,地层渗透系数大,周边既有建筑物多,需要有效预估基坑开挖引起的建筑物沉降,确保其安全运行。本文以此为背景,运用 MIDAS/GTS 有限元程序,建立三维渗流-应力耦合模型,模拟基坑降水和开挖过程,研究采用悬挂帷幕止水和深井降水时,邻近一期泵站主、副厂房和公路桥的变形规律,分析帷幕深度和土体

弹性模量取值对各建筑物沉降影响的敏感性,并在此基础上评估基坑开挖引起的各建筑物沉降阈值,为工程设计、施工和后续类似工程提供参考。

1 工程概况和场地条件

1.1 工程概况

南水北调东线二期某泵站的主要建筑物包括主厂房、副厂房、进水渠、出水渠等。工程区地面高程 32.5 m~38.0 m,整体上呈西北高,东南低。根据主体结构设计要求,泵站基坑主副厂房段、进水渠段和出水渠段的开挖底高程分别为 13.7 m、24.8 m 和 27.5 m,最大开挖深度为 25.3 m。

1.2 工程地质和水文地质条件

泵站区域上部主要分布第四系地层,厚度约 130 m,以全新统冲积相裂隙黏土、黏土、中粗砂、中轻粉质壤土和上更新统冲积洪积相壤土、黏土夹姜石为主。场区地层分布典型剖面图和主要物理力学指标分别如图 1 和表 1 所示。

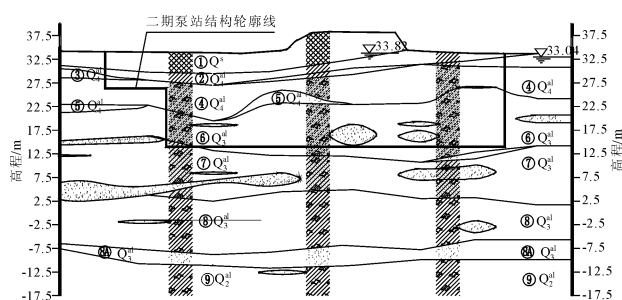


图 1 泵站基坑场区地层分布典型剖面图

表 1 泵站场区地层分布和主要物理力学指标

编号	土层名称	平均厚度 /m	湿密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙比	压缩模量 /MPa	渗透系数 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
①	人工填土	4.87	1.91	1.057	3.19	—	18	8
②	黏土	2.29	1.94	0.980	4.50	4.12×10^{-2}	25	9
③	黏土	1.64	1.88	0.987	3.14	4.12×10^{-2}	18	8
④	中粉质壤土	6.45	1.98	0.827	6.63	4.12×10^{-2}	25	12
⑤	中粗砂或黏质砂	2.08	2.04	0.569	6.20	4.12×10^{-2}	4	28
⑥	中粉质壤土	7.72	2.02	0.706	6.12	4.12×10^{-2}	39	13
⑦	重粉质壤土夹姜石	6.30	2.00	0.752	7.52	5.00×10^{-3}	50	14
⑧	黏土夹姜石	10.87	2.00	0.755	8.98	5.00×10^{-3}	55	16
⑨	黏土	未揭穿	2.02	0.684	9.00	5.00×10^{-3}	56	15

场区地下水类型主要为第四系孔隙、裂隙潜水,以大气降水和湖水为主要补给来源,以蒸发和人工取水为主要排泄途径。勘探深度内的主要含水层为

裂隙黏土和黏土夹姜石中的裂隙、中细砂、中粗砂等,含水层连续性一般。地下水埋深 2.20 m~2.60 m,高程 32.5 m~32.7 m,年变幅 2.0 m~3.0 m。

1.3 场区条件及基坑布置

如图 2 所示,泵站场地条件复杂,既有建筑物较多,主要为一期泵站主、副厂房,上、下游进出水渠道和二级坝公路桥等。其中一期泵站副厂房和二级坝公路桥均为桩基础,桩底高程 8 m;一期泵站主厂房为筏板基础,基底高程 19.5 m。

