

富水砂层大直径深竖井开挖稳定性有限元分析

周中森^{1,2}, 肖明砾^{1,2}, 谢红强^{1,2}, 何江达^{1,2}, 裴建良^{1,2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川成都 610065;

2. 四川大学水利水电学院, 四川成都 610065)

摘要:某输水隧洞盾构接收竖井具有开挖直径大、深度深、砂层水位高的特点,对开挖过程中竖井结构受力和变形提出更高的要求。笔者以该竖井工程为研究对象,采用有限元分析方法模拟了竖井的施工过程,研究了竖井地下连续墙及地层在开挖过程中的位移、应力规律。分析结果表明:竖井开挖完成后,地表最大隆起为 39.50 mm,出现在井口附近;地层最大隆起为 41.60 mm,出现在井底地层。地下连续墙最大水平位移为 2.79 mm,出现在竖井顶部,地下连续墙顶部水平位移计算值与实测值吻合较好。地下连续墙最大拉应力为 1.13 MPa,未超过混凝土标准抗拉强度,表明盾构接收竖井开挖稳定性良好。笔者分析方法及结果可供类似工程参考。

关键词:富水砂层;竖井开挖;地下连续墙;数值模拟

中图分类号:TV314;TV331

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2024)01-0116-07

Finite Element Analysis of Excavation Stability of Large-diameter Deep Shaft in the Water-Rich Sand Layer

ZHOU Jinsen^{1,2}, XIAO Mingli^{1,2}, XIE Hongqiang^{1,2}, HE Jiangda^{1,2}, PEI Jianliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University,

Chengdu Sichuan 610065; 2. College of Water Resource and Hydropower,

Sichuan University, Chengdu Sichuan 610015)

Abstract: A shield receiving shaft of a water conveyance tunnel has the characteristics of large excavation diameter, depth and high water level in sand layer, which puts forward higher requirements for the stress and deformation of the shaft structure during the excavation. In this paper, the construction process of this shaft is simulated by finite element analysis and the displacement and stress laws of underground diaphragm wall and the stratum of the shaft during the excavation process are studied. The analysis results show that after the shaft excavation is completed, the maximum surface uplift is 39.50 mm, which appears near the wellhead; the maximum stratigraphic uplift is 41.60 mm, which appears in the bottom hole formation; the maximum horizontal displacement of the underground diaphragm wall is 2.79 mm, which appears at the top of the shaft. The calculated value of the horizontal displacement at the top of the underground diaphragm wall is in good agreement with the measured value. The maximum tensile stress of the underground diaphragm wall is 1.13 MPa, which doesn't exceed the standard tensile strength of the concrete, indicating that the excavation stability of the shield receiving shaft is good. The analysis method and results in this paper can be used as reference for similar projects.

Keywords: Water-rich sand layer; Shaft excavation; Underground diaphragm wall; Numerical simulation

0 引言

近些年,随着中国经济发展和工程技术进步,水利工程中的竖井不断向超大尺寸、超大开挖深度、更加复杂的工程地质环境的方向发展^[1-2]。这对竖井开挖过程中的受力和变形等力学响应的研究提出了更高的要求,研究开挖过程中结构的

变形和应力规律以及地层变形规律,对帮助施工设计和保障施工安全具有重要意义^[3]。

在竖井施工的结构和地层稳定性计算中,数值分析是常用的分析方法,已在多处工程中得到应用和验证,可以很好的对施工方案进行验算。孙强等^[4]通过 ANSYS 软件模拟了软弱土层中竖井开挖过程,分析了开挖过程中土体的稳定性。

收稿日期:2023-07-31

李孟等^[5]运用 MIDAS 有限元软件模拟盾构竖井施工过程中,并与实测结果对比,重点分析了竖井地下连续墙的水平位移和受力特性。濮奇浩等^[6]开展了复杂支护体系下某排风竖井施工全过程模拟,并评估了施工期间围护结构的安全性。孔科等^[7]借助有限元方法对不同支护措施下竖井开挖进行了模拟,结果表明在软岩中竖井采用衬砌混凝土作为支护最佳。曾祥茜等^[8]利用 FLAC^{3D} 有限差分软件模拟了某临库竖井的开挖过程,分析了渗流—应力耦合作用和非耦合作用对竖井应力变形的不同影响。毛盘等^[9]采用自主研发的有限元程序对某特深竖井开挖进行了仿真分析,得到了竖井的土压力分布特性。代鑫等^[10]运用 ABAQUS 软件模拟了某水电站双竖井的施工过程,并分析了开挖过程中竖井结构的力学特性和土体的变形规律。