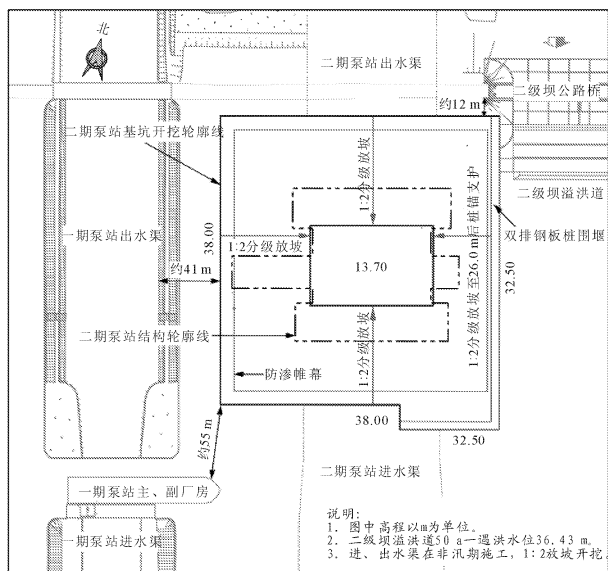


图 2 泵站基坑布置及周边建筑物

二期泵站和进、出水渠基坑均以 1:2 放坡开挖为主。根据施工进度要求,二期泵站需考虑汛期施工,进、出水渠则完全在非汛期施工。因此,在二期泵站基坑东侧,为满足二级坝溢洪道行洪要求,尽量少占溢洪道,在基坑 26.0 m 高程以下采用桩锚支护,并按照 50 a 一遇防洪标准在坡顶布置双排钢板桩围堰。

二期泵站基坑开挖边线与一期泵站厂房、出水渠和二级坝公路桥的最小水平距离分别约为 55 m、41 m 和 12 m,施工期间要保证既有一期泵站和二级坝公路桥的正常运行,需严格控制基坑降水和开挖引起的建筑物变形。根据勘察成果,二期泵站场区地下水位高,地层以力学指标较低的裂隙土层为主,渗透系数为 10^{-2} cm/s ~ 10^{-3} cm/s,且在深度 100 m 范围内无相对隔水层,若采用深井降水,不仅抽水量大,而且会导致大范围的地下水位下降,引起一期泵站和二级坝公路桥等建筑物的较大沉降,影响其安全运行,因此,在坑内 33.5 m 高程布置一道 300 mm 厚素混凝土地下连续墙悬挂帷幕,设计帷幕底高程 5.0 m。

2 渗流 - 应力耦合数值模拟计算

2.1 计算模型

采用 MIDAS/GTS 建立渗流 - 应力耦合计算模型,分析该泵站基坑降水和开挖过程对既有一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的影响。

考虑基坑和周边建筑的相对位置关系,确定计算模型长 427 m,宽 387 m,并以地表(38.0 m 高程)为起点,自坑底(13.7 m 高程)向下延伸约 2 倍基坑开挖深度,确定计算模型高度为 70 m。计算模型网格划分如图 3 所示。

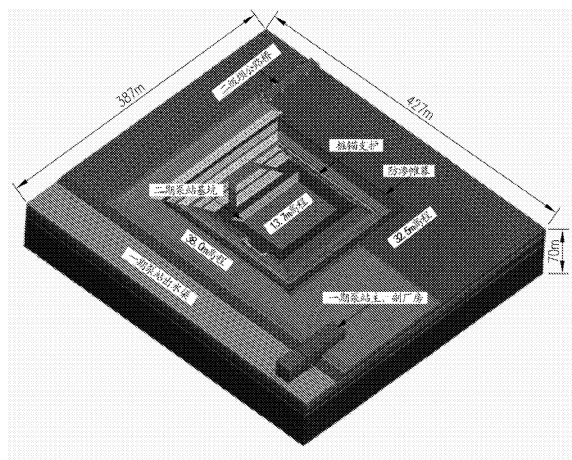


图 3 数值计算模型(开挖后)