笔者针对某输水隧洞盾构接收竖井工程,通过 MIDAS GTS NX 有限元软件建立了三维有限元模型,模拟了盾构接收竖井的施工过程,分析了开挖过程中地下连续墙、地层应力变形规律,并与实测位移进行了对比,评价了该竖井施工的安全性。

1 工程概况

某输水隧洞的盾构接收井主体结构内径为 15.40 m,地下连续墙外径为 21.80 m、内径为 18.80 m,开挖深度 44.59 m,采用明挖逆作法施工,竖井整体设计图见图 1。地下连续墙等盾构接收井主体结构为 C35 混凝土。为有效隔断地下水与竖井的联通,盾构接收井采用高压旋喷桩(MJS 工法)封底,在盾构接收井底部形成连续的固结体。封底平面范围超出地下连续墙外边线 2.00 m,竖向范围为竖井底面以下 10.00 m。MJS 工法具有设备尺寸小,成桩直径大的特点,可以有效节约施工时间,有利于现场施工组织^[11]。盾构接收洞口同样采用高压旋喷桩加固措施,形成连续的块状固结体,实现加固止水作用。盾构接收洞口加固的高压旋喷桩桩间完全搭接,不留空隙,加固范围为长 12.00 m、宽 17.00 m、深 19.00 m。

根据地质勘探资料,盾构接收井施工区域地层从上到下依次分为轻粉质粘土、重粉质壤土、轻粉质粘土、粉质粘土、重粉质壤土、中细砂。场地地下水水位高程为 81.50 m,地下连续墙需要承

受较大的水土压力。

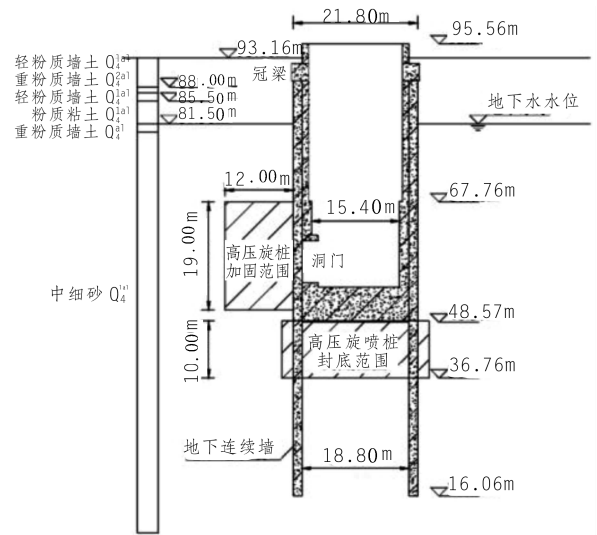


图1 竖井整体设计图

2 三维有限元模型

为研究盾构接收井开挖引起的结构和地层变形,根据地勘资料,采用有限元软件 MIDAS GTS NX 建立三维有限元模型。模型尺寸选取为长 120.00 m、宽 120.00 m、深 150.00 m,盾构接收井三维有限元模型见图 2。地层、混凝土结构均采用 8 节点六面体等参单元进行网格划分,模型共划分出 197 123 个单元,96 635 个节点。参照盾构接收井周围地质条件,对三维有限元模型进行了一定的简化和假设:地层为均匀连续介质,模型初始应力场仅为自重应力场;模型底面采用垂直和水平方向位移固定约束,四个侧面采用水平方向位移固定约束,顶面取为自由边界^[12]。此次有限元分析采用水土分算,地下水水位以上采用天然容重,地下水水位以下采用浮容重,并在竖井混凝土结构上施加水荷载。

盾构接收井结构、土层等材料均服从线弹性假定。根据工程地质勘察获取的各土层物理力学指标建议值,主要土体及结构材料力学参数见表 1。盾构接收井地下连续墙、冠梁、内墙等主体结构为 C35 混凝土,混凝土垫层标号为 C15。