模型底部边界采用全约束,四周侧立面采用法向约束,并根据一期泵站和二期泵站正常运行条件,设定恒定总水头边界(位置水头),不考虑溢洪道 50 a 一遇洪水对边界水位影响,因此,模型西侧、北侧取二级坝上级湖正常蓄水位,高程 34.3 m,东侧和南侧取下级湖正常蓄水位,高程 32.3 m。

数值计算中,按照施工步序,模拟分层降水和开挖。在每层开挖前,设定开挖层底面的节点压力水头为 0,实现分层降水模拟。

2.2 计算参数及工况

数值模拟计算中,岩土材料采用弹塑性模型,屈服准则为工程常用的莫尔 - 库仑准则,混凝土、锚索等采用弹性模型。计算中,土层基本物理力学参数根据勘察成果按照表 1 选取。

但是岩土工程数值计算中,土体弹性模量的取值是影响计算结果的关键参数。勘察报告中一般仅通过室内试验,给出土体的压缩模量,但是根据实际经验,在计算地层沉降时,室内试验压缩模量偏小太多,特别是在小应变情况下,土体刚度被严重低估。

根据现有研究成果,土体弹性模量的取值方法

和范围如表 2 所示。

表 2 土体弹性模量计算公式

弹性模量计算公式	适用地区或土层类型	获得方法
$E = C_0 \eta S_u$	—	理论分析
$E = [1 - 2\nu^2 / (1 - \nu)] \times E_s$	—	理论分析
$E = 2\beta \rho_s (146.37 \times q_c^{0.25})^2 (1 + \nu)$	天津地区、粉土黏土	理论分析
$E = 8.2 \times E_s$	和粉质黏土	试验统计
$E = (2 \sim 3) \times E_s$	黄土地区	试验统计
$E = (2.5 \sim 3.5) \times E_s$	上海地区软土	实测值反算
$E = (4.53 \sim 8.06) \times E_s$	上海、天津地区粉砂、粉土、粉质黏土等	实测值反算

注: E 为弹性模量, MPa; E_s 为压缩模量, MPa; S_u 为不排水抗剪强度, MPa; C_0 、 η 为与土体的超固结比和塑性指数有关的无量纲系数; ν 为泊松比; β 为修正系数, 0.3 ~ 0.5; q_c 为锥尖阻力, kPa; ρ_s 为土体密度, kg/m³。

本工程区地层以黏土和粉质壤土为主, 根据勘察成果和工程类比, 选取土体弹性模量的基准值为压缩模量的 7 倍, 帷幕底高程 5 m (插入深度的基准值为 8.7 m)。设定不同的计算工况, 分析悬挂帷幕止水和深井降水对场区地下水位变化、一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的影响, 计算帷幕插入深度和土体弹性模量等参数的敏感性。计算工况如表 3 所示。

表 3 数值模拟计算工况

计算工况	帷幕插入深度(底高程)/m	土体弹性模量 E
工况 1	8.7(5)	$7 \times E_s$
工况 2	深井降水(无帷幕)	$7 \times E_s$
工况 3	3.7(10)	$7 \times E_s$
工况 4	13.7(0)	$7 \times E_s$
工况 5	18.7(-5)	$7 \times E_s$
工况 6	8.7(5)	$5 \times E_s$
工况 7	8.7(5)	$4 \times E_s$
工况 8	8.7(5)	$3 \times E_s$

3 结果分析

3.1 场区地下水位变化

图 4(a) 和图 4(b) 分别为采用悬挂帷幕止水和深井降水方案时, 基坑开挖降水后的场区地下水位总水头。数值计算中的水头边界采用位置水头模拟, 因此计算得到的总水头即为地下水水位高程。

对比可知, 采用悬挂帷幕止水, 隔断基坑边壁的渗透通道, 延长坑底绕渗径, 可以有效控制基坑周边地下水位的下降深度和范围, 基坑施工完成后, 帷幕外侧的地下水位约为 29.93 m ~ 31.31 m, 一期泵