盾构接收井施工主要分为竖井开挖和主体结构施工两部分。结合实际工序,盾构接收井施工模拟计算步骤如下:①施加初始地应力,建立初始地应力场,位移清零;②高压旋喷桩封底施工;③地下连续墙施工;④高压旋喷桩端前加固施工;⑤地下连续墙内土体分层开挖,每层开挖深度 4 m,

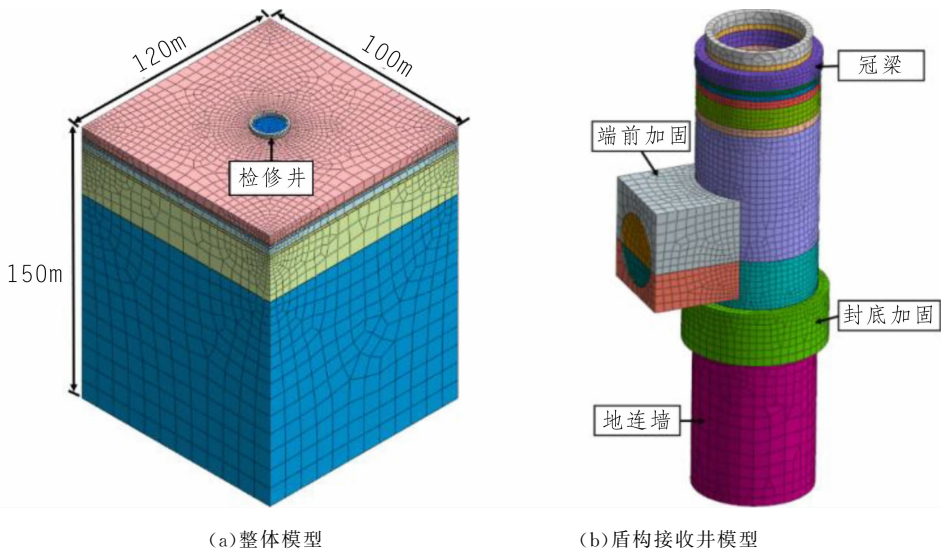


图 2 盾构接收井三维有限元模型

表 1 主要土体及结构材料力学参数

材料	天然容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	浮容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松比
轻粉质壤土	17.07	9.69	19.49	2.38	0.4
重粉质壤土	19.42	9.09	18.89	2.29	0.4
粉质粘土	19.24	9.50	19.30	2.38	0.4
重粉质壤土	19.96	10.29	20.09	2.43	0.4
中细砂	19.43	10.42	20.22	4.67	0.4
C35	23.25	—	—	31 500.00	0.2
C15	23.01	—	—	22 000.00	0.2
高压旋喷桩加固	20.00	—	—	4 500.00	0.2