站副厂房附近的最低地下水位为 31.25 m, 仅下降约 1.0 m; 而采用深井降水, 基坑周边区域的地下水位大幅下降, 影响范围基本达到模型边界。

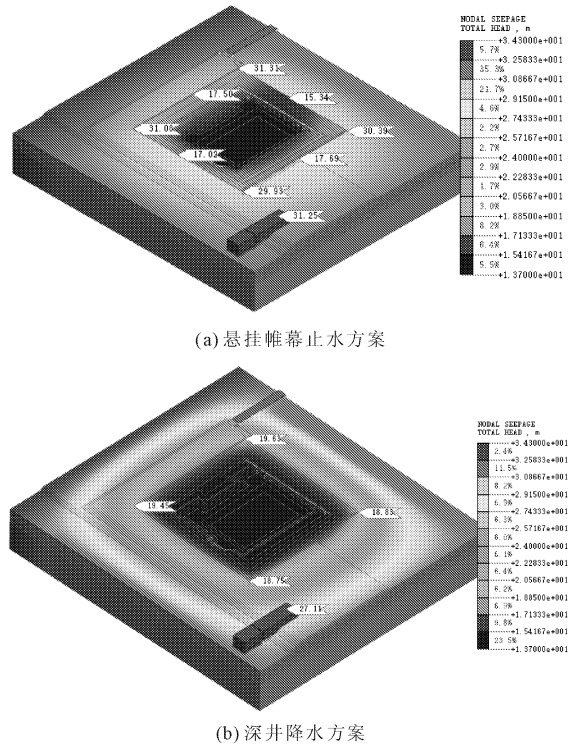


图 4 基坑开挖降水后场区地下水总水头分布云图(单位:m)

相较于帷幕止水, 采用深井降水后的大范围地下水位下降, 势必会引起场区地面和基坑邻近建筑物的大幅沉降。同时, 根据勘察成果, 本工程区地层以裂隙土为主, 渗透系数较大, 且裂隙在纵横向的分布、发育无规律, 具有随机性, 考虑到基坑开挖范围大, 周边具有充足的补给水源, 不排除存在区域裂隙联通, 导水性更好的现象, 深井降水的效果难以保证, 应采用悬挂帷幕止水。

3.2 既有泵站和公路桥变形过程

图 5 和图 6 分别为基坑降水和开挖施工时一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降和水平位移变化过程。

数值计算中, 分两步分别计算每一层的降水和开挖引起的邻近建筑物变形。可见, 无论采用悬挂帷幕止水或深井降水, 一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降和水平位移均主要由于地下水位下降引起, 受土方开挖的影响很小, 曲线均近似呈台阶形。

基准参数条件下, 采用悬挂帷幕止水, 能够有效降低基坑邻近建筑物的沉降和水平位移。悬挂帷幕

止水时,一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的最大沉降值分别为 3.0 mm、10.1 mm 和 26.0 mm,较深井降水方案分别降低了 85.3%、65.7% 和 62.4%;最大水平位移值分别为 4.3 mm、10.1 mm 和 19.7 mm,较深井降水方案分别降低了 72.4%、70.6% 和 47.9%。

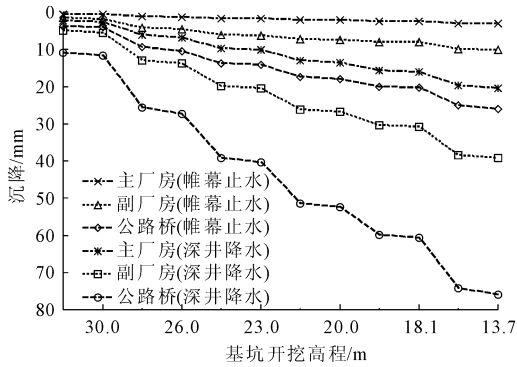


图 5 邻近建筑物沉降过程曲线

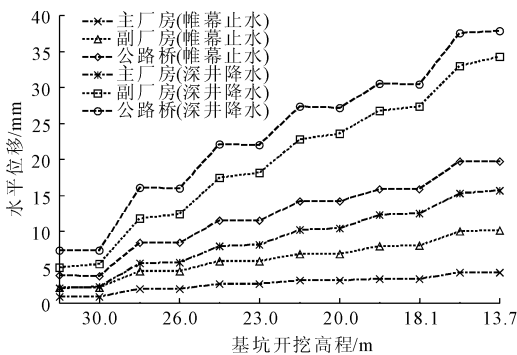


图 6 邻近建筑物水平位移过程曲线(向基坑方向为正)