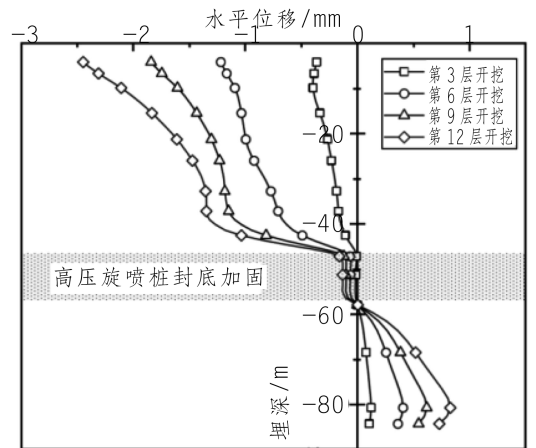
共开挖 12 层；⑥盾构接收井内衬结构施工。

3 数值模拟结果分析

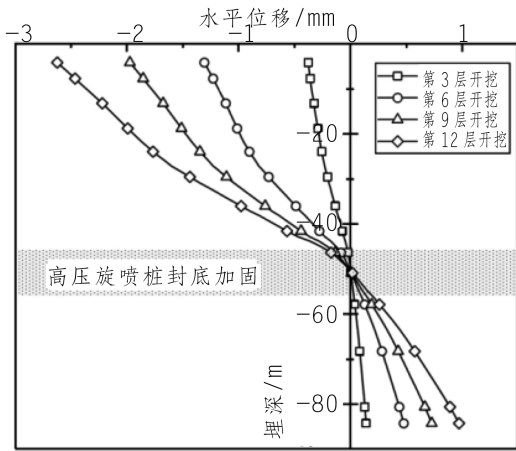
3.1 地下连续墙变形及应力分析

由于开挖层数较多,选取开挖至第 3、6、9、12 层作为典型工况进行分析。通过对盾构接收井开挖过程的模拟计算,对地下连续墙非进洞侧、左右侧和进洞侧的水平位移计算结果进行分析,其中左右侧变形相差不大,按平均变形考虑。主要分析了各开挖工况下地下连续墙水平位移沿埋深方向的分布规律,开挖过程中地下连续墙不同部位的位移随埋深的变化见图 3,图中地下连续墙向竖井内侧变形的水平位移值为负,向竖井外侧变形的水平位移值为正。从图 3 可以看出,随着竖井开挖深度的增加,地下连续墙的变形不断增加;随着埋深的增加,地下连续墙水平位移值逐渐减小,从向竖井内侧变形转为向外侧变形,在高压旋喷桩封底加固上端附近发生方向改变;向竖井内侧最大变形出现在地下连续墙顶部,向竖井

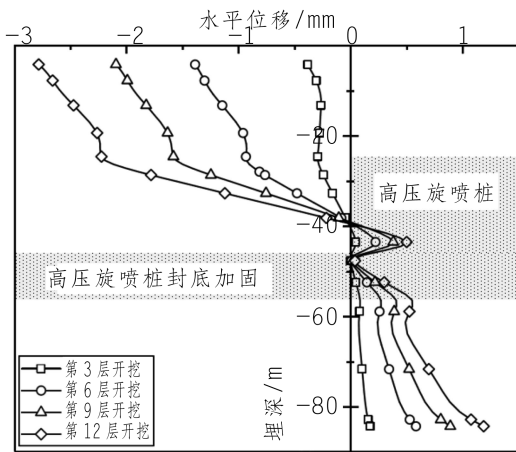
外侧最大变形出现在地下连续墙底部。从地下连续墙顶部向底部,非进洞侧水平位移逐渐由 -2.45 mm 变化为 0.83 mm ,左右侧水平位移逐渐由 -2.62 mm 变化为 0.97 mm ,进洞侧水平位移逐渐由 -2.79 mm 变化为 1.19 mm 。



(a) 非进洞侧



(b)左右侧



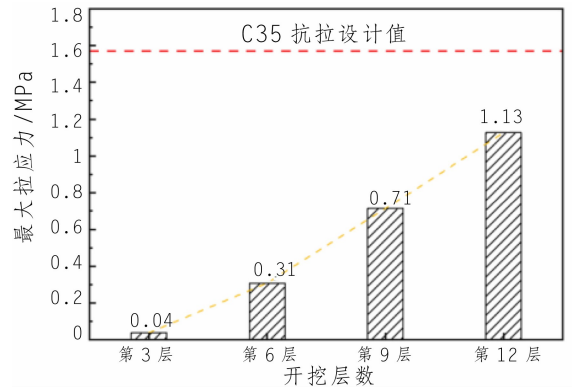
(c)进洞侧

图3 开挖过程中地下连续墙不同部位的位移随埋深的变化

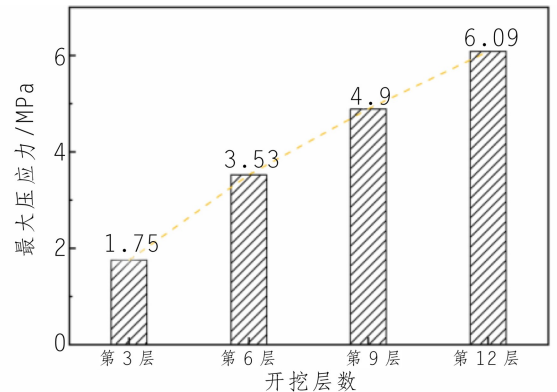
三个部位的水平位移均在高压旋喷桩封底加固上端附近发生方向改变,这主要是因为地下连续墙和加固土体的模量均远大于地层模量,高压旋喷桩封底加固土体对地下连续墙形成支点作用。当上方的地下连续墙向内侧位移时,下方的地下连续墙向外位移。地下连续墙进洞侧位移在埋深约44 m处向内位移出现骤降,这是端前加固区对地层的加固效果。

从图中可以看出,地下连续墙最大拉应力和最大压应力均随着竖井开挖不断增大;在开挖结束时,最大拉应力与最大压应力分别为1.13 MPa和6.09 MPa。混凝土抗压强度远大于抗拉强度,因此主要评价地下连续墙是否会产生受拉破坏。地下连续墙材料为C35混凝土,抗拉设计值为1.57 MPa。在竖井开挖过程中,地下连续墙最大拉应力均未超过C35抗拉强度设计值,不会发生

拉破坏,围护结构安全。地下连续墙应力极值随开挖过程的变化见图4。



(a)最大拉应力



(b)最大压应力

图4 地下连续墙应力极值随开挖过程的变化

在第12层竖井开挖完成后,开挖完成后地下连续墙拉应力云图见图5,左图为地下连续墙进洞侧,右图为地下连续墙非进洞侧。从图5可以看出,地下连续墙与高压旋喷桩封底加固、端前加固接触的上缘出现拉应力;地下连续墙与端前加固接触的上部出现椭圆形的拉应力分布,最大拉应力为1.13 MPa;地下连续墙与封底加固的上部出现条带状的拉应力分布,拉应力极值为1.10 MPa,出现在地下连续墙左右两侧。

3.2 地表沉降分析

盾构接收井处竖井开挖会导致周围土体应力场的改变,受土体开挖卸荷作用和地下连续墙侧约束作用的联合影响,地下连续墙以及背后一定区域内的土体会产生向上位移,表现为地表隆起。地表隆起随点位与竖井间距的变化曲线见图6。

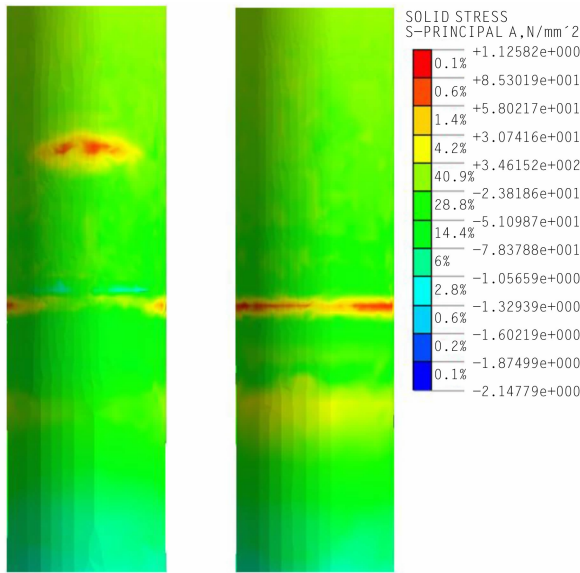
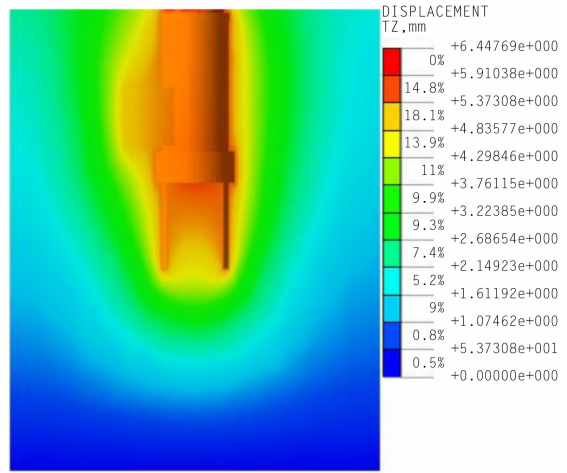


图 5 开挖完成后地下连续墙拉应力云图

41.6 mm, 位于 MJS 加固土体底部。这主要是因为基坑开挖竖向卸荷后, 坑底土体向上回弹, 围护结构在坑底土体带动下向上位移, 并带动周围土体一并向上位移。