3.3 帷幕插入深度的影响

图 7 为不同帷幕插入深度时,基坑降水和开挖后一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降。

可见,帷幕插入深度对邻近建筑物的沉降影响显著。帷幕插入深度过小时,对控制基坑周边地下水下降的作用效果明显降低,邻近建筑变形显著增大,如当帷幕插入深度由 8.7 m 减小至 3.7 m 后,一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降值分别增加了 37.5%、27.3% 和 20.5%;帷幕插入深度过大时,对控制沉降的作用增加有限,将造成投资浪费,如当帷幕插入深度由 13.7 m 增大至 18.7 m 后,基坑开挖降水引起的一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥沉降值变化很小,在 10% 以内。

对于本工程,考虑到经济性,选择悬挂帷幕的设计插入深度 8.7 m 较为合理。按照帷幕顶高程 33.5 m 计算,将帷幕插入深度由 8.7 m (底高程 5

m) 增大至 13.7 m (底高程 0 m) 后,帷幕投资增大 17.5%,而受基坑开挖降水影响最大的二级坝公路桥沉降值仅降低 10.4%。

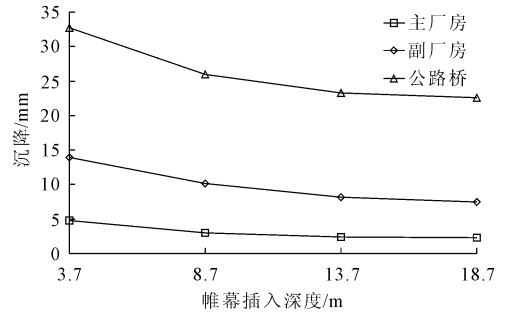


图 7 不同帷幕插入深度对邻近建筑物的沉降影响曲线

3.4 土体弹性模量的影响

图 8 为不同土体弹性模量取值时,基坑降水和开挖后一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降。

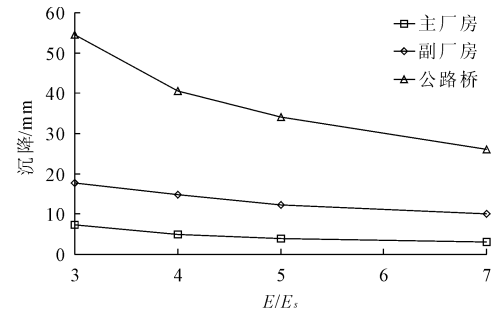


图 8 不同土体弹性模量值对邻近建筑物的沉降影响曲线

可见,土体弹性模量对邻近建筑物的沉降影响很大。当土体弹性模量取压缩模量的 5 倍以下时,随着土体弹性模量取值的减小,基坑开挖降水引起的邻近建筑物沉降计算值迅速增大。如当土体弹性模量取值由压缩模量的 5 倍减小至 3 倍后,一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降计算值分别增大了 87.1%、44.7% 和 60.1%;而当土体弹性模量取压缩模量的 5~7 倍时,沉降计算值的变化幅度仅在 20% 左右。

不同地区土性差异致可能使土体弹性模量变化较大,根据已有研究成果,除软土和黄土等特殊土外,数值模拟计算中土体弹性模量的合理取值为压缩模量的 4.6~8.0 倍,以此估算本工程基坑开挖降水引起的一期泵站主、副厂房和二级坝公路桥的沉降值分别为 3 mm~4 mm、10 mm~12 mm 和 26 mm~34 mm。施工时,可根据数值计算规律和结果,结合基坑开挖降水过程,分阶段控制,根据监测结果,及时对不同建筑物采取不同的处理措施,确保其安全运行。

对于一期泵站主、副厂房,距离基坑相对较远,受开挖降水的影响相对较小,土体弹性模量取较小值(压缩模量的4~5倍)时的最大沉降仅为12 mm左右,必要时通过地下水回灌、适当降低基坑开挖速度,避免周边水位快速降低来控制沉降;对于二级坝公路桥,距离基坑相对较近,受开挖降水的影响相对较大,土体弹性模量取较小值(压缩模量的4~5倍)时的最大沉降达到30 mm~40 mm,可根据数值计算结果,预先设定基坑各层降水和开挖引起的沉降警戒值,必要时对公路桥周边和基底土层进行旋喷和灌浆加固,控制沉降。

4 结 论

(1) 基坑位于渗透系数较大且周边补给水源充足的裂隙土层时,应采用帷幕止水隔断渗透通道,延长渗径,以控制坑外水位下降深度和范围,降低其对邻近建筑物的影响。

(2) 基坑邻近建筑物的沉降和水平位移随着基坑降水和开挖深度的增加呈台阶形增大。坑内降水引起的场区地下水位下降是导致邻近建筑物变形的主要因素,土方开挖的影响较小。

(3) 基准参数条件下,与深井降水相比,采用悬挂帷幕止水可显著降低邻近建筑物的沉降和水平位移,降幅分别达到85.3%和72.4%。

(4) 帷幕深度对基坑邻近建筑的沉降影响显著。对于本工程,帷幕插入深度8.7 m较为合理,既发挥帷幕对邻近建筑物沉降的控制效果,又节省投资。

(5) 土体弹性模量是影响数值计算结果的关键参数。根据工程类比选取土体弹性模量,估算一期泵站主、副厂房和公路桥的沉降值分别为3 mm~4 mm、10 mm~12 mm和26 mm~34 mm。施工时,可根据不同建筑物的沉降规律和结果,采取不同的控制措施。

参考文献:

- [1] 建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2] 王春波,丁文其,陈志国,等.超深基坑工程渗流耦合理论研究进展[J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(2):238-245.
- [3] 薛丽影,杨 斌,刘丰敏,等.基坑工程地下水渗流模

型试验系统研究[J].岩土工程学报,2017,39(S1):126-130.

- [4] 胡 勇,李云安,李 波,等.承压水位变动下深大基坑空间效应离心试验与数值模拟[J].岩土力学,2018,39(6):1999-2007.
- [5] 曾超峰,薛秀丽,宋伟炜,等.开挖前降水引发基坑变形机理模型试验研究[J].岩土力学,2020,41(9):2963-2972,2983.
- [6] 石晓燕,赵 宇,陈灿辉.基坑工程桩降水对邻近双线隧道影响的数值分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):144-148.
- [7] 朱志鹏.基于渗流-应力耦合分析的基坑开挖数值计算及变形研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [8] 黄 戡,杨伟军,马启昂,等.基于渗流应力耦合的基坑开挖受力特征及其对邻近地铁隧道的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(1):198-205.
- [9] 庄铃强,吴能森,余凌锋,等.某软土深基坑降水开挖地表沉降及影响因素分析[J].武汉工程大学学报,2020,42(6):663-668.
- [10] 赵 喆,马 亮,张繁祥.考虑渗流作用的深基坑桩锚支护结构内力和变形研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(6):140-145.
- [11] 罗志华.基坑开挖前降水对围护变形影响分析[J].水利与建筑工程学报,2021,19(2):185-190.
- [12] 龚晓南.对岩土工程数值分析的几点思考[J].岩土力学,2011,32(2):321-325.
- [13] 龚晓南.岩土工程数值分析现状调查中53位同行专家对岩土工程数值分析发展的建议[J].地基处理,2010,21(4):40-45.
- [14] Preene M. Assessment of settlements caused by groundwater control[J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 2000, 143(4): 177-190.
- [15] 贾 堤,石 峰,郑 刚,等.深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J].岩土工程学报,2008,30(S1):155-158.
- [16] 梁云发,贾亚杰,邓 航,等.深基坑降水沉降计算土体弹性参数取值方法探讨[J].岩土工程学报,2017,39(S2):29-32.
- [17] 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.
- [18] 顾宝和.学习太沙基,超越太沙基[J].地基处理,2020,2(4):271-276.