(a) 第 3 层开挖

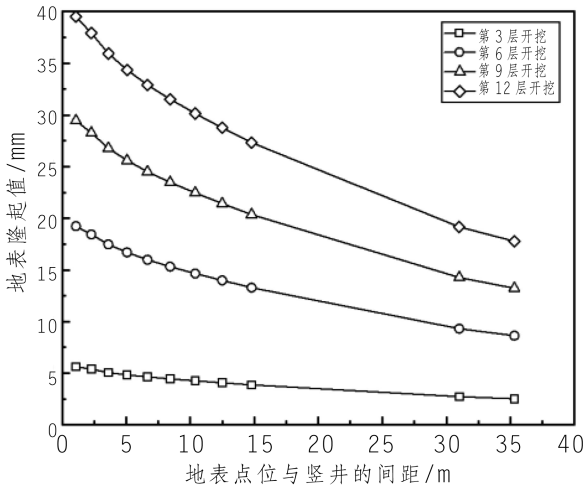
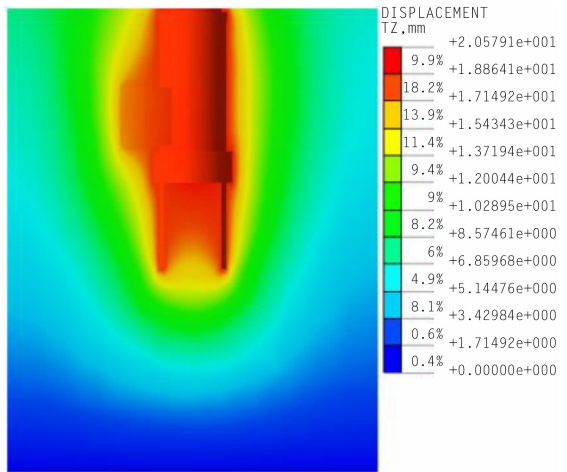


图 6 地表隆起随点位与竖井间距的变化曲线

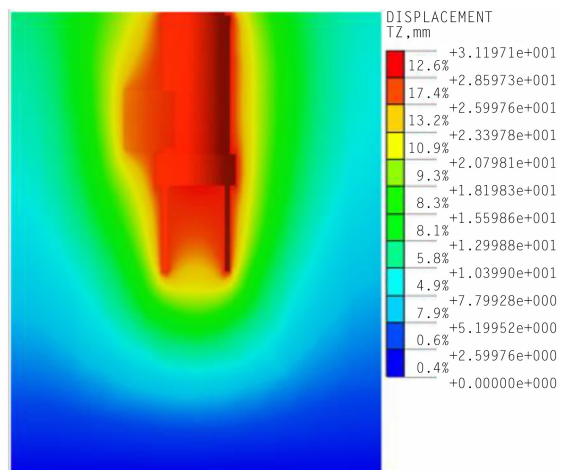


(b) 第 6 层开挖

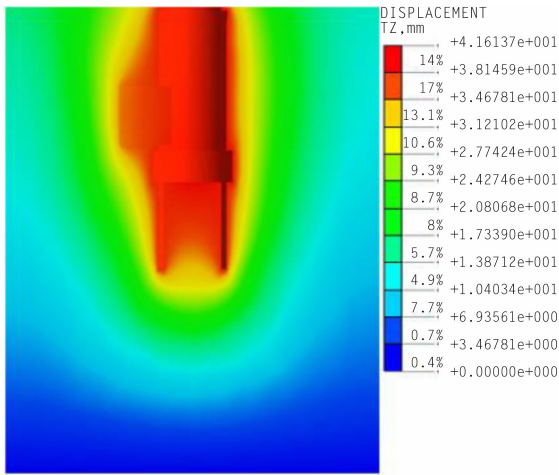
地表隆起随点位与竖井间距的变化曲线见图 6, 地表隆起量随竖井开挖深度的增加而增大。总体而言, 前 6 步开挖引起的隆起量更为显著。地表隆起整体表现为随点位与竖井间距的增加而减小, 最大隆起位置为竖井边缘, 在竖井开挖完成时, 隆起达到最大, 约为 39.5 mm。这与马永锋等^[13]研究的竖井开挖地表隆起结果类似。

3.3 竖井开挖地层变形分析

盾构接收井开挖过程中地层竖向位移云图见图 7。从图中可以看出, 开挖卸荷导致盾构接收井周围土体出现隆起; 同时随着开挖深度的增加, 隆起区域不断扩大, 隆起值逐渐增大; 最大隆起出现在第 12 次开挖(即竖井开挖完成)后, 量值为



(c) 第 9 层开挖

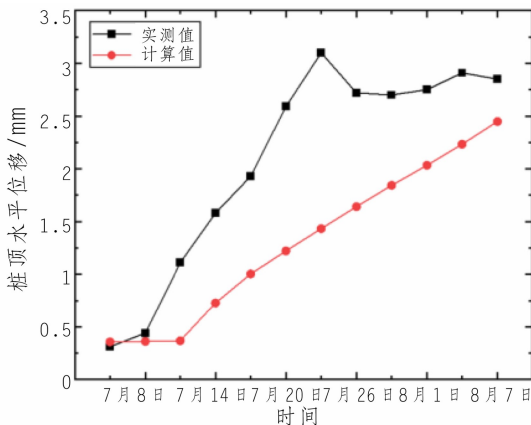


(d)第12层开挖

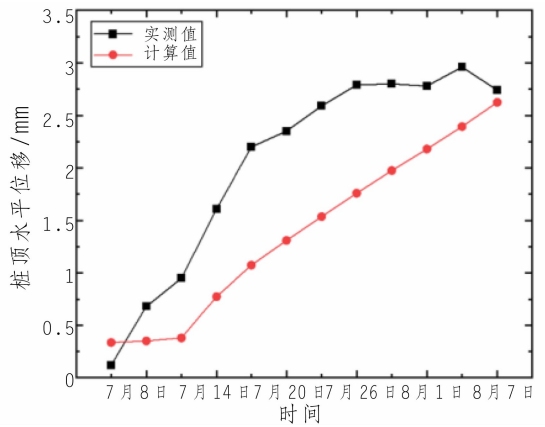
图7 盾构接收井开挖过程中地层竖向位移云图

4 地下连续墙水平位移监测及分析

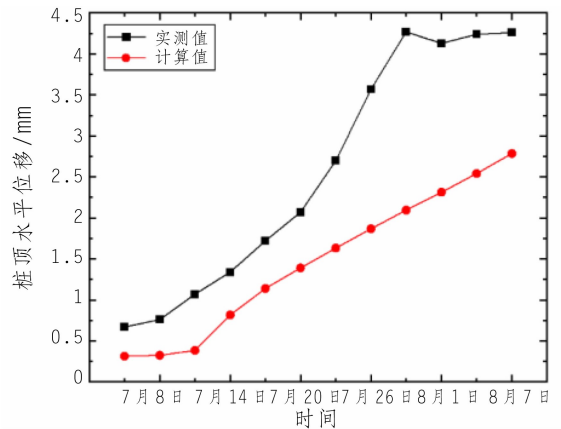
根据盾构接收井施工监测资料,2021年7月5日—8月7日盾构接收井开挖施工完毕。笔者对比了地下连续墙顶部水平位移的监测数据与数值模拟结果,地下连续墙顶部水平位移随时间变化情况见图8。从图中可以看出,在竖井开挖过程中,地下连续墙顶部向内的水平位移不断增大,在开挖后期位移波动明显;其中,进洞侧水平位移最大,左右侧次之,非进洞侧最小;数值模拟结果呈现逐渐递增的规律,前3层开挖的位移递增速率小于后9层开挖的位移递增速率。数值模拟结果与监测位移在随开挖过程的变化趋势上较为吻合,表明笔者分析可以较好模拟盾构接收井开挖过程中地下连续墙的水平位移变化规律。计算值相较实测值稍小,这主要是数值模拟中未考虑竖井周边施工机具、临时建筑、堆载等对土体、结构的影响。总体而言,地下连续墙顶部的最大水平



(a)非进洞侧



(b)左右侧



(c)进洞侧

图8 地下连续墙顶部水平位移随时间变化情况

位移量值约为3.0~4.5 mm,量值较小,说明竖井在施工过程中的稳定性较好。

5 结论

笔者运用MIDAS软件模拟了某输水隧洞盾构接收竖井的开挖过程,分析了盾构接收井开挖过程中地下连续墙及地层的应力和变形规律,主要结论如下:

(1)受土体开挖卸荷作用和地下连续墙侧限约束作用的联合影响,地层变形主要表现为隆起变形,竖井开挖完成后,地表最大隆起为39.5 mm,出现在井口附近,地层最大隆起为41.6 mm,出现在井底地层;

(2)随着盾构接收竖井的开挖,地下连续墙最大拉应力和最大压应力均不断增大,在开挖结束时,最大拉应力与最大压应力分别为1.13 MPa和6.09 MPa,其中最大拉应力未超过C35混凝土1.57 MPa的抗拉强度设计值,不会发生拉破

坏, 围护结构安全;

(3) 将地下连续墙顶部水平位移与监测位移对比, 计算结果与实测位移在趋势上较为吻合, 计算位移略小于实测位移; 地下连续墙顶部的最大水平位移量值约为 3.0~4.5 mm, 量值较小, 说明地下连续墙在施工过程中的稳定性较好。

参考文献:

[1] 袁赞, 谢剑波, 林伟明. 复杂地质条件下超深渗水竖井施工技术浅析[J]. 四川水力发电, 2018, 37(5): 26-28+153.

[2] 王天明. 复杂环境下特殊地层异型深竖井关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(6): 77-82.

[3] 姚亚辉, 张玉洁, 万龙, 等. 竖井开挖过程的 FLAC3D 数值模拟[J]. 金属矿山, 2014(5): 60-63.

[4] 孙强. 复杂地质条件下竖井开挖稳定性及参数优化[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4): 123-125.

[5] 李孟, 郑月昱, 杨小平, 等. 深厚砂层深挖圆形竖井施工数值模拟及实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1 355-1 362.

[6] 濮奇浩, 骆晓锋, 徐磊, 等. 复杂支护结构软弱地层深竖井施工过程仿真分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(3): 144-148+159.

[7] 孔科, 易文明, 汤雷, 等. 软岩中竖井开挖的支护体系研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(2): 131-134.

[8] 曾祥茜, 何文社, 王开喜. 渗流-应力耦合作用下的临库竖井开挖数值分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(4): 139-143.

[9] 毛盘, 张旭东, 叶斌, 等. 特深圆形竖井土压力分布模式及影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(1): 257-267.

[10] 代鑫, 徐伟, 邹丽, 等. 竖井开挖过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 154-157.

[11] 熊仲明, 覃泽宏, 蔡虹, 等. 富水砂层盾构始发 MJS 工法桩的应用及分析[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(3): 8-12+64.

[12] 魏福贵, 朱牧原, 李鳌, 等. 考虑松动圈的深大竖井稳定性及受荷特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊 2): 662-669+702.

[13] 马永锋, 倪锦初, 李衡, 等. 邛山高边坡对穿黄竖井变形影响三维数值分析[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 59-61+95.

作者简介:

周巾森(1999-), 男, 重庆合川人, 硕士研究生, 研究方向为地下工程的数值模拟;

肖明砾(1981-), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 研究方向为地下工程(地下厂房、隧洞)、岩土基础与结构稳定性的数值模拟;

谢红强(1976-), 男, 四川成都人, 教授, 博士, 主要从事地下工程(水工隧洞、地下厂房、盾构隧道)、高边(滑)坡地质灾害、大坝基础与结构稳定性的试验测试、理论分析、数值模拟, 以及岩石流变力学和多场耦合相互作用等领域的研究;

何江达(1961-), 男, 四川达州人, 教授, 博士, 主要研究领域包括: 岩体地应力、岩体变形与强度、裂隙岩体/非饱和土渗流、岩土体多场耦合分析、岩土边坡优化设计及稳定性分析、高坝坝基(肩)、坝体结构稳定性、大型地下洞室稳定性分析从事岩体地应力、岩体参数以及高坝坝基(肩)、坝体结构、岩质高边坡、大型地下洞室稳定性研究;

裴建良(1976-), 男, 江苏常州人, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学机理、土力学与地基基础、工程边坡稳定性等方面的教学与研究工作。

(编辑: 廖益斌)

(上接第 115 页)

拱坝, 对中国正在或者即将进行的藏区、高寒区高拱坝智能建设具有重要指导和引领意义, 推动能源数字化和智能化发展, 加快提升能源产业链智能化水平, 为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 钟登华, 王飞, 吴斌平, 等. 从数字大坝到智慧大坝[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10): 1-13.

[2] 李庆斌, 林鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 139-146.

[3] 钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展[J]. 水利

学报, 2019, 50(1): 38-52, 61.

[4] 樊启祥, 张超然, 陈文斌, 等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2): 22-35.

[5] 王继敏, 程晓攀. 雅砻江流域水电工程智能建设探索与创新[J]. 四川水力发电, 2020, 39(6): 1-7.

[6] 李善平, 肖培伟, 唐茂颖, 等. 基于智慧工程理念的双江口水电站智能地下工程系统建设探索[C]. 北京: 中国电力出版社出版, 2017.

作者简介:

夏勇(1984-), 男, 四川泸州人, 高级工程师, 硕士, 从事水利水电工程建设管理工作。

(编辑: 廖益斌)